

Volker Schmid-Schmieder

Vergleich der Leistungsfähigkeit von
Biofilmverfahren bei Sanierungen bzw.
Erweiterungen von kommunalen
Kläranlagen

Doktorarbeit / Dissertation

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2000 Diplomica Verlag GmbH
ISBN: 9783832457204

Volker Schmid-Schmieder

**Vergleich der Leistungsfähigkeit von Biofilmverfahren
bei Sanierungen bzw. Erweiterungen von kommunalen
Kläranlagen**

Volker Schmid-Schmieder

Vergleich der Leistungsfähigkeit von Biofilmverfahren bei Sanierungen bzw. Erweiterungen von kommunalen Kläranlagen

**Dissertation / Doktorarbeit
an der Universität Fridericiana Karlsruhe (TH)
Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
Institut für Siedlungswasserwirtschaft
2 Jahre Bearbeitungsdauer
November 2002 Abgabe**



Diplomica GmbH _____
Hermannstal 119k _____
22119 Hamburg _____

Fon: 040 / 655 99 20 _____
Fax: 040 / 655 99 222 _____

agentur@diplom.de _____
www.diplom.de _____

ID 5720

Schmid-Schmieder, Volker: Vergleich der Leistungsfähigkeit von Biofilmverfahren bei Sanierungen bzw. Erweiterungen von kommunalen Kläranlagen / Volker Schmid-Schmieder - Hamburg: Diplomica GmbH, 2002
Zugl.: Karlsruhe, Technische Universität, Dissertation / Doktorarbeit, 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Diplomica GmbH
<http://www.diplom.de>, Hamburg 2002
Printed in Germany

Vorwort

Die Abwasserreinigung steht immer noch im Zentrum der Diskussionen wissenschaftlicher und technischer Art, obwohl die Kosten, etwa im Bereich der Abwassersammlung und des Abwassertransportes trotz aller Entwicklungen immer noch um Etliches höher sind als im Bereich der Abwasserreinigung. Viele Kläranlagen in unseren Breiten sind gebaut. Das ehemals bestehende Vollzugsdefizit ist in vielen Bereichen minimiert worden. Aber mit den immer ehrgeizigeren Zielsetzungen, die z. T. auch aus dem Raum der Europäischen Gemeinschaft kommen, ist immer wieder nachzubessern. Neue Ziele ergeben sich vor allen Dingen in der Stickstoffelimination (was nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Nährstoffelimination zu betrachten ist) und der Phosphorelimination (wo von den anerkannten Regeln der chemischen Elimination zu neuen Ufern der biologischen Entfernung vorgedrungen werden soll).

In beiden Fällen, der biologischen Stickstoffelimination und der biologischen Phosphorelimination, ergeben sich erhebliche zusätzliche Anforderungen zum Reaktorvolumen, wenn man sich an die klassische Belebungs-technologie hält. Dies ist nicht mehr in allen Fällen realisierbar, weil die Standorte schon weitestgehend ausgereizt sind. Daher wird es nötig, nach verfahrenstechnischen Alternativen zu suchen. Dies muss sich vor allen Dingen in der Lokalisierung der Biomasse abzeichnen (also damit die Trennung von Abwasserbewegung und Biomassenbewegung ermöglichen) und dann schließlich auch in einer effizienteren Abtrennung, Rückhaltung, Aufkonzentration usw. der Biomasse. Nicht zuletzt sollen auch die sich nun mehr und mehr abzeichnenden Probleme in der Schlammqualität angesprochen werden, die ebenfalls eine Aufforderung zur Suche nach neuen verfahrenstechnischen Alternativen darstellen. Der Autor dieser Schrift hat diese Aufgabe der Sanierung im Rahmen des Entsorgungsverbandes Saar, Abwasserzweckverband, praktisch anzugehen gehabt und die verschiedenen, heute zur Verfügung stehenden, Alternativen gesichtet. Dabei hat er festgestellt, dass das Veröffentlichen in diesem Bereich nicht zu Informationen geführt hat, die direkt für den Praktiker, d. h. für seine Planung, seine Ausschreibung und seine Bemessung verwendbar sind. So macht er es sich zur Aufgabe, unterstützende Untersuchungen durchzuführen, die ihm erlauben, die bisher vorliegenden Erfahrungen übertragbar und für den Praktiker anwendbar zu machen und sie auch zu bewerten.

Vom Arbeitsaufwand her sind die Untersuchungen, die durchzuführenden Messungen und die Auswertungen, absolut gesehen beeindruckend, zahlreich und umfangreich. Der Autor hat dies z.T. im Rahmen von seinen Dienstaufgaben durchgeführt und durch geschickte Organisation und Planung ein Maximum aus diesen Untersuchungen herausgeholt. Aus praktischer Sicht, für das spezifische Ziel, Grundlagen für Ausschreibungen zu legen ist der Anspruch erfüllt worden. Es sind Informationen auch quantitativer Art entwickelt worden, die es einem Anwender auch aus einem anderen Unternehmen möglich machen sollte, einen Ausschreibungstext vernünftig zu formulieren. Es ist mehr als lobenswert, dass ein so intensiv in Praxis und Wissenschaft diskutiertes Paket von Alternativ-Verfahren zur Belebtschlammtechnologie zu einer quasi vergleichenden und systematisierten Untersuchung geführt und damit vor allen Dingen auch Anregungen für weitere systematische Untersuchungen gebracht hat und auch – wie oben dargestellt – Grundlagen für arbeitsblattartige Formulierungen geliefert hat.

Karlsruhe. im November 2000

Kurzfassung

Aufgrund des in Deutschland wie auch in anderen europäischen Nachbarstaaten in verstärktem Maße anstehenden Sanierungs- und Erweiterungsbedarfs bei kommunalen Kläranlagen mit größeren Auslegungskapazitäten zeigt sich die Notwendigkeit, die konkreten Einsatzmöglichkeiten von Biofilmverfahren für diese Zwecke näher zu betrachten und anwendungsorientierte Hinweise zur Leistungsfähigkeit derartiger Verfahrensvarianten zu erarbeiten.

In dieser Arbeit werden deshalb die unterschiedlichen Verfahrensvariationen der Biofilmsysteme - teilweise auch in Kombination mit der konventionellen Belebtschlammbiozönose- detailliert untersucht und die Ergebnisse zu dem bereits existierenden Erfahrungsschatz in Relation gesetzt. Die hauptsächliche Zielsetzung der Untersuchungen liegt darin, ausreichend abgesicherte und wissenschaftlich begründete Ansätze zur Dimensionierung der einzelnen Biofilmstufen für weitgehende Nitrifikation und Denitrifikation zu entwickeln. Zu diesem Zweck werden die mikrobiologischen Kenntnisse, die bisher für das spezielle Einsatzgebiet der Biofilmanwendung in der Abwasserreinigung existieren, zusammengetragen und analysiert. Es zeigt sich bei der Auswertung der bis dato publizierten Erfahrungen, dass oftmals effektive Leistungsvergleiche aufgrund der meist sehr speziellen Aufgabenstellungen und Randbedingungen erschwert werden. Aufbauend auf dem Spektrum der zur Beurteilung der einzelnen Biofilmverfahren relevanten Leistungsparameter und einer einheitlich aufgebauten Systematik der Verfahrensmodifikationen wird versucht, verfahrenstechnische Dimensionierungsansätze zu entwickeln und durch adäquate Versuche in halbtechnischen Pilotanlagen abzusichern.

So wird für die **Hauptgruppe** der mit der Belebtschlammbiozönose **kombinierten Biofilm - verfahren** als erstes repräsentatives System das **Pegasus-Verfahren** näher untersucht. Basierend auf der verfahrenstechnischen Konfiguration einer vorgeschalteten Denitrifikation mit einer Trägermaterialfüllung in der Nitrifikationszone kann folgende Leistungsfähigkeit anhand entsprechender Versuchsauswertungen per Regressionsrechnungen testiert werden:

- beim Kohlenstoffabbau sehr gute Eliminationsleistungen (bei unterschiedlichen Temperaturverhältnissen) bei CSB-Raubelastungen zwischen 1,4 und 5,0 kg CSB/m³*d
- bei der Nitrifikation sehr gute NH₄-Eliminationsleistungen (bei unterschiedlichen Temperaturverhältnissen) bei TKN-Raubelastungen zwischen 0,2 und 0,55 kg /m³*d bzw. 0,075-0,175 kg NH₄/m³*d
- bei der Denitrifikation (Belebtschlamm) gute Eliminationsleistungen bei mittleren NO₃- Raumbelastungen von 0,13 kg/m³*d
- Schlammindeces ISV < 120 ml/g TS sowie spezifische Überschussschlammproduktionsraten < 1,0 kg TS/kg BSB₅ (mit starkem Schwankungsbereich)

Bei einem **weiteren kombinierten Verfahren** der o.g. Hauptgruppe, dem sog. **EvU-Verfahren** werden beim Kohlenstoffabbau und bei der Nitrifikation ebenfalls sehr gute Eliminationsleistungen festgestellt, auch in der mit Trägermaterial gefüllten Denitrifikationsstufe sind gute Eliminationsraten bei NO₃-Raumbelastungen von 0,22-0,29 kg/m³*d zu erreichen.

Die Schlammindeces ISV liegen bei 100 ml/g TS, die Schlammproduktion bei ca. 1,0 kgTS/kg BSB₅.

Für die **Hauptgruppe der sessilen Biologen auf Trägermaterial** werden bei dem ersten repräsentativen System, dem **Schwebbettverfahren (Kaldnes)** in den einzelnen teilprozessorientierten Verfahrensstufen mit jeweils darauf abgestimmten aktiven spezifischen Oberflächen ebenfalls sehr gute Kohlenstoffabbau-, Nitrifikations- und Denitrifikationsraten sowie gute Schlammindeces ermittelt. Diese Ergebnisse sind auch bei dem dieser Hauptgruppe zuzuordnenden Biofilmsystem eines **Festbettverfahrens mit fest installierter Trägerbiologie** feststellbar.

Ein wichtiges Fazit ist dahingehend zu ziehen, dass im Vergleich zu konventionellen Belebtschlammverfahren die einzelnen näher untersuchten Biofilmsysteme in Bezug auf Kohlenstoff- und Stickstoffelimination gleichwertige Reinigungsleistungen aufweisen, so dass im Hinblick auf Dimensionierungsansätze eine ausreichend abgesicherte Basis für die Quantifizierung der Abbauleistungen und deren funktionalen Abhängigkeiten existiert.

Somit war die Möglichkeit gegeben, mit den aus den Untersuchungsergebnissen abgeleiteten Leistungsparametern und Bemessungsansätzen exemplarisch eine detaillierte Dimensionierung für die Erweiterung einer kommunalen Kläranlage mit einer Auslegungsgröße von 75.000 EW durchzuführen. Aus den errechneten Volumina bzw. Oberflächen der einzelnen verfahrenstechnischen Komponenten der Abwasserreinigung resultiert, dass in Relation zu den Ergebnissen des klassischen Belebtschlammsystems bei den Biofilmverfahren signifikante **Einsparpotentiale** aufgezeigt werden können, und zwar

- **in der biologischen Stufe** Volumendifferenzen in der Größenordnung von 50-55% bei sessilen Trägermaterialbiologen (KALDNES, Festbett) und von 33-34% bei kombinierten Biofilmverfahren (EvU, Pegazur)
- **in der Nachklärung** Oberflächendifferenzen von ca. 49% bei den sessilen Trägerbiologen

Diese Vorteile der diversen Biofilmverfahren in Form von Differenzvolumina und –oberflächen lassen sich direkt als Investitionskostenreduzierungen ausdrücken, denen erhöhte betriebliche Aufwendungen (Energieaufwand für Schwebbett, Rückspülung etc.) gegenübergestellt werden müssen.

Zu diesen wirtschaftlichen Aspekten kommen noch zusätzlich nicht-pekuniäre Vorteile wie

- geringerer Flächenbedarf mit positiven Auswirkungen auf die Standortrealisierung und auf erforderliche landschaftspflegerische Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen,
- Möglichkeit der kompletten Einhausung der Anlagen mit positiven Auswirkungen auf die Minimierung der Geruchs- und Lärmemissionen, einen optimalen Winterbetrieb und die städtebauliche sowie architektonische Gestaltung der gesamten Anlage,
- gezielte Steuerungsmöglichkeiten der biologischen Stufen aufgrund der Spezifikation der jeweils eingesetzten Mikroorganismen und darauf optimal abstimmbarer Milieubedingungen insbesondere für spezielle Einsatzfälle wie temporäre Belastungsänderungen, Störfallbewältigung, jahreszeitlich bedingte Änderungen der Prozessbedingungen.

	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Erkenntnisstand	2
1.3 Untersuchungsansatz, Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2. Mikrobiologische Grundlagen der Biofilmverfahren	7
2.1 Biofilmstruktur und –aufbau	7
2.2 Entwicklung von Biofilmen	11
2.2.1 Entwicklungsstadien	11
2.2.2 Bedeutung der EPS (Extrazelluläre polymere Substanzen)	14
2.3 Funktionale Darstellung der Biofilmeigenschaften zur Beschreibung der Abbaukinetik	16
3. Bemessungsgrößen und Leistungsparameter	27
3.1 prozessbestimmende Zulaufparameter	27
3.2 Prozessparameter	28
3.2.1 für Nitrifikation und Kohlenstoffabbau	28
3.2.2 für Denitrifikation	28
3.3 Spezifische Umsatzleistungen der relevanten Abwasserinhaltsstoffe	29
3.3.1 Einflussfaktoren für Nitrifikationsrate	29
3.3.1.1 Temperatureinfluss	29
3.3.1.2 Einfluss des C/N-Verhältnisses	30
3.3.1.3 Einfluss der NH ₄ -Konzentration	30
3.3.1.4 Einfluss der O ₂ -Konzentration	30
3.3.2 Einflussfaktoren für Denitrifikationsrate	31
3.3.2.1 Temperatureinfluss	31
3.3.2.2 Einfluss der Konzentration leicht abbaubaren Kohlenstoffs	31
3.4 Bemessungsgrößen für die Nachklärung	32
3.5 Grundlagen zum Vergleich der Leistungsfähigkeit Biofilmverfahren/ Belebtschlammverfahren	32
4. Systematik der Biofilmverfahren	35
4.1 Sessile Biologie auf Trägermaterial	39
4.1.1 Biofilmverfahren ,mit ungeordnet bewegtem Trägermaterial	40
4.1.2 Biofilmverfahren mit fixiertem bzw. geordnet bewegtem Material	44

	Seite	
4.2	Kombinierte Verfahren (sessile und suspendierte Biomasse)	51
4.2.1	suspendiertes Trägermaterial	51
4.2.2	fixiertes Trägermaterial	57
5.	Stand von Wissenschaft und Technik	59
5.1	Pegasus-Verfahrenstechnik	59
5.2	Japanische Pegasus-Erfahrungen	60
5.3	EvU-Verfahrenstechnik	61
5.4	Deutsche EvU-Erfahrungen	62
5.5	Kaldnes-Verfahrenstechnik	63
5.6	Skandinavische Kaldnes-Erfahrungen	68
5.6.1	Nitrifikation	68
5.6.1.1	Organische Schmutzfracht	68
5.6.1.2	Phosphat-Fracht	68
5.6.1.3	Säurekapazität	68
5.6.2	Nitrifikationsgeschwindigkeit	68
5.6.2.1	Temperatur	69
5.6.2.2	Leicht abbaubarer CSB	69
5.6.2.3	O ₂ -Konzentration	69
5.6.2.4	NH ₄ -Konzentration	70
5.6.3	Denitrifikationsgeschwindigkeit	70
5.6.3.1	vorgeschaltete Denitrifikation	71
5.6.3.2	nachgeschaltete Denitrifikation	71
5.6.3.2.1	für CSB/NO ₃ > 3,5	71
5.6.3.2.2	für CSB/NO ₃ < 3,5	72
5.7	Verfahrensschema Festbettverfahren	72
5.8	Deutsche Festbett-Erfahrungen (halbtechnisch/großtechnisch)	75
5.8.1	Für die Bemessung relevante Belastungszahlen	78
5.8.1.1	reiner Kohlenstoffabbau	78
5.8.1.2	Nitrifikation	78
5.8.1.3	Denitrifikation	81
5.8.2	Hinweise zur Anlagenkonfiguration und –ausrüstung	82
5.8.2.1	Belüftung	82
5.8.2.2	Rückspülung	82
5.8.2.3	Überschussschlammproduktion	82
5.8.2.4	Absetzeigenschaften	83

	Seite
6. Versuchsstrategien und –bedingungen	84
6.1 Allgemeines	84
6.2 Pegazur-Versuche	85
6.2.1 Untersuchungsmethodik	85
6.2.2 Versuchsphasen	85
6.2.3 Abwassercharakteristika	88
6.2.3.1 Schwermetallverbindungen	89
6.2.3.2 Anorganische Stoffe	90
6.2.3.3 Randbedingungen für die Versuchsphasen	90
6.2.3.3.1 Temperatur	90
6.2.3.3.2 pH-Wert	90
6.2.3.3.3 Redoxpotential	91
6.2.3.3.4 Sauerstoffkonzentrationen	91
6.3 EvU-Versuche	95
6.3.1 Untersuchungsmethodik	95
6.3.2 Versuchsphasen	95
6.3.3 Abwassercharakteristika	96
6.4 Kaldnes-Versuche	98
6.4.1 Untersuchungsmethodik	98
6.4.2 Versuchsphasen	98
6.4.3 Abwassercharakteristika	99
6.4.4 Randbedingungen für die Versuchsphasen	100
6.4.4.1 Temperatur	100
6.4.4.2 pH-Wert	100
6.4.4.3 Sauerstoffkonzentration	100
7. Versuchsergebnisse	101
7.1 Pegasus-Versuche	101
7.1.1 Versuchsaufbau/-bedingungen	101
7.1.2 Auswertung der Versuchsergebnisse	101
7.1.2.1 Abbau der organischen Schmutzfracht	101
7.1.2.2 Stickstoffelimination	109
7.1.2.2.1 Nitrifikationsvorgänge	109
7.1.2.2.2 Denitrifikationsvorgänge	123
7.1.2.2.3 Schlammeigenschaften	123
7.1.2.2.4 Schlammproduktion	131
7.1.3 Vergleich mit bisherigen Ergebnissen	134
7.2 EvU-Versuche	134
7.2.1 Versuchsaufbau/-bedingungen	134
7.2.2 Auswertung der Versuchsergebnisse	135
7.2.2.1 BSB ₅	135
7.2.2.2 CSB	135

	Seite	
7.2.2.3	Respirationsaktivität	135
7.2.2.4	$N_{\text{ges, anorganisch}}$	138
7.2.2.5	$\text{NH}_4\text{-N}$	140
7.2.2.6	P_{ges}	142
7.2.3	Vergleich mit bisherigen Ergebnissen bei kombinierten Biofilmverfahren	159
7.2.3.1	Biologisch wirksame Oberfläche der Aufwuchskörper	159
7.2.3.2	O_2 -Gehalt in Nitrifikationszone	159
7.2.3.3	C-Abbauleistung	160
7.2.3.4	Nitrifikationsleistung	160
7.2.3.5	Denitrifikationsleistung	160
7.2.3.6	Absetzverhalten	162
7.3	Kaldnes-Versuche	162
7.3.1	Versuchsaufbau/-bedingungen	162
7.3.2	Auswertung der Versuchsergebnisse	163
7.3.2.1	Abbau der organischen Fracht	163
7.3.2.2	Stickstoffelimination	170
7.3.2.2.1	Nitrifikationsvorgänge	170
7.3.2.2.2	Denitrifikationsvorgänge	174
7.3.2.2.3	Schlammeigenschaften	180
7.3.3	Vergleich mit bisherigen Ergebnissen	180
7.3.3.1	Kohlenstoffabbau	180
7.3.3.2	Nitrifikation	180
7.3.3.3	Denitrifikation	189
8.	Vergleich der Leistungsfähigkeit von Biofilmverfahren/ Belebtschlammverfahren	190
9.	Dimensionierungshinweise für einzelne Biofilmverfahren	199
9.1	Sessile Biologie auf Trägermaterial	199
9.2	Kombinierte Verfahren	200
9.3	Beispielbemessung für den Sanierungs-/Erweiterungsfall einer kommunalen Kläranlage	205
10.	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	210
11.	Literaturverzeichnis	218
12.	Anhang	230

		Seite
Tabelle 1	Zusammenstellung der verwendeten Modellparameter	23
Tabelle 2	Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der Biofilmverfahren	37
Tabelle 3	Übersicht über Biofilmverfahren	38
Tabelle 4	Übersicht über Trägermaterialien	39
Tabelle 5	Pegazur – Versuche: Untersuchungsreihen mit jeweiligen Randbedingungen	88
Tabelle 6	Zulaufbeschaffenheit der 1. Pegazur-Untersuchungsperiode	88
Tabelle 7	Zulaufbeschaffenheit der 2. Pegazur-Untersuchungsperiode	89
Tabelle 8	EvU – Versuche: Untersuchungsreihen mit jeweiligen Randbedingungen	96
Tabelle 9	Zulaufbeschaffenheit (24h- und 2h-Proben) (EvU.-Versuchsanlage)	96
Tabelle 10	Mittlere Konzentrationen und Frachten (24h-Mischproben) (EvU-Versuchsanlage)	97
Tabelle 11	Mittlere Zulaufkonzentrationen im Winter- (EvU2) und im Sommerhalbjahr (EvU3)	97
Tabelle 12	Kaldnes – Versuchsphasen	98
Tabelle 13	Zulaufbeschaffenheit der 1. Kaldnes – Untersuchungsperiode	99
Tabelle 14	Zulaufbeschaffenheit der 2. Kaldnes – Untersuchungsperiode	99
Tabelle 15	Zulaufbeschaffenheit der 3. Kaldnes – Untersuchungsperiode	99
Tabelle 16	EvU2 – Versuchsphase: Konzentrationen im Winterhalbjahr	142
Tabelle 17	EvU3 – Versuchsphase: Konzentrationen im Sommerhalbjahr	146
Tabelle 18	Funktionalitäten der Nitrifikationsraten diverser Biofilmverfahren im Vergleich zum Belebtschlammverfahren	193
Tabelle 19	Leistungsparameter diverser Biofilmverfahren im Vergleich zum Belebtschlammverfahren	195
Tabelle 20	Dimensionierungshinweise für Biofilmverfahren	201

	Seite
Tabelle 21 Ergebnisse einer Beispielbemessung für eine KA – Auslegungsgröße von 75.000 EW	207

	Seite
Abb. 1	Biofilmelement 9
Abb. 2	Biofilmstruktur 10
Abb. 3	Verlauf des Biofilmwachstum 12
Abb. 4	Reaktorstruktur 18
Abb. 5	Transportprozesse 19
Abb. 6	TS – Rückhalt 20
Abb. 7	Lufteintrag 21
Abb. 8	Die Geometriefunktion des Biofilmmodells 24
Abb. 9	Systematik von Biofilmverfahren 36
Abb. 10	Darstellung eines KALDNES – Pelletelements 41
Abb. 11	Funktionsprinzip des KALDNES – Schwebebetts 41
Abb. 12	Verfahrenstechnische Möglichkeiten des KALDNES – Verfahrens 42
Abb. 13	Systemskizze einer Scheibentauchkörperanlage 46
Abb. 14	Systemskizze einer Walzenkörperanlage 47
Abb. 15	Zeitabhängige Änderungen der Respirationsraten 52
Abb. 16	Verfahrensschema der Versuchseinheiten P1(Pegasus) und P2 (Referenz) 54
Abb. 17	Prinzipschema EvU – Versuchsanlage 55
Abb. 18	Systemskizze einer LINPOR – CN - Anlage 58
Abb. 19	Der technologische Prozess der Stickstoff-Elimination am Beispiel einer möglichen Verfahrenskombination (KALDNES – Verfahren) 65
Abb. 20	Typische Betriebsbedingungen in verschiedenen Zonen der KALDNES – Kombinationsverfahren zur Stickstoffeliminierung 66
Abb. 21	Verfahrensschema einer getauchten Festbetтанlage ohne Rückspülung 73
Abb. 22	Querschnitt durch eine BIONET – Festbetтанlage 74
Abb. 23	Abbau von CSB und NH ₄ -N in einer mit getauchten Festbettkörper ausgerüsteten Anlage 76
Abb. 24	Verlauf der N-Elimination in einer getauchten Festbetтанlage ohne Rückspülung und ohne gezielte Denitrifikation 77
Abb. 25	NH ₄ -N-Flächenbelastung und -abbauleistung in Abhängigkeit von der Betriebsweise (mit / ohne vorgeschaltete Zwischenklärung ZK) 79
Abb. 26	NH ₄ – Raumabbauleistungen 80
Abb. 27	Denitrifikationsleistung in Abhängigkeit von der NO ₃ Flächenbelastung 81
Abb. 28	Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffgehalt im Reaktor und dem Verhältnis zwischen Sauerstoffbedarf (OA) der Bakterien und der erforderlichen Sauerstoffzufuhr (OC) 83
Abb. 29	Schema der Pilotanlage (Pegazur-Verfahren) 87

	Seite	
Abb. 30	Entwicklung des gelösten Sauerstoffgehaltes und des Redox – Potentials in der Anoxiezone (Pegazur – Versuchsreihe 1)	92
Abb. 30a	Entwicklung des gelösten Sauerstoffgehaltes in der Anoxiezone (Pegazur – Versuchsreihe 1)	93
Abb. 30b	Entwicklung des Redox – Potentials in der Anoxiezone (Pegazur – Versuchsreihe 1)	93
Abb. 31	Entwicklung des gelösten Sauerstoffgehaltes und des Redoxpotentials in der DN Zone (Pegazur – Versuchsreihe 2)	94
Abb. 32(1)	CSB – Raumabbauleistung als lineare Funktion der CSB Raumbelastung (Referenzanlage – Versuchsreihe 1) für $T = 17-25^{\circ}\text{C}$	103
Abb. 32(2)	CSB-Raumabbauleistung als lineare Funktion der CSB-Raumbelastung (Pegazur – Versuchsreihe 1) für $T = 17- 25^{\circ}\text{C}$	103
Abb. 33	CSB – Raumabbauleistung als lineare Funktion der CSB Raumbelastung (Referenz-, Pegazuranlage – Versuchsreihe 1) für $T = 17-25^{\circ}\text{C}$	104
Abb. 34(1)	CSB – Abbau als Funktion der CSB – Raumbelastung (Referenzanlage – Versuchsreihe 2) für $T = 8-13^{\circ}\text{C}$	105
Abb. 34(2)	CSB – Abbau als Funktion der CSB – Raumbelastung (Pegazuranlage – Versuchsreihe 2) für $T = 8 - 13^{\circ}\text{C}$	105
Abb. 35	CSB Abbau als Funktion der CSB-Raumbelastung (Pegazur-, Referenzanlage – Versuchsreihe 2) für $T = 8-13^{\circ}\text{C}$	106
Abb. 36	CSB – Raumabbauleistung als Polynomfunktion 2.Ordnung der CSB Raumbelastung (Pegazuranlage – Versuchsreihe 1) für $T = 17 - 25^{\circ}\text{C}$	107
Abb. 37	CSB – Raumabbauleistung in Abhängigkeit von der CSB – Raumbelastung (Vergleich Pegazur- / Referenzanlage – Versuchsreihe 1) für $T=17 - 25^{\circ}\text{C}$	108
Abb. 38	NH_4 -Raumabbauleistung als lineare Funktion der NH_4 -Raumbelastung (Pegazur – Verfahren – Versuchsreihe 1) für $T = 17 - 25^{\circ}\text{C}$	111
Abb. 39	NH_4 -Raumabbauleistung in Abhängigkeit von NH_4 -Raumbelastungen für beide Versuchsstraßen (Pegazur / Referenz – Versuchsreihe 1)	111
Abb. 40	Nitrifikationsleistung als Funktion der NH_4 -Raumbelastung (Pegazuranlage – Versuchsreihe 2) für $T = 8 - 13^{\circ}\text{C}$	113
Abb. 41	NH_4 -Flächenabbauleistung als lineare Funktion der NH_4 -Flächenbelastung (Pegazuranlage – Versuchsreihe 1) für $T = 17 - 25^{\circ}\text{C}$	116
Abb. 42	Nitrifikationsleistung als Funktion der NH_4 -Flächenbelastung (Pegazuranlage – Versuchsreihe 2) für $T = 8 - 13^{\circ}\text{C}$	117
Abb. 43	Nitrifikationsleistung als Funktion der NH_4 -Flächenbelastung (Pegazuranlage – Versuchsreihe 2) für $T = 8 - 13^{\circ}\text{C}$	118

	Seite
Abb. 44	Nitrifikationsleistung als Funktion der NH_4 -Flächenbelastung (Pegazuranlage – Versuchsreihe 2) für $T = 8\text{-}13^\circ\text{C}$ 118
Abb. 45	Nitrifikationsrate k_{RN} als Funktion der Temperatur 120
Abb. 46	Nitrifikationsrate als Funktion der Temperatur 121
Abb. 47	Auswirkungen einer Stoßbelastung auf CSB- bzw. NH_4 -Abbauverhalten (Pegazur – Versuchsreihe 1) 122
Abb. 48	Verlauf der NO_3 -N Konzentration im Ablauf der Versuchsanlage (Pegazur – Versuchsreihe 1) 124
Abb. 49	NO_3 -Ablaufwerte (Pegazur – Versuchsreihe 2) 125
Abb. 50	Nitrat Ablauf-Konzentration (Pegazur – Versuchsreihe 2) 126
Abb. 51	Verlauf des Redox - Potentials in der Anoxiezone und des Nitrat-Gehaltes im Ablauf der Versuchsanlage (Pegazur – Versuchsreihe 1) 127
Abb. 52(1)	Verlauf des Redox - Potentials in der Anoxiezone der Versuchsanlage (Pegazur – Versuchsreihe 1) 128
Abb. 52(2)	Verlauf des Nitrat-Gehaltes im Ablauf der Versuchsanlage (Pegazur – Versuchsreihe 1) 128
Abb. 53	NO_3 -Ablaufwerte in Abhängigkeit von NH_4 -Raumbelastung (Pegazur – Versuchsreihe 1) 129
Abb. 54	Abhängigkeit zwischen NO_3 -und NH_4 -Ablauf (Pegazur – Versuchsreihe 1) 130
Abb. 55	Entwicklung des Schlammindex ISV (Pegazur – Versuchsreihe 1) 132
Abb. 56	Verlauf des Schlammindex ISV (Pegazur – Versuchsreihe 2) 133
Abb. 57	BSB_5 in der 24-h-Mischprobe 136
Abb. 58	CSB in der 24-h-Mischprobe 137
Abb. 59	N_{ges} , anorg. In der 24-h-Mischprobe 139
Abb. 60	NH_4 -N in der 24-h-Mischprobe 141
Abb. 61	GPO_4 -P in der 24-h-Mischprobe 143
Abb. 62(1)	Ganglinie Zulaufkonzentrationen BSB_5 , CSB und Zulauf (Winterhalbjahr) 144
Abb. 62(2)	Ganglinie Zulaufkonzentrationen GPO_4 -P, N_{ges} , anorg. und Zulauf (Winterhalbjahr) 144
Abb. 63(1)	Ganglinie Zulaufkonzentrationen BSB_5 , CSB und Zulauf (Sommerhalbjahr) 145
Abb. 63(2)	Ganglinie Zulaufkonzentrationen GPO_4 -P, N_{ges} , anorg. und Zulauf (Sommerhalbjahr) 145
Abb. 64	2h-Mischproben BSB_5 147
Abb. 65	Tagesganglinie CSB 148
Abb. 66	Tagesganglinie N_{ges} , anorg. 149
Abb. 67	Tagesganglinie NH_4 -N 150
Abb. 68	Tagesganglinie GPO_4 -P 151
Abb. 69	2h-Mischproben BSB_5 152
Abb. 70	Tagesganglinie CSB 153
Abb. 71	Tagesganglinie N_{ges} , anorg. 154
Abb. 72	Tagesganglinie NH_4 -N 155
Abb. 73	Tagesganglinie GPO_4 -P 156
Abb. 74	Trägermaterialspezifische Nitrifikationsrate in Abhängigkeit von der Zulauf – TKN - Konzentration (EvU – Versuche) 161

	Seite	
Abb. 75	Vereinfachtes Verfahrensschema der KALDNES – Pilotanlage	164
Abb. 76	CSB-Zulauf- und Ablaufganglinien (Kaldnes - Versuchsanlage)	165
Abb. 76(1)	CSB-Zulaufganglinie (Kaldnes – Versuchsanlage)	166
Abb. 76(2)	CSB-Ablaufganglinie (Kaldnes – Versuchsanlage)	166
Abb. 77	CSB-Raumbelastungen (Kaldnes – Versuchsanlage)	168
Abb. 78(1)	CSB-Raumabbauleistung als lineare Funktion der CSB-Raumbelastung (Kaldnes – Versuchsanlage)	169
Abb. 78(2)	CSB-Raumabbauleistung als lineare Funktion der CSB-Raumbelastung (Kaldnes – Versuchsanlage)	169
Abb. 78(3)	CSB-Raumabbauleistung als lineare Funktion der CSB-Raumbelastung (Kaldnes – Versuchsanlage)	169
Abb. 79	NH ₄ -Zulauf- und Ablaufkonzentrationen (Kaldnes – Versuchsanlage)	171
Abb. 79(1)	NH ₄ -Zulaufkonzentrationen (Kaldnes – Versuchsanlage)	172
Abb. 79(2)	NH ₄ -Ablaufkonzentrationen (Kaldnes – Versuchsanlage)	172
Abb. 80	NH ₄ -Raumbelastungen (Kaldnes – Versuchsanlage)	173
Abb. 81(1)	NH ₄ -Raumabbauleistung als lineare Funktion der NH ₄ -Raumbelastung (Kaldnes – Versuchsanlage)	176
Abb. 81(2)	NH ₄ -Raumabbauleistung als lineare Funktion der NH ₄ -Raumbelastung (Kaldnes – Versuchsanlage)	176
Abb. 81(3)	NH ₄ -Raumabbauleistung als lineare Funktion der NH ₄ -Raumbelastung (Kaldnes – Versuchsanlage)	176
Abb. 82	NO ₃ Zulauf- und Ablaufganglinien (Kaldnes – Versuchsanlage)	177
Abb. 83	NO ₃ -Raumbelastungen (Kaldnes – Versuchsanlage)	178
Abb. 84(1)	NO ₃ -Raumabbauleistung als lineare Funktion der NO ₃ -Raumbelastung (Kaldnes – Versuchsanlage)	179
Abb. 84(2)	NO ₃ -Raumabbauleistung als lineare Funktion der NO ₃ -Raumbelastung (Kaldnes – Versuchsanlage)	179
Abb. 84(3)	NO ₃ -Raumabbauleistung als lineare Funktion der NO ₃ -Raumbelastung (Kaldnes – Versuchsanlage)	179
Abb. 85	Abhängigkeit der Nitrifikationsrate von der NH ₄ -Ablaufkonzentration	182
Abb. 86	Abhängigkeit der Nitrifikationsgeschwindigkeit r_N von der NH ₄ -Ablaufkonzentration	183
Abb. 87	Zusammenhang zwischen Nitrifikationsgeschwindigkeit und organischer Belastung beim Kaldnes – Verfahren	185
Abb. 88	Abhängigkeit der Nitrifikationsrate von der O ₂ -Konzentration	187
Abb. 89	Abhängigkeit der NH ₄ -Eliminationsrate von der O ₂ -Konzentration	188
Abb. 90	Verfahrensübersicht der zu vergleichenden Belebungs- und Biofilmsysteme	191

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Aufgrund heutiger erhöhter Reinigungsanforderungen an die Ablaufqualität von Kläranlagen mit weitgehender Nährstoffelimination wird in vielen Einsatzfällen eine signifikante Erweiterung existierender Abwasserbehandlungsanlagen notwendig. Die Elimination der Stickstoffkomponenten durch Nitrifikation und Denitrifikation mit Hilfe des Belebtschlammverfahrens erfordert relativ große Beckenvolumina, was insbesondere bei Erweiterungen und Sanierungen bestehender Kläranlagen zu erheblichen Problemen im Hinblick auf die oftmals stark eingeschränkte, zur Verfügung stehende Fläche und damit eng verknüpfte, relevante Kostensteigerungen führt.

Als Alternative zu diesem Abwasserreinigungsverfahren bieten sich aus Kosten- und Platzgründen Biofilmverfahren an, die bisher als Begriff eine sehr große Palette von unterschiedlichsten Verfahrensmöglichkeiten in Form von reinen Trägerbiologien, diversen Kombinationen mit Belebtschlammbiozönosen oder auch als 3. Reinigungsstufen nachgeschaltete Biofiltrationen zur Restnitrifikation bzw. Restdenitrifikation umfassen.

Bei den aktuellen Einsatzgebieten – insbesondere in der kommunalen Abwasserreinigung – sind zu diesen Verfahren mit ihren äußerst umfangreichen Kombinationen noch keine weitgehenden allgemeingültigen Erfahrungen vorhanden, obwohl sie vom Grundprinzip her eigentlich zu den ältesten Reinigungsmethoden für die Elimination der organischen Inhaltstoffe zählen.

Aufgrund fehlender verbindlicher Dimensionierungsrichtlinien können die meisten Biofilmverfahren noch nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik zugeordnet werden. Vor allem relevante Bemessungs- und Betriebsparameter, die für die im Blickpunkt stehenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von besonderem Interesse sind, müssen noch in ausreichendem Maße entwickelt und verifiziert werden.

Aus den bis zum heutigen Zeitpunkt veröffentlichten Untersuchungen und Erfahrungen zu den einzelnen Biofilmmodifikationen können zwar etliche Vorteile abgeleitet werden. Hierzu zählen insbesondere das Erreichen hoher Bakterienkonzentrationen ohne eine Abhängigkeit von der Verweilzeit, die Möglichkeit kleinerer Reaktorvolumina infolge hoher spezifischer Oberflächen, eine relativ große Betriebsstabilität. Demgegenüber stehen aber auch einige signifikante Nachteile bzw. Problemstellungen wie z.B. der große Einfluss der Vorreinigung; keine gesicherte Kopplung zwischen Nitrifikation und dem vom C-Angebot abhängigen Schlammalter, vielmehr eine Abhängigkeit von etlichen relevanten Betriebsparametern; die Verringerung der Nitrifikationsleistung bei erhöhten organischen Kohlenstoffgehalten.

1.2 Erkenntnisstand

Aus vielen Wissenschaftszweigen liegen zumeist detaillierte Kenntnisse über Biofilme und ihre Anwendungspotentiale in unterschiedlichen technischen Bereichen vor. So stellen sie beispielsweise in der Lebensmittelverarbeitung und in der Arzneimittelherstellung wichtige Prozessschritte bei der Entstehung von produktspezifischen Ausgangssubstanzen dar. Weiterhin sind z.B. in der Trinkwasserversorgung diverse Phänomene in den Rohrleitungen aufgrund der Entwicklung von Biofilmen bekannt.

Für Abwasserreinigungszwecke sowohl im industriellen als auch im kommunalen Einsatzbereich existieren bereits seit Jahrzehnten Erfahrungen mit Trägerbiologien, bei deren Einsatz die Vorteile sessiler Biomasse, speziell die Verhinderung des Bakterienaustrags und somit die Ansiedlung von Spezialisten mit langen Generationszeiten, optimal genutzt werden können. Mit diesem Effekt lässt sich auch bei sehr ungünstigen Abwasserhältnissen eine weitergehende biologische Reinigung durchführen. Der Biofilm ermöglicht eine größere Aktivität der Biozönose und eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Belastungsspitzen und toxischen Einflüssen. Diese Verfahrensvorteile werden einerseits in der kommunalen Abwassertechnik bei der Stickstoffelimination, andererseits in Form von aeroben oder anaeroben Biofilm-Systemen zur Reinigung hochbelasteter Industrieabwässer zur Anwendung gebracht (Schulz-Menningmann, 1991; Ödegaard/Rusten, 1989).

Veröffentlichungen früherer Jahre aus dem deutschsprachigen Raum zum Einsatzpotential der Biofilmverfahren im kommunalen Sektor beziehen sich in erster Linie auf Tropfkörpersysteme (z.B. Wolf, GH Fulda) für Nitrifikationszwecke, auf Festbettreaktoren (z.B. Sekoulov, TU Hamburg, 11/1988; Wolf, TU München, 1989 und 7/1991), Biofiltrationen in Form von nachgeschalteten Reinigungsstufen (z.B. Boller, 1988; Richard und Faup, 1982) sowie einzelne Varianten von Schwebebettverfahren (z.B. Harremoes, 1982).

Erste umfassendere Übersichten zur Thematik der Biofilmmutzung bei der weitergehenden Nährstoffelimination und dessen Vergleichsmöglichkeiten mit anderen Reinigungsverfahren, insbesondere dem Belebtschlammverfahren, sind den Publikationen von Kroiss, TU Wien, 4/94; Tschui, EAWAG Zürich, 11/93; Pöpel, TU Darmstadt, 11/94, 11/95, 5/96, 4/94, 1/96, 10/98; Schlegel, 8/95 und 1/96; Seyfried/ Rosenwinkel, TU Hannover, 1998; Seyfried, TU Hannover, 11/96; ATV-Arbeitsgruppe 2.6.3, 11/96; Wilderer, TU München, 1997; Bulle/Franz, 8/94; ATV-Seminar Dresden 11/94; IAWQ-Konferenz Kopenhagen 8/96 zu entnehmen.

In diesen Verfahrensvergleichen wurde in erster Linie versucht, die Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten näher zu betrachten sowie die Leistungsfähigkeit der Biofilmsysteme dem Reinigungspotential der Belebtschlamm-Biozönose gegenüberzustellen. Infolge der Vielfalt der jeweils infrage kommenden Verfahrensmodifikationen war es schwierig einheitliche Leistungsparameter zu definieren, insbesondere vor dem Hintergrund von reinen Trägerbiologien und mit Belebtschlamm kombinierten Biofilmsystemen. Des Weiteren sind die bisher weltweit veröffentlichten Untersuchungsergebnisse von etlichen über den Globus verteilten Forschungseinrichtungen bei äußerst unterschiedlichen Randbedingungen zustande gekommen und somit nur sehr schwierig zu interpretieren. Oftmals existieren stark differierende Bemessungsvorschläge und Leistungsdaten, was einen adäquaten Verfahrensvergleich eher erschwert.

Aus der relativ großen Palette der Biofilmverfahren erscheinen nach aktuellem Kenntnisstand vornehmlich für eine weitergehende Nährstoffelimination innerhalb der biologischen Stufe am geeignetsten:

- Festbettreaktoren als reine Trägerbiologien
- Schwebebettreaktoren als reine Trägerbiologien
- Schwebebettreaktoren in Kombination mit Belebtschlammbiozönose

Zu diesen auch aus wirtschaftlichen Aspekten verfolgungswerten Schwerpunkten gibt es zur Zeit eine nur recht geringe Anzahl von verwertbarem, allgemeingültigem Untersuchungsmaterial. Häufig ist der Transfer auf bundesdeutsche Reinigungsanforderungen und Zielvorstellungen aus betrieblicher und wirtschaftlicher Hinsicht schwierig. Weiterhin sind die Ergebnisse oftmals eingeschränkt auf spezielles, sorgsam gehütetes firmenspezifisches Know-how, was die Verwendbarkeit derlei Wissens für andersgelagerte Einsatzfälle nicht erleichtert.

Zu der Thematik der o.g. Festbettreaktoren können einige bundesdeutsche Veröffentlichungen signifikante Aussagen hinsichtlich Leistungsparametern und detaillierten Dimensionierungsangaben beitragen, wie z.B. Seyfried / Rosenwinkel, 1998; Schlegel, 10/97, 1988 und 1995; ATV-Handbuch 1997; ATV-Arbeitsgruppe 6.3, 1996 und 1995; Pape, 1995 und 1995; Ryhiner et al, 1992 und 1993; Schulz-Menningmann, 1991 und 1993; Danzig/Kümmel, 1/94; Vogelpohl, TU Clausthal-Zellerfeld, 2/93 und 11/90; Dorias, TU Stuttgart, 1994.

Zum Einsatzpotential der Schwebebettverfahren als reine Trägerbiologien sind in erster Linie Publikationen aus Skandinavien heranzuziehen (Ödegaard et al, Universität Trondheim, 1993, 1995 etc.).

Zu Einsatzmöglichkeiten der Schwebebettverfahren in Kombination mit einer Belebtschlammbiozönose kann fast ausschließlich auf japanische Erfahrungen zurückgegriffen werden (Takeshima, Aoki et al, Universität Tokio, 1997 etc.). Lediglich für kleinere Auslegungsgrößen im ländlichen Raum bei Trennsystembedingungen existieren bisher bundesdeutsche Erfahrungen aus Sachsen, basierend auf Forschungen der TU Dresden (Peukert, 1995). Für sauerstoffbegaste Kombinationen aus Belebtschlamm und Schwebebett gibt es ebenfalls in Deutschland einige Erkenntnisse aus den letzten Jahren (Morper, 1999).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zwar Aussagen über diverse Biofilmsysteme und ihre Leistungsfähigkeit in größerem Umfang vorliegen, diese jedoch häufig sehr projektspezifisch geprägt sind. Hier zeigt sich eine erhebliche Unsicherheit bei der Interpretation der Veröffentlichungen und daraus resultierend ein weitergehender Forschungsbedarf. Aus diesem Grunde ist eine sorgfältige Analyse der vorhandenen Ergebnisse erforderlich, so dass darauf aufbauend weiterführende Versuche mit Pilotanlagen die noch latenten Problemstellungen und Fragenkomplexe näher beleuchten und zu weiteren anwenderorientierten Erkenntnissen über die Leistungsfähigkeit der Biofilmverfahren und deren Einsatzmöglichkeiten führen können.

Insbesondere folgende Fragenkomplexe sind zur Zeit noch nicht in ausreichender Aussagegenauigkeit untersucht worden:

- der Umfang der Überschussschlammproduktion

- die Abhängigkeit der Stickstoffeliminationsvorgänge von den Abwassertemperaturen und den CSB- sowie NH_4 -Zulaufkonzentrationen
- der Energieverbrauch für Belüftung, Durchmischung und Rückspülung
- Einflussgrößen auf die Biofilmdiffusionsvorgänge
- Auswirkungen von Stoßbelastungen
- Optimierung des Einfahrbetriebs

1.3 Untersuchungsansatz, Zielsetzung und Vorgehensweise

Um die in Kapitel 1.1 und 1.2 aufgezeigten Problemfelder und bisherigen Erfahrungen kritisch hinterfragen zu können, sind die mikrobiologischen Grundlagen der Biofilmverfahren sowie ihre Zusammenhänge mit den bekannten und den noch zu erforschenden Phänomenen bei der Abwasserbehandlung herauszuarbeiten (Kapitel 2).

Diese theoretischen Hintergründe und Modellansätze sind für die Planungspraxis nur bedingt hilfreich, so dass deren Umsetzung in Bemessungsgrößen und Leistungsparameter von großer Bedeutung ist. In Kapitel 3 werden die relevanten Dimensionierungsgrundlagen im Detail dargelegt, die in den weiteren Abschnitten dieser Arbeit zur Beurteilung der einzelnen Verfahren herangezogen werden.

Für die Vielzahl der weltweit mit unterschiedlichen Zielsetzungen und stark differierendem Detailliertheitsgrad untersuchten Biofilmsysteme, die in den vorliegenden Veröffentlichungen sehr häufig in deutlich voneinander abweichender Form kategorisiert werden, wird eine einheitliche Systematik gebildet. Somit ist es möglich, grundsätzlich die einzelnen Verfahrensmodifikationen den beiden Hauptgruppen „sessile Biologie auf Trägermaterial“ und „kombinierte Verfahren“ (sessile und suspendierte Biomasse) zuzuordnen (Kap. 4). Dies erleichtert insbesondere Leistungsvergleiche und die Bildung von verfahrensspezifischen Dimensionierungsansätzen.

Schwebebettverfahren wurden vor allem in Skandinavien und Japan bereits großtechnisch - auch im kommunalen Sektor – eingesetzt. Da es sich hierbei in aller Regel aus Witterungs-, teilweise auch aus städtebaulichen/architektonischen Gründen um eingehauste Lösungen handelt, konnten sehr kompakte Anlagen errichtet werden. Allerdings galten in diesen konkreten Fällen spezielle Randbedingungen (z.B. sehr niedrige Temperaturen, geringe Kohlenstoffgehalte im Zulauf), die einen Transfer auf deutsche kommunale Reinigungsanforderungen bei Mischsystembedingungen in starkem Maße erschweren, wenn nicht sogar unmöglich machen. In Kapitel 5 werden die bisher vorhandenen Ergebnisse zum Pegasus-Verfahren aus Japan, zum EvU-Verfahren aus Deutschland, zum Kaldnes-Verfahren aus Skandinavien sowie zum Festbettverfahren aus Deutschland näher analysiert und dargestellt.

Daran anknüpfend erfolgt in Kapitel 6 die Darstellung der Versuchsstrategien und des Aufbaues der jeweiligen Pilotanlagen auf saarländischen Klärwerken, bei der die jeweils relevanten Versuchseinstellungen und -bedingungen wiedergegeben werden. Auf der Basis der einzelnen im Kapitel 7 erläuterten Untersuchungsergebnisse sind für die Biofilmsysteme Aussagen zum Leistungspotential bei Zulaufkonstellationen und Reinigungsanforderungen möglich, die für die kommunale Abwasserbehandlung in Deutschland typisch sind. Analog Abschnitt 7.1 (Pegasus-Verfahren) wird die gleiche Aufgabenstellung in Kapitel 7.2 für das EvU-Verfahren als zweite kombinierte Biofilmmethode im einzelnen untersucht und anhand von Versuchsauswertungen der eingesetzten Pilot- und halbtechnischen Anlagen werden hieraus ableitbare Abhängigkeiten der Eliminationsleistungen dargestellt.

Kapitel 7.3 widmet sich der Hauptgruppe der Schwebebettverfahren in Form von reinen Trägerbiologien, bei der insbesondere das KALDNES-Verfahren aus Skandinavien im Vordergrund steht. Aus den Versuchserfahrungen werden für Planung und Betrieb relevante Leistungskennwerte herausgefiltert und auf dieser Basis detaillierte Dimensionierungshinweise entwickelt.

Die in den vorangegangenen Kapiteln zusammengetragenen Erkenntnisse zu den Hauptgruppen der Biofilmverfahren werden im Kapitel 8 den bereits seit Jahrzehnten in einem bedeutend größeren Umfang erforschten Leistungsdaten und Bemessungsparametern des Belebtschlammverfahrens gegenübergestellt. Als Grundlage des angestrebten Vergleichs der Leistungsfähigkeit der vom Grundprinzip erheblich differierenden Abwasserbehandlungstechnologien werden die generellen verfahrensspezifischen Vor- und Nachteile herausgearbeitet und kommentiert. Daran anknüpfend werden die einzelnen Eliminationsraten der signifikanten Verschmutzungsparameter CSB, N_{ges} und P_{ges} , die mit den Abbauraten zum Teil eng verbundenen O_2 -Bedarfmengen sowie die ebenfalls vom eingesetzten Reinigungsverfahren geprägten Schlammeigenschaften und -mengen in Relation zueinander gesetzt.

Im Kapitel 9 werden für einzelne Biofilmsysteme an einer aktuellen Sanierungs- und Erweiterungsplanung im kommunalen Bereich (75.000 EW), die seitens der Beckenkonfiguration der biologischen Stufe für den Einsatz spezieller Festbetteinbauten oder Schwebebettmaterialien bei relativ geringem baulichem Sanierungsaufwand in besonderem Maße geeignet erscheint, Dimensionierungsbeispiele durchgerechnet. Die hieraus resultierenden Volumina und Schlammengen werden gegenübergestellt, so dass die sowohl Investitions- als auch Betriebskosten verursachenden Bemessungsgrößen klar zu erkennen sind.

Des Weiteren werden planungs- und betriebsführungsrelevante Empfehlungen ausgesprochen, die bei konkreten Einsatzfällen zu einer Optimierung der Kläranlagengestaltung führen können.

Im Anhang wird anhand von detaillierten Untersuchungsergebnissen verdeutlicht, wie die im Hauptteil dargestellten bzw. berechneten Eliminationsraten und Abbaugeschwindigkeiten, Flächen- und Raumbelastungen zustande gekommen sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in den nachfolgenden Kapiteln die o.g. Problematik im Detail behandelt wird, um **als Zielsetzungen**

- die weltweit existierenden Ergebnisse diverser Untersuchungen zu den einsetzbaren Biofilmverfahren gegenüberzustellen
- die hieraus ableitbaren Erkenntnisse zu den potentiellen Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die biologischen Abbau- und Umwandlungsprozesse im komplexen System „Biofilm-Kläranlage“ sowie auf Leistungskennwerten basierende Bemessungshinweise insbesondere für die verfahrenstechnisch interessantesten Sanierungs- bzw. Erweiterungsplanungen darzustellen
- Versuchseinstellungen und -ziele für halbtechnische Pilotanlagen aufgrund deutscher Reinigungs- und Überwachungsforderungen herzuleiten
- aus den durchgeführten Versuchsreihen Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit der Biofilmverfahren und deren Einsatzmöglichkeiten zu gewinnen
- Leistungsvergleiche von Biofilmverfahren vor allem im Hinblick auf Kohlenstoffabbau, Nitrifikation und Denitrifikation mit den herkömmlichen, bewährten Varianten des konventionellen Belebtschlammverfahrens, das in der Fachwelt bereits

äußerst intensiv in Hinsicht auf sein Leistungsspektrum im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung analysiert wurde, durchführen zu können.

An vielen über den Globus verteilten Forschungseinrichtungen wurden in den letzten Jahren zeitgleich Untersuchungen unter äußerst unterschiedlichen Randbedingungen zu den diversen Verfahrensvarianten durchgeführt. Auf der Basis dieser Erkenntnisse und eigener Versuchsergebnisse zu einigen untersuchenswerten Verfahrensmodifikationen wird im folgenden versucht, das Einsatzpotential und die Leistungsfähigkeit der Biofilmverfahren näher zu untersuchen und ihren Stellenwert innerhalb der Vielzahl möglicher Abwasserreinigungsverfahren deutlich zu kennzeichnen (Kapitel 10).

2. Mikrobiologische Grundlagen der Biofilmverfahren

Biofilme stellen für den Einsatzzweck der Abwasserreinigung im kommunalen Bereich eine besondere Lebensform von Mikroorganismen dar, die als mikrobielle Aggregate unterschiedlichster Art vorkommen. Die Biofilmbestandteile können sich in Form einer "Filmschicht" an Grenzflächen akkumulieren, dort wachsen und sich in sogenannten EPS (extrazelluläre polymere Substanzen) einbetten, die eine zentrale Rolle für die Besonderheit dieser mikrobiellen Lebensform spielen.

2.1 Biofilmstruktur und -aufbau

Beim Aufbau von Biofilmen sind grundsätzlich **4 Bereiche** zu unterscheiden (siehe Abb.1):

a) **Substratum** : Trägermaterial bzw. Aufwuchsfläche des Biofilms

b) **Biofilmkompartiment** : kann unterteilt werden in

- Basis-Biofilm : → mit hoher Dichte, kompaktem Aufbau, nicht frei durchfließbar
→ steht in Kontakt zur Trägeroberfläche
- Oberflächenbiofilm: → mit zotteliger oder fädiger Ausbildung, Zwischenräume frei durchfließbar,
→ steht in einer Wechselwirkung zum flüssigen Medium und repräsentiert die Biofilmrauigkeit

Je nach Milieubedingungen können unterschiedliche Anteile der beiden Kompartimentarten festgestellt werden.

Das Biofilmkompartiment lässt sich in zwei Phasen unterteilen:

b₁) Wasserphase: zwischen Zellen und partikulären Substanzen des Biofilms

b₂) Feststoffphasen: partikuläre Substanzen des Biofilms (z.B. Mikroorganismen, Zerfallsprodukte)

c) **Wasserkompartiment** : umgibt den Biofilm, beinhaltet die laminare Grenzschicht und die turbulente Wasserschicht (zu reinigendes Wasser)

d) **Gaskompartiment** : an Wasserkompartiment anschließend oder darin verteilt

Die normale Schichtdicke beträgt 50-150 µm, bei deren Überschreitung an der Basis anaerobe Zustände als Folge von Zehrung und Diffusionswiderständen festzustellen sind.

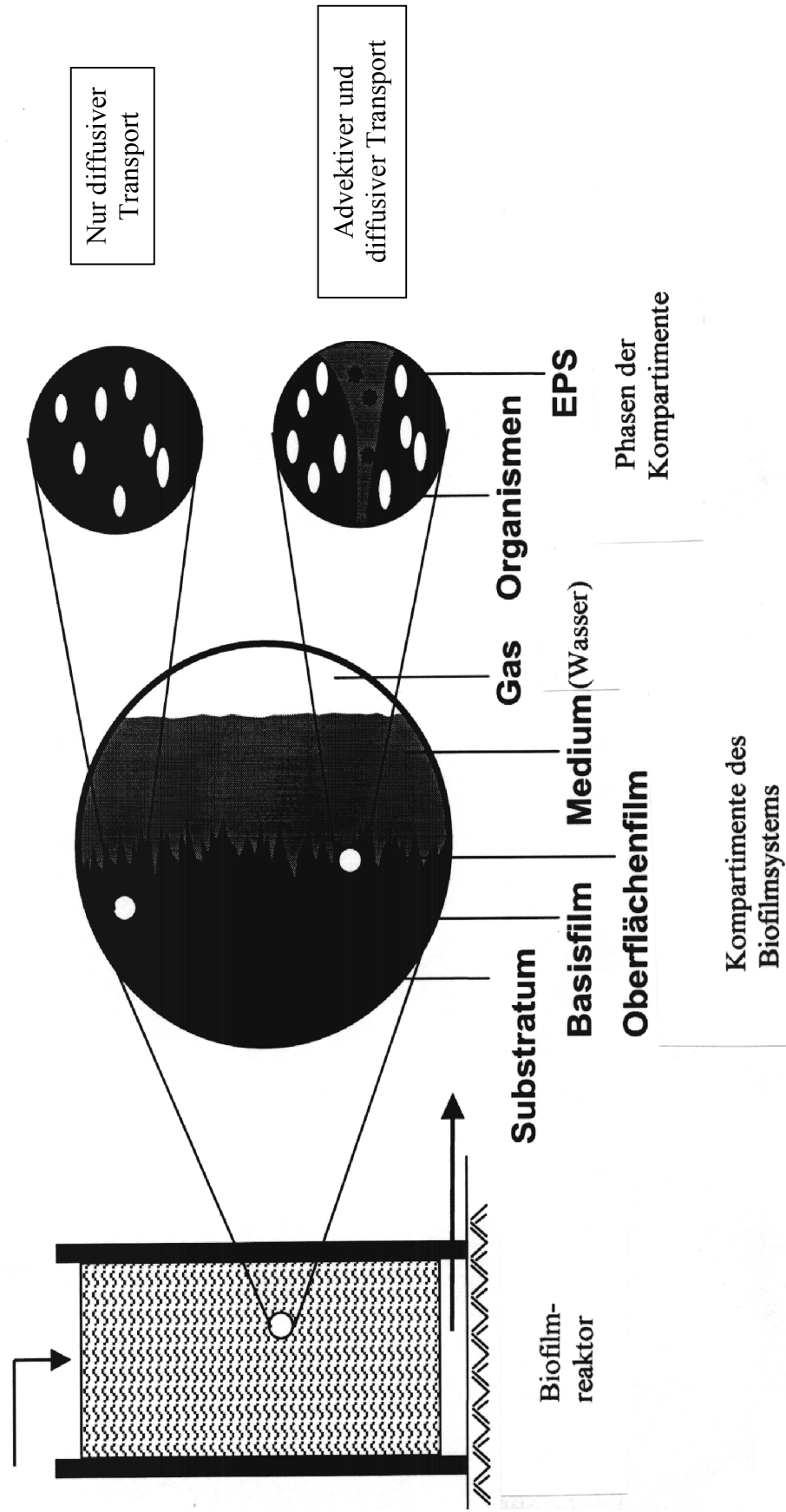
Die **Biofilmstruktur** kann **mit folgenden Effekten** beschrieben werden:

- es existiert ein heterogenes Aufwuchsmuster infolge inhomogener Strömungen und einer Durchmischung der Wasserphase;
- der Biofilm zeigt multidimensionale, dünenähnliche Strukturen, die von Geometrieänderungen des Aufwuchsmaterials oder der Änderung der hydrodynamischen Bedingungen abhängen;
- infolge der Heterogenität entsteht kein einheitlicher Gradient der O₂-Konzentration und

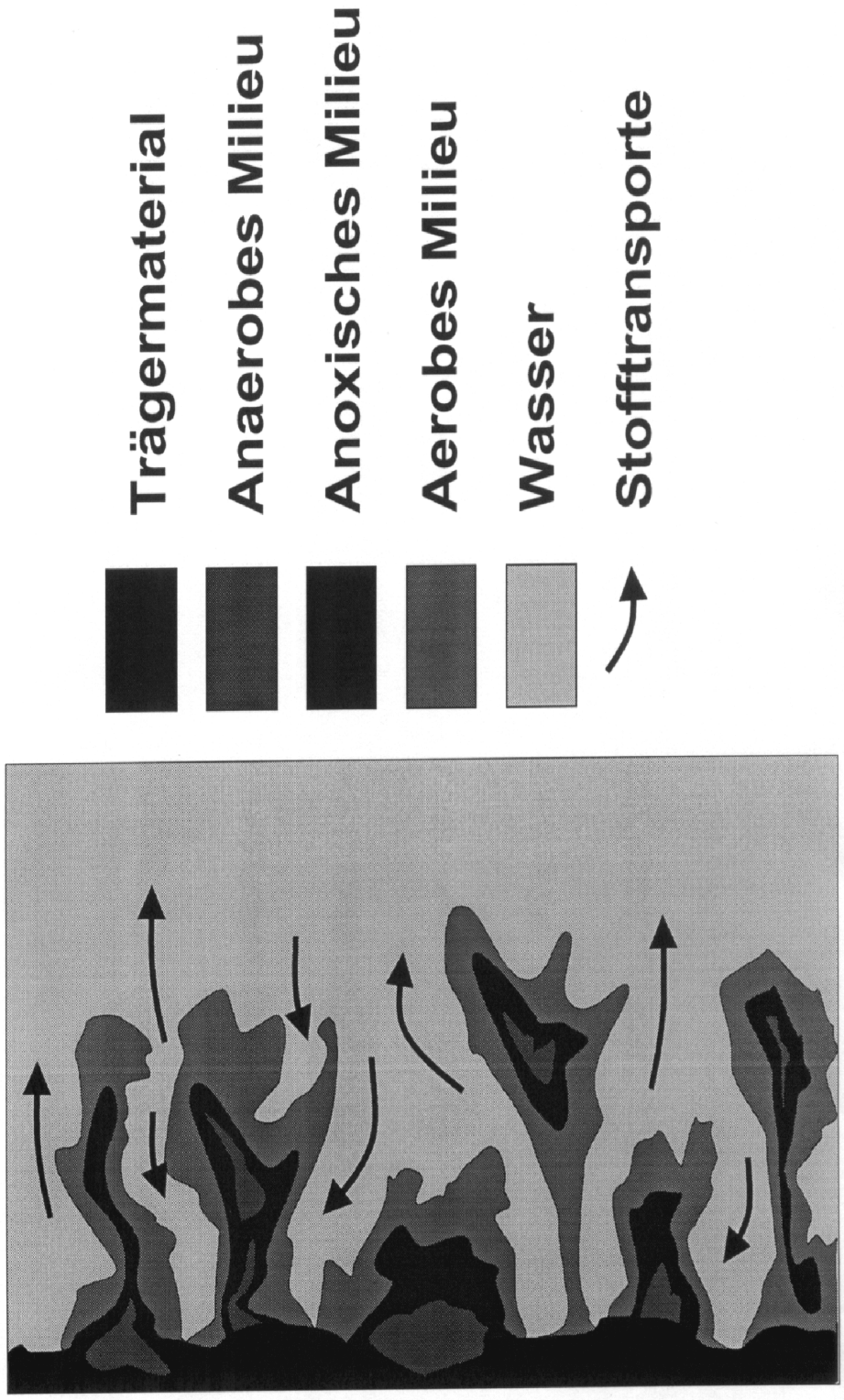
anderer Substanzen (Elektronenakzeptoren, Substrate, Stoffwechselprodukte, gelöste Salze oder Biozide);

- es entstehen Bereiche verschiedener Stoffwechselaktivitäten, was sich in der gesamten Filmdicke und nicht nur in der obersten Schicht abspielt (siehe Abb.2);
- es ist eine zeitliche Heterogenität zu beobachten, die sich in Zunahmen der Rauigkeit, der Dichte und der Zellanzahl pro Volumeneinheit in Abhängigkeit von der Zeitachse niederschlägt;
- mit dem Parameter “Biofilmdichte” ($\text{TS}/\text{m}^2 \cdot \text{m}$) lässt sich der Biofilmaufbau quantifizieren, wobei die Dichte von der Oberfläche zur Aufwuchsfläche hin wegen der Mineralisierung in der Tiefe zunimmt. An der Grenzfläche ist insbesondere wegen des Vorhandenseins filamentöser Mikroorganismen die Biofilmdichte niedrig; Eine zunehmende Dichte ist bei integrierten Partikeln, höherer Nährstoffzufuhr oder unter Einwirkung stärkerer Scherkräfte festzustellen.

Biofilmelement



Biofilmstruktur



Quelle: Rolfs, Modellierung von Biofilmanlagen, 30. ETG, Aachen 1997, GWA-Band 158.

Abb. 2: Biofilmstruktur

2.2 Entwicklung von Biofilmen

An der Entwicklung der heterogenen Biofilmsysteme sind generell **3 Phasen** beteiligt:

- a) das **Medium** (Abwasser) mit den Einflussparametern Temperatur, pH-Wert, gelöste organische und anorganische Substanzen, Oberflächenspannung, Viskosität sowie hydrodynamische Faktoren (Scherkräfte, Druck)
- b) das **Trägermaterial** (Substratum) mit den Einflussparametern chemische Zusammensetzung, Hydrophobizität, Oberflächenenergie, -ladung, "biologische Affinität" (Besiedelbarkeit), Rauigkeit, Porosität
- c) die **Mikroorganismen**, die im Biofilm besser gegen Biozide geschützt sind;
Zunächst sind sie partikulär dispergiert, zum späteren Zeitpunkt bilden sie eine Gelphase. Nachstehende Einflussparameter sind von Bedeutung: Spezies, Zellzahl, Ernährungszustand, Hydrophobizität, Oberflächenenergie, -ladung, EPS, Wachstumsphase. Die Mikroorganismen sind in eine organische Matrix eingeschlossen und immobilisiert, die in überwiegendem Maße aus EPS besteht (60-98%/TS des Biofilms). Zusätzlich können abiotisch wirkende partikuläre Materialien eingelagert werden, die je nach Medium- und Trägermaterialbeschaffenheit die Biofilmzusammensetzung verändern können. Des Weiteren sind noch in der Biomasse sorbierte Stoffe zu finden.

2.2.1 Entwicklungsstadien

Trotz der Komplexität der unterschiedlichen Wechselwirkungen lassen sich in der Entwicklung eines Biofilms generell **3 verschiedene Prozessstadien** erkennen und in

- Induktionsphase
- Wachstumsphase
- Plateauphase

unterteilen (siehe Abb.3).

Die erstgenannte **Induktionsphase** ist von erheblicher Bedeutung in Bezug auf die Stimulation des Biofilmwachstums, wobei **2 Phasenbereiche** erkennbar sind.

- a) der **conditioning film** (bestehend aus Ionen und organischen Molekülen)

Diese Anfangsphase bewirkt eine beträchtliche Änderung der Oberflächeneigenschaften, die sich in einer Herabsetzung der kritischen Oberflächenspannung und einer leicht negativen Gesamtladung widerspiegelt. In diesem Phasenstadium zeigt sich noch kein erkennbarer Effekt auf die Betriebsparameter.

- b) die **Primäradhäsion** von Mikroorganismen

Als Haupttransportmechanismus ist die Konvektion durch Turbulenzvorgänge anzusehen, so dass die Mikroorganismen bis zur laminaren Grenzschicht gelangen.