EINSATZMÖGLICHKEITEN UND GROSSTECHNISCHE ERFAHRUNGEN MIT DER BIOFILTRATION ZUR N- UND P-ENTFERNUNG

Dr.- Ing. Andreas Strohmeier

1.0 VORBEMERKUNGEN

In der weitergehenden Abwasserreinigung nimmt die Filtration derzeit einen besonderen Stellenwert ein.

Im Falle der Sicherstellung von sehr niedrigen CSB-, AFS- und P-Ablaufkonzentrationen ist die klassische Filtration als bewährtes und leistungsfähiges Verfahren bekannt.

Ergibt sich allerdings eine Erweiterung des Ablaufanforderungsprofils im Hinblick auf sehr niedrige NH_4-N oder gar $N_{anorg.}$-Konzentrationen, so kann die biologische Filtration mit der Kombination von chemisch/physikalischen und mikrobiellen Prozessen als wirkungsvolles multifunktionales Restreinigungssystem eingesetzt werden.

Biologische Filter können aber auch gezielt als Festbettreaktoren zur Kohlenstoffoxidation, Nitrifikation oder Denitrifikation eingesetzt werden. Durch die Fixierung von sessilen Mikroorganismen auf dem Filtermaterial ergibt sich eine Aufkonzentration der Biomasse, die eine deutlich höhere volumenspezifische Umsatzrate ermöglicht als Verfahren mit suspendierter Wachstumsform. Dieser besondere Vorteil einer solchen Technologie gewinnt noch an Bedeutung, wenn neben den gewünschten biologischen Prozessen simultan eine kontrollierbare Suspensaentnahme möglich ist. Dies bedeutet beispielsweise, daß der erforderliche Volumen- und Flächenbedarf von weitergehenden Abwasserreinigungskonzepten durch den Einsatz von biologischen Filtrationssystemen erheblich verringert und optimiert werden kann.

Dieser Aspekt ist insbesondere bei der Suche nach geeigneten Lösungen für Abwasserreinigungskonzepte von großen Städten von erhöhter Bedeutung. Der hohe Flächen- und Volumenbedarf beim Ausbau zur Nitrifikation und Denitrifikation stellt vor allen Dingen in dicht besiedelten Gebieten vielfach ein großes Problem dar. Aus diesem Grund wird z. B. die Stadt Paris die Kläranlage Achères mit 2.100.000 m^3/d Abwasser ihre

Erweiterung in Form einer Biofiltration durchführen. Die Kläranlage Colombes im Nordwesten von Paris mit einer Anschlußgröße von 240.000 m^3/d wird derzeit ebenfalls ausschließlich mit Biofiltern neu erstellt.

2.0 *VERFAHRENSERLÄUTERUNG DER BIOLOGISCHEN ABWASSERFILTRATION*

Biofilter sind 3 - Phasen Reaktorsysteme mit einer

- festen Phase, d. h. mit dem Filtermaterial und dem biologischen Bewuchs,
- einer flüssigen Phase, d. h. mit dem Abwasserstrom, der mit dem Biofilm auf dem Trägermaterial in Verbindung tritt und
- einer gasförmigen Phase, d. h. mit dem Sauerstoff zur Sicherstellung der oxidativen Vorgänge oder der aus der Denitrifikation resultierende gasförmige Stickstoff.

Aufgrund dieser komplexen Prozeßbedingungen ist eine mathematische Modellierung zur praxisrelevanten Quantifizierung der Leistungsfähigkeit von Biofiltersystemen äußerst schwierig.

In der Praxis werden bereits seit Jahren weltweit Biofilter eingesetzt, die im Gleichstrom und im Gegenstrom betrieben werden. (siehe Abbildung 1)

Die bisherigen praktischen Betriebserfahrungen zeigen, daß das Gleichstromprinzip von flüssiger und gasförmiger Phase, so wie es im biologischen Aufstromfilter verwirklicht ist, dem Gegenstromverfahren verfahrenstechnisch und betrieblich überlegen ist.

Im aeroben Betriebsfall ist beim Gleichstrom der Sauerstoffpartialdruck in der Gasphase in den Filterzonen größter Sauerstoffzehrung höher als beim Gegenstrombetrieb. Darüber hinaus kann die Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen im Flüssigkeitsfilm, infolge der verbesserten Nachlieferung aus der Gasphase wesentlich kleiner gehalten werden.

Bei der Denitrifikation kann im Aufstrombetrieb der gasförmige Stickstoff mit dem behandelten Abwasser sofort simultan aus dem Filtersystem ausgetragen werden. Dies ist im Gegenstrombetrieb nicht möglich. Es kommt in der Regel zu unkontrollierbaren Gastaschen im Filterbett, die die Leis-

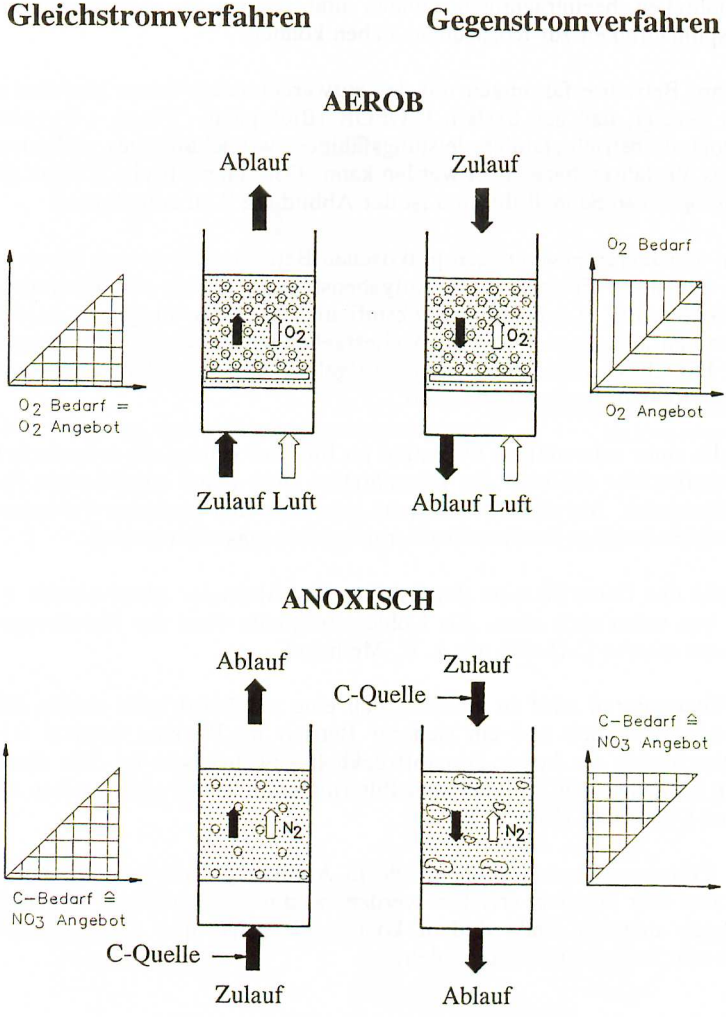

Abb. 1: Verfahrensvergleich der Biofiltration von Gleichstrom- und Gegenstrombetrieb

tungsfähigkeit beeinträchtigen können und auch eine unwirtschaftliche Rückspülhäufigkeit zur Konsequenz haben können.

10 Jahre Betriebserfahrungen mit der aufwärtsdurchströmten Biofiltration haben gezeigt, daß das System BIOFOR (Biological - Fixed - Oxygen - Reactor) als betriebsstabiles, leistungsfähiges, wirtschaftliches und zuverlässiges Verfahren bezeichnet werden kann. Der schematische Aufbau dieser biologischen Schnellfiltration ist der Abbildung 2 zu entnehmen.

Die in den Jahren gewonnenen praktischen Betriebserfahrungen haben gezeigt, daß diese Filter je nach Aufgabenstellung gezielt zur Elimination von Kohlenstoff, Ammonium, Stickstoff und Phosphor eingesetzt werden können. Parallel dazu findet ein weitestgehender Rückhalt der Feststoffe statt. Für diese unterschiedlichen Aufgaben hat sich der aufstrombetriebene Reaktor besonders bewährt.

Im Falle einer notwendigen Oxidation im Biofilter erfolgt die erforderliche Sauerstoffzufuhr oberhalb des Düsenbodens über einen sogenannten Prozeßluftverteiler. Auf diese Weise kann eine über den gesamten Filterquerschnitt gleichmäßige Sauerstoffversorgung sichergestellt werden.

Im Falle der Denitrifikation durchströmt das Abwasser gleichverteilt das Filter von unten nach oben. Als Kohlenstoffquelle dient das Rohabwasser oder eine externe C-Quelle wie z. B. Methanol.

Das Filtermaterial wird so gewählt, daß eine möglichst hohe sessile Biomassenkonzentration und ein sicherer Betrieb im Reaktor erreicht wird und gleichzeitig ein hoher Feststoffrückhalt gewährleistet ist. Für diesen Zweck besonders gut geeignet sind Filtermaterialien mit einer rauhen und porösen Oberfläche (BIOLITE).

Diese Filtrationssysteme können, wie in Abbildung 3 dargestellt, modulweise und sehr kompakt errichtet werden, wodurch erhebliche Flächeneinsparungen möglich sind. Zudem können Geruchs- und Geräuschemissionen sehr leicht minimiert werden.

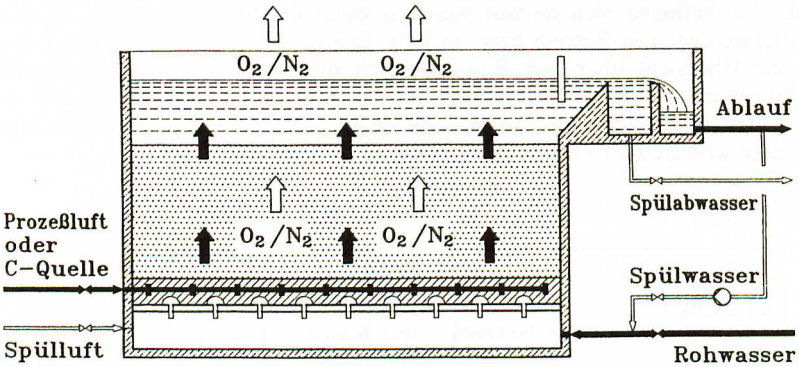

Abb. 2: Funktionsschema der biologischen Aufstromfiltration System Biofor

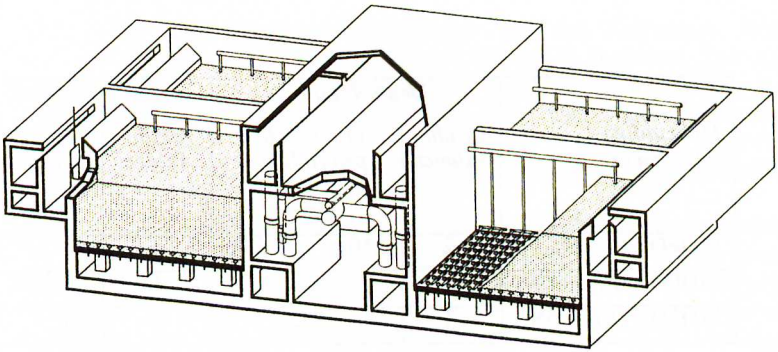

Abb. 3: Ansicht der biologischen Aufstromfiltration System Biofor

3.0 *EINSATZMÖGLICHKEITEN*

In der Funktion der biologischen Aufwärtsfiltration nach dem System Biofor befinden sich derzeit weltweit 69 Anlagen mit unterschiedlichen Zielsetzungen in Betrieb bzw. in Bau. Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht über den Einsatzbereich dieser biologisch intensivierten Filtrationssysteme in Verbindung mit der Angabe der Spannbreite der erstellten Filterfläche pro Anlage. Es liegen damit auch heute bereits umfangreiche Betriebserfahrungen zu dieser Technik vor.

	Deutschland		***International***	
Einzelstufen	*Anzahl Anlagen*	*Filterfläche pro Anlage min.-max m^2*	*Anzahl Anlagen*	*Filterfläche pro Anlage min.-max. m^2*
BIOFOR C	10	21 - 572	35	5 - 2496
BIOFOR N (P)	12	76 - 3504	7	5 - 2784
BIOFOR DN	2	42 - 876	3	42 - 2080

Tabelle 1: Einsatzhäufigkeit der Biofiltration - System Biofor - in Deutschland und international, 1984 - 1994

	Deutschland		***International***	
Mehrstufige Anordnung	*Anzahl Anlagen*	*Filterfläche pro Anlage min.-max m^2*	*Anzahl Anlagen*	*Filterfläche pro Anlage min.-max. m^2*
BIOFOR C + N	2	210 - 533	4	5 - 1898
BIOFOR C+N+DN	-	-	1	3744
BIOFOR N(P)+DN	1	1752	2	21 - 4864

Tabelle 2: Anzahl der Biofiltrationsanlagen - System Biofor - in Deutschland und international, die aus der Tabelle 1 in mehrstufiger Anordnung erstellt sind.

Diese Biofilter können als Ersatz und Ergänzung von konventionellen Abwasserreinigungstechniken zur Kohlenstoffelimination (BIOFOR C), Nitrifikation (BIOFOR N) und Denitrifikation (BIOFOR DN) eingesetzt werden. Dies bedeutet, daß im Falle einer geforderten Nitrifikation/Denitrifikation eine mehrstufige Biofiltration nach dem System Biofor notwendig wird.

In der Abbildung 4 sind beispielhaft Verfahrenskonzeptionen mit biologischen Aufstromfiltern aufgezeigt, die den Reinigungsleistungen einer nach dem ATV-Arbeitsblatt A 131 dimensionierten einstufigen Belebungsanlage entsprechen.

Mit der Lösung Belebungsanlage in Kombination mit einer zweistufigen Biofiltration ergibt sich eine flächensparende und effiziente Lösung, die prozeßstabil und flexibel je nach Anforderung die notwendige Nitrifikations- oder Denitrifikationsleistung sicherstellen kann. Die vorgeschaltete Belebung kann durch die Nachschaltung der beiden biologischen Aufstromfilter flächenmäßig bis zu 60 % verkleinert werden. In diesem Fall erfolgt eine optimierte Belastungsabstufung der Belebungsanlage und der nachfolgenden Biofiltration in der Weise, daß in der biologischen Vorreinigung der Kohlenstoff und der im 24 - h - Mittel anfallende Stickstoff ($f_N = 1$) weitgehend entfernt wird und die anschließende Biofiltration die tageszeitlichen Spitzen der Stickstoffbelastung (f_N bis 2,5) auf das geforderte Maß reduziert.

Dieses Verfahrenskonzept wird derzeit auf der Kläranlage Rostock ($Q = 65.000\ m^3/d$, $Q_{TW,RW} = 4.200/7.000\ m^3/h$) realisiert. Die Anlage besteht aus den Stufen Rechen, Sandfang, Vorklärung, biologische P-Entfernung, Belebungsbecken zur partiellen Nitrifikation und Denitrifikation mit einem aeroben Schlammalter von 4,6 d ($T = 10°C$) und anschließender zweistufigen Biofiltration zur Rest-Nitrifikation und -Denitrifikation.

Anstelle einer Belebung kann als weitere Alternative zur weitestgehenden Abwasserreinigung gemäß Abbildung 4 eine mehrstufige Biofiltration mit vorgeschalteter Sedimentationsstufe angesehen werden. Der besondere Vorteil dieser Konzeption ist der außerordentlich niedrige Flächenbedarf. Verglichen mit einer konventionellen Belebung nach A 131 beträgt der Netto-Platzbedarf für eine mehrstufige Biofiltration nur 25 % der Fläche.

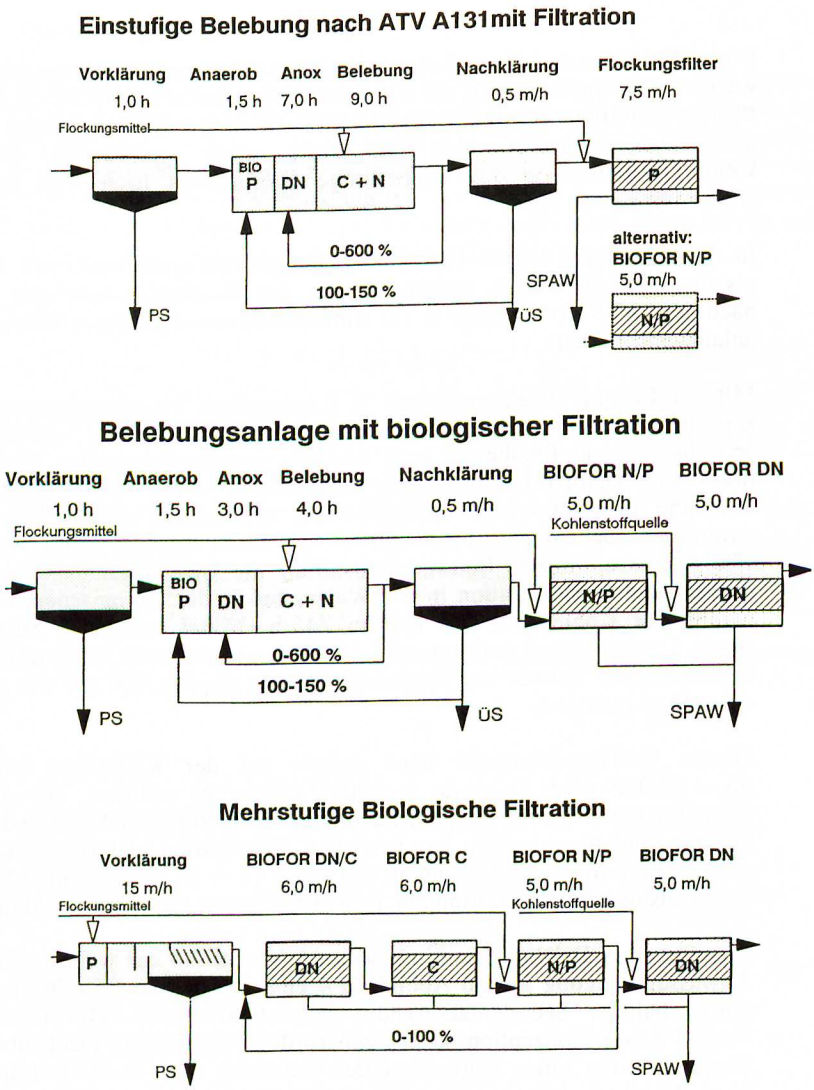

Abb. 4: Einsatzmöglichkeiten der biologischen Aufwärtsfiltration in der weitergehenden Abwasserreinigung, Belastungsfall Trockenwetterspitze

Durch den zusätzlichen Feststoffrückhalt in der biologischen Aufstromfiltration ist neben der biologischen Leistung parallel in einer Stufe auch eine definierte Phosphorelimination möglich. Damit kann der Biofor N/P entsprechend der Abbildung 4 als Alternative zur klassischen Flockungsfiltration in der Restreinigung eine zusätzliche Qualitätsverbesserung bezüglich der NH_4-N-Ablaufwerte erreichen.

Dieser Einsatzfall der Biofiltration ist auf der Großkläranlage Köln-Stammheim (311.818 m^3/d) realisiert.

Nach den bisherigen Erfahrungen und Erkenntnissen zur Biofiltration wird der Einsatz dieser Technik vor allen Dingen dann interessant, wenn

- sehr niedrige und stabile NH_4-N oder $N_{ges.}$-Ablaufwerte gefordert sind,
- in einer Stufe eine Ablaufqualitätsverbesserung bezüglich $P_{ges.}$, NH_4-N oder $N_{ges.}$ und BSB_5/CSB angestrebt wird,
- schwierige Abwasserverhältnisse wie z. B. stark schwankende Konzentrationen, niedrige Abwassertemperaturen, ungünstige C/N-Verhältnisse vorliegen,
- Flächenprobleme vorhanden sind,
- Optimierung bzw. Minimierung der Abluft- und Geräuschemissionen gefordert werden oder
- Kostenoptimierung durch kompakte Bauweise angestrebt wird.

4.0 GRUNDLAGEN ZUR LEISTUNGSBEWERTUNG DER BIOLOGISCHEN AUFSTROMFILTRATION

4.1 CSB - Entfernung

Wird die biologische Aufstromfiltration vorrangig zur CSB-Elimination eingesetzt, so ist die in Abbildung 5 dargestellte Leistung in Abhängigkeit der CSB-Raumbelastung erreichbar. Es zeigt sich anhand der Betriebsergebnisse von 5 Biofor-Anlagen, daß mit zunehmender CSB-Raumbelastung die CSB-Ablaufkonzentrationen nahezu linear zunehmen. Bei CSB-Raumbelastungen bis zu 6 kg CSB/m^3d sind Ablaufkonzentrationen von $\leq$ 75 mg/l zu erzielen. Um vergleichbare Leistungen in der Belebung zu

erreichen, ist ein um den Faktor 4 - 5fach höheres Reaktionsvolumen vorzusehen.

In der Funktion als Restreinigungsstufe kann die biologische Aufstromfiltration nicht nur über den Rückhalt der abfiltrierbaren Stoffe CSB reduzieren, sondern es kann darüber hinaus noch gelöster CSB über die mikrobiellen Abbauprozesse entfernt werden. Voraussetzung ist allerdings die prinzipielle biologische Abbaubarkeit der noch vorhandenen C-Verbindungen.

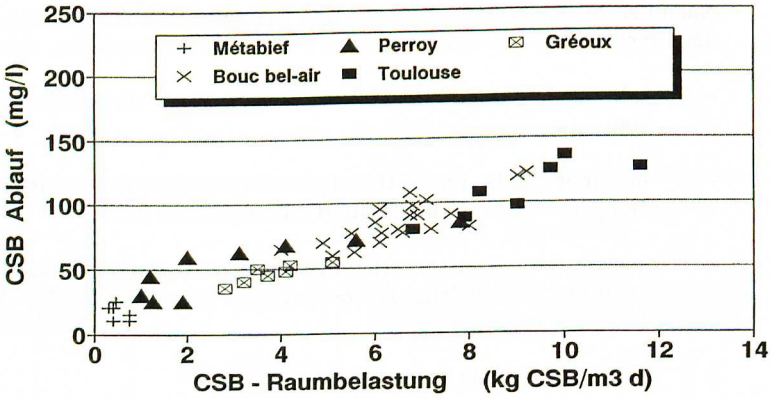

Abb. 5: Volumenspezifische CSB-Elimination im biologischen Aufstromfilter

4.2 Nitrifikation

Die entscheidenden Einflußgrößen auf die Nitrifikationsleistung im biologischen Filter sind

- die gleichmäßige und ausreichende Sauerstoffversorgung im Biofilm durch ein verfahrenstechnisch optimiertes Belüftungssystem,
- der biologische Vorabbau der organischen Kohlenstoffverbindungen,
- der Gehalt der abfiltrierbaren Stoffe im Zulauf,
- die vorhandene Säurekapazität,
- der pH-Wert und
- die Temperatur sowie
- toxische Abwasserinhaltsstoffe.

In der Abbildung 6 ist die erreichbare Nitrifikationsleistung unter Berücksichtigung der BSB_5-Zulaufkonzentration im Aufwärtsfilter mit Gleichstrombelüftung dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse sind die aktuellen Meßwerte von in Betrieb befindlichen Biofor-Anlagen. Die bisherigen Betriebserfahrungen haben gezeigt, daß je nach Ausgangssituation und Abwasserbeschaffenheit die Nitrifikationsrate bis über 1,5 kg NH_4-N/m^3d betragen kann.

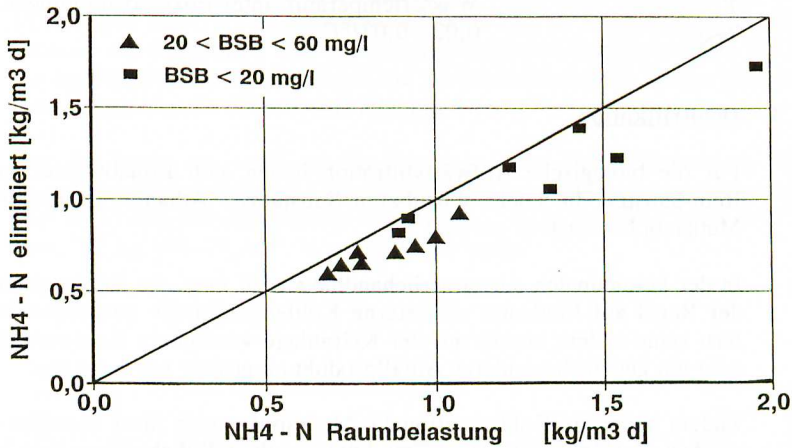

Abb. 6: Nitrifikationsleistung der biologischen Aufwärtsfiltration, Temperatur 10 - 18°C, nicht optimiert

Bei BSB_5-Zulaufwerten von $\leq$ 20 mg/l kann für eine Abwassertemperatur von 10°C ein Bemessungswert bis zu 50 g NH_4-N/m^3h respektive 1,2 kg NH_4-N/m^3d für eine weitestgehende Nitrifikation zugrunde gelegt werden. Höhere organische Kohlenstoffgehalte im Zulauf zum Biofilter bewirken eine Verminderung der Nitrifikationsleistung, d. h.

$$V_{NH4\text{-}N,\ 10°C} = f_c \cdot V^*_{NH4\text{-}N,\ 10°C}$$

f_c = Korrekturfaktor in Abhängigkeit des BSB_5

Die bisherigen Erfahrungen aus dem Betrieb dieser biologischen Filteranlagen zum Einfluß der Abwassertemperatur auf das Nitrifikationsverhalten zeigen nur eine geringe Abhängigkeit auf. In zahlreichen Untersuchungen konnte der Einfluß der Abwassertemperatur auf die Nitrifikation überprüft

werden. Die Ergebnisse bestätigen die bereits bekannten Abhängigkeiten der Nitrifikationsrate von der Temperatur:

$$V_{NH4\text{-}N,T} = V_{NH4\text{-}N,\,10°C} \cdot e^{-k_{TN}\,(10° - T)}$$

$V_{NH4\text{-}N,\,10°C}$	=	Nitrifikationsrate bei 10°C
$V_{NH4\text{-}N,\,T}$	=	Nitrifikationsrate bei T (°C)
T	=	Wassertemperatur unter Prozeßbedingungen
k_{TN}	=	0,02 - 0,03/°C

4.3 Denitrifikation

Für die biologische Aufwärtsfiltration haben sich Rohabwasser und als Rein-Substrat die leicht abbaubaren Substanzen Äthanol, Essigsäure und Methanol bewährt.

In der kommunalen Abwasserbehandlung wird man aus Kostengründen in der Regel auf Methanol als externe Kohlenstoffquelle zurückgreifen, sofern keine andere bereits auf der Kläranlage verfügbare Kohlenstoffquelle oder ein geeignetes anderes Abfallprodukt eingesetzt werden kann.

Zudem bietet die Kohlenstoffquelle Methanol wegen ihrer besseren biologischen Verfügbarkeit gegenüber kommunalem Rohabwasser den Vorteil einer ca. dreifach höheren Denitrifikationsrate pro kg TS (Henze, 1987, et al.).

Der Gesamtbedarf an Methanol zur Denitrifikation errechnet sich in Abhängigkeit der NO_3-N, NO_2-N und O_2-Konzentrationen zu (EPA, 1975).

$$C_m = 2{,}47\ NO_3\text{-}N + 1{,}53\ NO_2\text{-}N + 0{,}87\ O_2$$

C_m	=	Methanolbedarf	[g/m³]
NO_3-N	=	zu eliminierende Konzentration	[g/m³]
NO_2-N	=	zu eliminierende Konzentration	[g/m³]
O_2	=	zu eliminierende Konzentration	[g/m³]

Die Biomassenproduktion ergibt sich durch die Zugabe der externen C-Quelle Methanol zu

$$C_{üs} = 0{,}53\ NO_3\text{-}N + 0{,}32\ NO_2\text{-}N + 0{,}19\ O_2$$

$C_{üs}$	=	Überschußschlammproduktion	[g/m³]
NO_3-N	=	eliminierte Konzentration	[g/m³]
NO_2-N	=	eliminierte Konzentration	[g/m³]
O_2	=	eliminierte Konzentration	[g/m³]

Die folgende Abbildung 7 zeigt beispielhaft die mögliche Denitrifikationsleistung der Aufstromfiltration bei einer Abwasserbeaufschlagung von 10 m/h und einer Abwassertemperatur von 12 - 15°C. Aus dieser Untersuchung wird deutlich, daß bei den gemessenen Umsatzleistungen bis zu 4,8 kg NO_3-N/m³d in der Regel die verfahrenstechnisch limitierende Bemessungsgröße die Filterbeaufschlagung ist.

Auf der Basis der vorliegenden Kenntnisse zur Denitrifikation im Aufstromfilter ist zur sicheren Dimensionierung bei einer Abwassertemperatur von 10°C eine Umsatzleistung von $V_{NO3\text{-}Ne,\ 10°C,}$ = 100 g NO_3-N/m³·h bzw. 2,5 kg NO_3-N_e/m³ · d zugrunde zu legen.

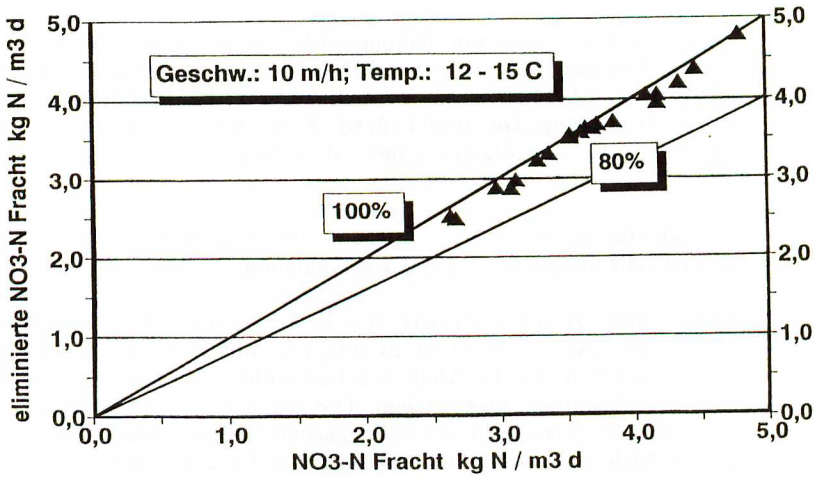

Abb. 7: Versuchsergebnisse Oslo bezüglich der Belastungsoptimierung zur Denitrifikation, 1991

Einen entscheidenden Einfluß auf die Denitrifikationsrate hat die Abwassertemperatur. Die Abhängigkeit läßt sich aus eigenen Untersuchungen wie folgt formulieren:

$$V_{NO3\text{-}Ne,\ T} = V_{NO3\text{-}Ne,\ 10°C} \cdot e^{-k_{TN}\ (10° - T)}$$

$V_{NO3\text{-}Ne,\ 10°C}$ = Denitrifikationsrate bei 10°C
$V_{NO3\text{-}Ne,\ T}$ = Denitrifikationsrate bei T (°C)
T = Wassertemperatur unter Prozeßbedingungen
k_{TN} = 0,09 - 0,14/°C

4.4 Phosphorelimination

Parallel zu den mikrobiellen Prozessen im Aufstromreaktor kann auch eine weitgehende P-Elimination erreicht werden.

Zur Erzielung eines optimalen Flockungserfolges wird das Fällmittel entweder in der druckseitigen Rohrleitung der Rohwasserpumpen oder direkt in ein Koagulationsbecken zudosiert.

In einem vorgeschalteten Fällungs-/Flockungsbecken schafft ein installiertes Rührwerk mit definiertem Energieeintrag und einer Mindestkontaktzeit von 1,0 Minuten die Voraussetzung zur Entstabilisierung und Mikroflockenbildung. Die anschließende Makroflockenentwicklung erfolgt in den Rohwasserverteilräumen, unter dem Düsenraum und im biologischen Filter.

Im Falle der erforderlichen Zugabe von Polyelektrolyten befindet sich die Dosierstelle unmittelbar nach der Koagulation.

Durch einen gezielten Einsatz von Fällungs- und Flockungschemikalien (Fe^{3+} oder Al^{3+}-Salzen) ist es möglich, mit Hilfe dieser biologischen Filtration neben dem Rückhalt von Feststoffen eine weitgehende Elimination des Phosphors zu erreichen. Die bei der Flockungsfiltration einzusetzenden Dosiermengen der Fällungschemikalien richten sich im wesentlichen nach den im Zulauf vorhandenen Konzentrationen an gelöstem Phosphor. Um eine wirtschaftliche Filterstandzeit sicherstellen zu können, sollten die Phosphorzulaufkonzentrationen zum Filter nicht wesentlich höher sein als 1,5 mg P/l.
Dies bedeutet, daß die gelösten Phosphorverbindungen in Abhängigkeit der vorhandenen Suspensastoffe bei 0,7 bis 1,0 mg P/l liegen sollten.

Vor dem Hintergrund einer parallel ablaufenden Nitrifikation haben sich die Alkali-Aluminiumverbindungen als ausgesprochen wirkungsvoll zur Phosphorelimination im biologischen Filter erwiesen. Sie bieten die besonderen Vorteile der Erhöhung der Säurekapazität, der sehr gut abscheidbaren Phosphatschlammflocke sowie der Verringerung der Phosphatschlammenge.

4.5 Wirtschaftlichkeit

Vergleicht man den Flächenbedarf der in Abbildung 4 dargestellten Verfahren, klassische Belebung nach A 131, kombiniertes Verfahren aus Belebung und Biofiltration und mehrstufiges Biofiltrationsverfahren (siehe Abbildung 8 und Tabelle 3), so zeigt sich, daß

- bei Einsatz des mehrstufigen Biofiltrationsverfahrens gegenüber der klassischen Belebung bis 75 % Flächeneinsparung möglich sind;

- bei Einsatz eines kombinierten Verfahrens, bestehend aus einer vorgeschalteten Belebung mit partieller Nitrifikation/Denitrifikation und einer zweistufigen nachgeschalteten Biofiltration zur Nitrifikation/Denitrifikation und Restphosphorelimination, immerhin noch eine Flächeneinsparung von ca. 40 % gewonnen werden kann.

Die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens spiegelt sich in den anfallenden Jahreskosten, die sich aus den Finanzkosten (Verzinsung und Abschreibung der Anlage) sowie den Betriebskosten (Personal, Wartung und Reparatur, Energie, Chemikalien, Reststoffentsorgung etc.) zusammensetzen.

Die Finanzkosten hängen stark von den örtlichen Gegebenheiten ab. Insbesondere der Grundstückspreis oder eventuell erforderlichen Sondermaßnahmen (Gründung) verschaffen daher der reinen Biofiltrationstechnik wie auch dem kombinierten Verfahren Vorteile gegenüber den klassischen Belebungsanlagen, was zu Investitionseinsparungen bis zu 25 % führen kann.

Dieser Vorteil spiegelt sich auch in den Jahreskosten wieder. In der Vergleichsuntersuchung fällt auf, daß bezüglich der Betriebskosten auftretende Mehrkosten bei Einsatz von Biofiltern für Chemikalien und Schlamm durch geringere Energiekosten wieder ausgeglichen werden können. Durch die verzögerte Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblase im Biofilter (Filterbetthöhe i. d. R. 3,0 m) und der hierdurch auftretenden ständigen neuen Grenzflächenbildung mit der damit verbundenen Diffusionverbesserung ergeben sich in der Praxis sehr günstige

Sauerstoffausnutzungsraten. Im Betrieb werden Ausnutzungsraten zwischen 30 - 45 % gemessen.

Aufstellungsplan-Abwasserlinie

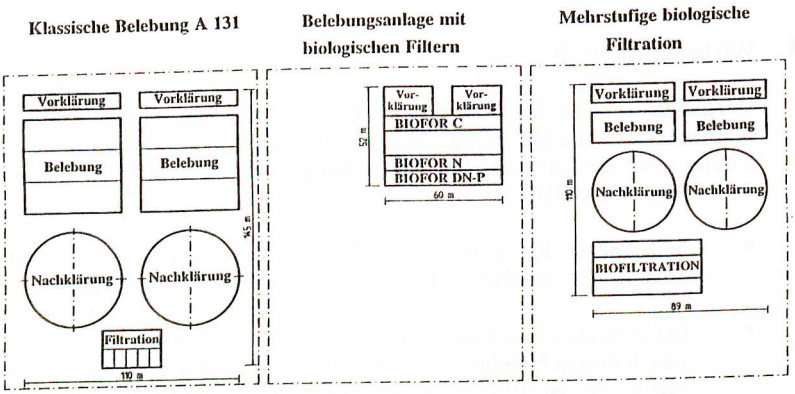

Abb. 8: Schematische Gegenüberstellung des Flächenbedarfs der verschiedenen Technologien (Beispiel für 130.000 EW)

Kostengegenüberstellung

	Klassische Belebung	Festbettechnologie	kombiniertes Verfahren
Netto-Platzbedarf	100 %	25 %	60 %
Investitionskosten	100 %	*) 75-105 %	*) 80 - 95 %
Jahreskosten **)	100 %	*) 80-105 %	*) 85 - 95 %

*) Bandbreite resultiert aus den örtlichen Gegebenheiten (Grundstückskosten, Gründungsverhältnisse etc.)
**) Jahreskosten = Summe Finazkosten und Betriebskosten (Energie, Chemikalien, Reststoffentsorgung, Personal, Wartung und Reparatur)

Tabelle 3: Kostenvergleich der verschiedenen Technologien

5.0 *GROSSTECHNISCHE BETRIEBSERFAHRUNGEN DER BIOFILTRATION ZUR N- UND P-ELIMINATION*

Großklärwerk Köln - Stammheim

Im Rahmen des Abwasserkonzeptes 2000 der Stadt Köln ist neben der Erweiterung der bestehenden Biologie und Schlammbehandlung als letzte Verfahrensstufe eine biologische intensivierte Abwasserfiltration realisiert worden. Ende 1992 erfolgte die Inbetriebnahme der Biofiltration. Die Aufgabe der Biofiltration ist im wesentlichen eine Restnitrifikation, Phosphorelimination sowie eine weitergehende Reduktion, gelöster und ungelöster Abwasserinhaltsstoffe sicherzustellen.

Die technischen Kenndaten und Reinigungsziele der biologischen Filtration sind wie folgt zusammengefaßt:

Einwohnerwerte	EW	-	1.450.000
Zuflußmenge	TW	m^3/s	4,72
Zuflußmenge	RW	m^3/s	9,20
Filterfläche, gesamt		m^2	3504
Einheiten		-	48
Einzelfilterfläche		m^2	73
Filtergeschwindigkeit	TW	$m^3/m^2 \cdot h$	5,7
Filtergeschwindigkeit	RW	$m^3/m^2 \cdot h$	11,1
Luftgeschwindigkeit		$Nm^3/m^2 \cdot h$	4,1 - 6,8
Filtermaterial BIOLITE	d	mm	1 - 2,2
BSB_5-Zulauf	max	g/m^3	15
BSB_5-Ablauf	max	g/m^3	10
CSB-Zulauf	max	g/m^3	65
CSB-Ablauf	max	g/m^3	50
$P_{ges.}$-Zulauf	max	g/m^3	2,5
$P_{ges.}$-Ablauf	max	g/m^3	0,8
NH_4-N-Zulauf	max	g/m^3	10
NH_4-N-Ablauf	max	g/m^3	3
AFS-Zulauf	max	g/m^3	30
AFS-Ablauf	max	g/m^3	15
Abwassertemperatur		°C	≥ 10

In der folgenden Graphik ist die während des Leistungsnachweises der biologischen Filtration registrierte Eliminationsleistung bezüglich der Parameter NH_4-N und $P_{ges.}$ dokumentiert.

Zur besseren Bewertung der Leistung ist über den gesamten Untersuchungszeitraum die korrespondierende Filtergeschwindigkeit aufgetragen. Die Datenbasis der einzelnen Analysenparameter ist in Tabelle 4 zusammengestellt.

Meßrhythmus	*Parameter*	*Zahl der Messungen* qualifizierte Stichproben	2 - h - Mischproben
Für alle Parameter: täglich	BSB_5	42	166
3 x qualifizierte Stichproben	CSB	42	166
sowie täglich 12 x 2 - h	NH_4-N	42	166
Mischproben	P_{ges}	42	166
15.02. - 01.03.93	AFS	35	166

Tabelle 4: Gemessene Analysenparameter zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Biofiltration

Bezüglich der Restnitrifikation zeigt sich, daß die NH_4-N-Ablaufkonzentration mit Ausnahme vom 15./16.02.1993 prozeßstabil < 1 mg/l liegen. Die zu diesem Zeitpunkt mit 2 mg/l NH_4-N geringfügig erhöhte Ablaufbeschaffenheit ist auf eine Sauerstofflimitierung zurückzuführen, da während des gesamten Untersuchungszeitraumes die Luftgeschwindigkeit mit 4,1 m/h konstant gehalten wurde.

In dieser Meßreihe bestätigt sich erneut, daß trotz Schwankungen in der hydraulischen Beaufschlagung der Filter jederzeit eine stabile Nitrifikation sichergestellt werden kann. Die auf das Filterbettvolumen bezogene Nitrifikationsrate ermittelt sich gemäß Abbildung 10 bis zu 25 g NH_4-N/m^3h respektive 600 g NH_4-N/m^3d. Durch die Erhöhung der Luftbeaufschlagung auf 6,8 m/h ist eine Steigerung der Nitrifikationsleistung auf 42 g NH_4-N/m^3h bzw. 1000 g NH_4-N/m^3d möglich.

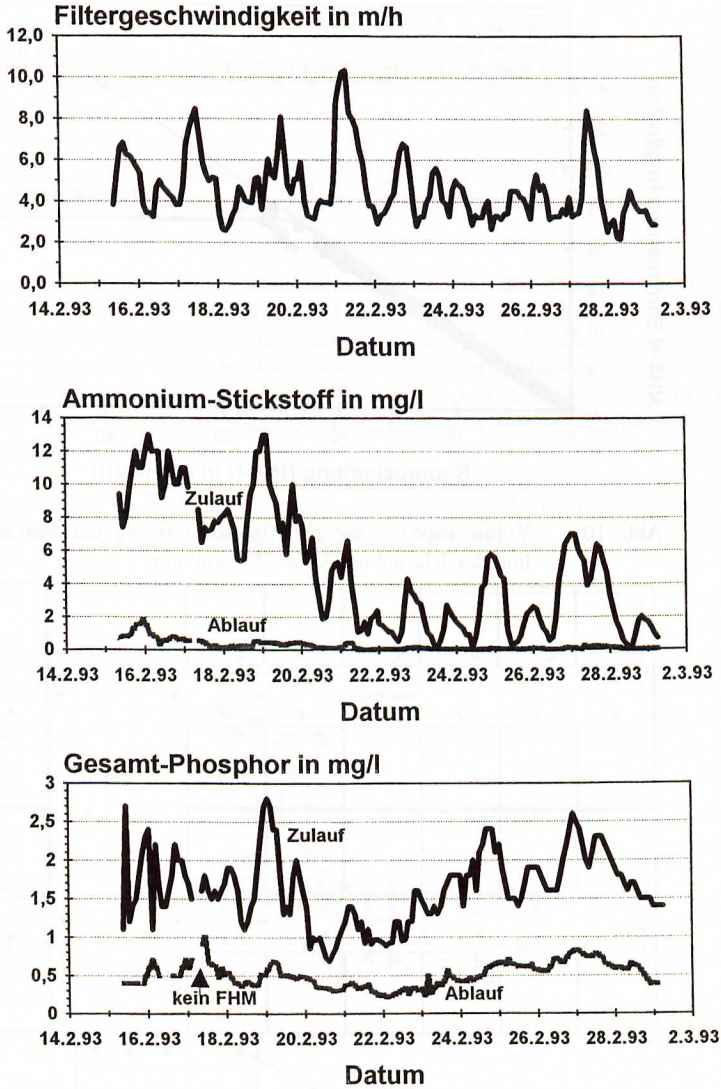

Abb. 9: Filtergeschwindigkeit, Ammonium und Gesamtphosphor im Zu- und Ablauf der biologischen Filtration der Kläranlage Köln - Stammheim über den Beobachtungszeitraum.

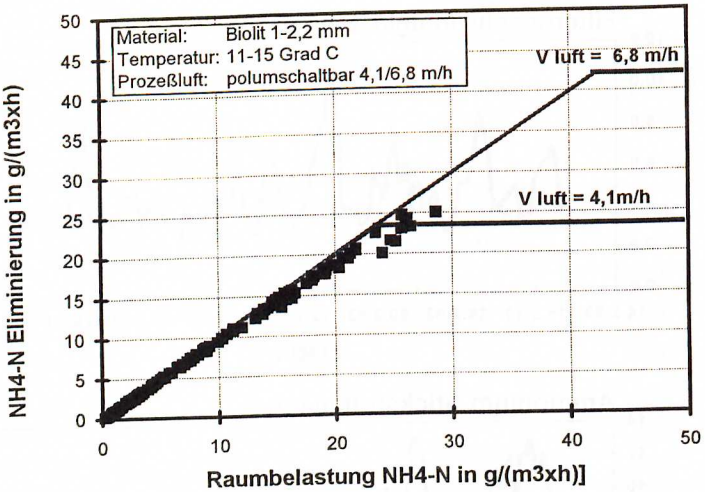

Abb. 10: Volumenspezifische Nitrifikationsleistung der biologischen Filtration der Kläranlage Köln - Stammheim

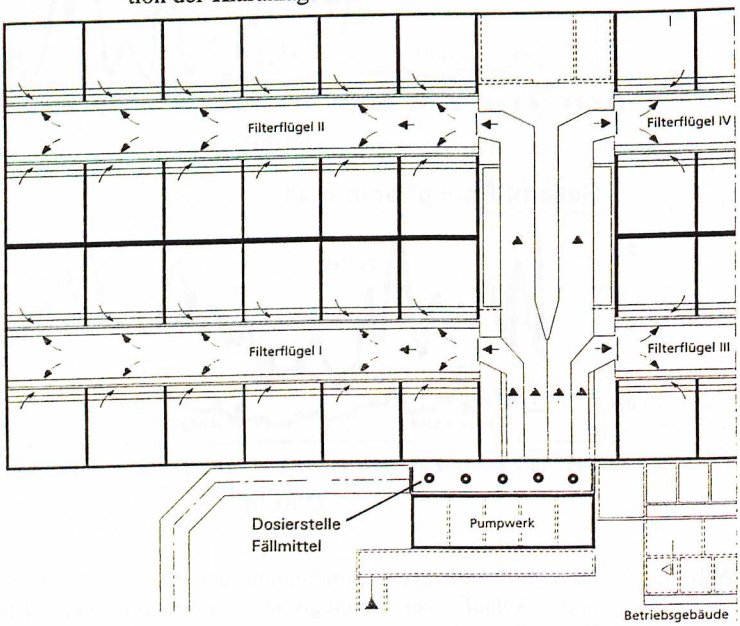

Abb. 11: Prinzipielle Anordnung der Impfstelle der Fällmittelzugabe

Während des Untersuchungszeitraumes wurden zur Entfernung der Restphosphorkonzentrationen druckseitig gemäß Abbildung 11 alkalische Aluminiumverbindungen zudosiert. Wegen der noch fehlenden phosphatfrachtproportionalen Steuerung wurde die mengenabhängige Fällmitteldosierung auf einen P-Zulaufwert von 2,5 mg/l eingestellt. Die Aluminiumdosierung betrug konstant 3,0 g/m^3, was einem molaren Verhältnis von Al/P = 1,4 entspricht.

Mit dieser Steuerung und Fällmittelmenge konnte der Gesamtphosphor gemäß Abbildung 9 mit Ausnahme des Störfalles vom 17.02.1993 (Ausfall der Flockungshilfsmitteldosierung) konstant ≤ 0,8 mg/l gehalten werden. Der 80 %-Perzentil-Wert des Gesamtphosphors im Ablauf ergab sich zu 0,64 mg/l, der Mittelwert lag bei 0,51 mg/l. Durch den späteren Einsatz der phosphatfrachtproportionalen Steuerung ist eine weitere Verbesserung der Ablaufqualität erreichbar.

Die Abbildung 12 zeigt, daß bei einer Erhöhung des Molverhältnisses ein $P_{ges.}$-Ablaufwert von ≤ 0,4 - 0,5 mg/l erreichbar ist.

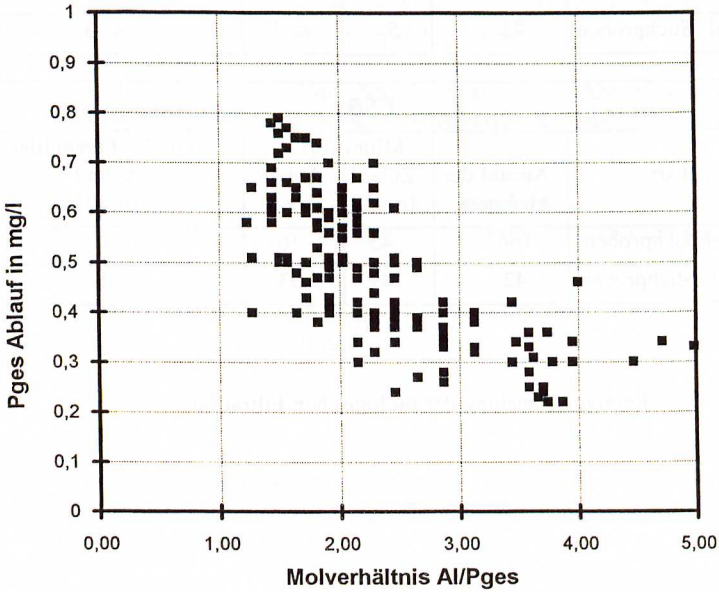

Abb. 12: Erreichbare Restphosphorkonzentration der biologischen Filter in Abhängigkeit des Al/$P_{ges.}$-Verhältnisses.

Die Leistungsfähigkeit der biologischen Filtration bezüglich der abfiltrierbaren Stoffe, des BSB_5 und des CSB ist in der nachfolgenden Tabelle 5 zusammengestellt:

Abfiltrierbare Stoffe				
Probenart	Anzahl der Meßwert	Mittelwert Zulauf [mg/l]	Mittelwert Ablauf [mg/l]	80 % - Perzentile Ablauf [mg/l]
2-h-Mischproben	147	11,3	4,7	5,8
qual. Stichproben	35	9,5	3,9	5,3

BSB_5				
Probenart	Anzahl der Meßwert	Mittelwert Zulauf [mg/l]	Mittelwert Ablauf [mg/l]	80 % - Perzentile Ablauf [mg/l]
2-h-Mischproben	166	6,2	< 3	< 3
qual. Stichproben	42	5	< 3	< 3

CSB				
Probenart	Anzahl der Meßwert	Mittelwert Zulauf [mg/l]	Mittelwert Ablauf [mg/l]	80 % - Perzentile Ablauf [mg/l]
2-h-Mischproben	166	45	36	40
qual. Stichproben	42	41	33	38

Tabelle 5: Reinigungsleistung der biologischen Filtration

6.0 ZUSAMMENFASSUNG

In der Abwasserreinigung kann die Technik der Biofiltration in der Funktion als Restreinigungsstufe oder als Ersatz für konventionelle Abwasserreinigungstechniken eingesetzt werden.

Durch die in zahlreichen Biofilteranlagen registrierten hohen stoffspezifischen Umsatzraten für den Kohlenstoffabbau, Nitrifikation und Denitrifikation sind erhebliche Flächeneinsparungen möglich. Je nach Verfahrenskombination kann durch den Einsatz von biologischen Aufstromfiltern der Flächenbedarf für eine Kläranlage gegenüber der Bemessung der Belebung nach A 131 bis auf 1/4 der Fläche reduziert werden.

Mit einer derartigen Biofiltertechnik läßt sich eine hohe Reinigungsleistung und Prozeßstabilität in Bezug auf CSB, BSB_5, NH_4-N, N_{gesamt}, P und AFS erreichen.
Auch bei tiefen Abwassertemperaturen von < 10°C können sehr niedrige Stickstoffablaufwerte eingehalten werden.
Der besondere Vorteil des anoxischen Aufstromfilters ist, daß in Abhängigkeit der zudosierten Kohlenstoffmenge die Denitrifikationsleistung beeinflußt werden kann. Es können im Ablauf NO_x-N-Werte von < 3 mg/l ohne Schwierigkeiten prozeßstabil erreicht werden.
Am Beispiel der Großkläranlage Köln-Stammheim zeigt sich, daß neben einer vollständigen sicheren Nitrifikation mit Ablaufwerten von ≤ 1 mg NH_4-N/l parallel auch eine weitgehende Restphosphorentfernung möglich ist.

Je nach örtlichen Gegebenheiten können durch den Einsatz der biologischen Aufstromfilter Investitionskosten und auch Jahreskosten eingespart werden.

Damit eröffnet die biologische Aufstromraumfiltration weitere Möglichkeiten eines wirtschaftlicheren und prozeßstabileren Kläranlagebetriebs.

Dr.-Ing. Andreas Strohmeier
Prokurist
PHILIPP MÜLLER GmbH
Mönchstraße 11
D-70191 Stuttgart
(07 11) 25 61 - 0

Literatur

BOLLER, M. GUJER, TSCHUI, M.	Parameters affecting nitrifying biofilms reactors, Second International Specialized Conference on "Biofilm Reactors", 29.09.-01.10.1993, Paris
BOLLER, M.	Verfahren zur Abwasserfiltration ATV-Fortbildungskurs F/2, 02.11.-04.11.1988 in Fulda
CARRAND, G. et al.	Elimination des pollutions carbonées et azotées par un procédé à cultures fixées en deux étages IAWPRC-Conférence, Nizza 04.04.-06.04.1989
EPA	Process Design Manual for Nitrogen Control, 1975
FAUP, G. M. et al.	Nitrifikation in einem aufwärts durchströmten Festbettreaktor 11. IAWPR-Konferenz 1982 in Kapstadt
FLEMMING, H. C.	Biofilme und Wassertechnologie, Teil I: Entstehung, Aufbau, Zusammensetzung und Eigenschaften von Biofilmen GWF Wasser, Abwasser 132, Nr. 4, 1991
GASSEN, M. HEDRICH, H.	Phosphorentnahme und Restnitrifikation in einem biologischen Filter Abwasserforum, Fachjournal für Abwassertechnik Köln, Klärwerk Köln-Stammheim zukunftweisend für den Gewässerschutz, Stadt Köln
HEINRICH, D.	Untersuchungen zur Nitrifikation von Abwässern in überstauten Festbettreaktoren Stuttgarter Berichte, Bd 81, Kommissionsvorlage R. Oldenburg, München 1984
HENZE, M. CHRISTENSEN, M. HARREMOES, P.	Biological denitrification of sewage - a literature review Prog. Water Technologie 8, S. 509 - 555, 1987
PAFFONI GOUSAILLES VEDRY	Tertiary nitrification of Paris wastewater with biofilm processes Second International Specialized Conference on "Biofilm Reactors", 29.09.-01.10.1993, Paris

PUJOL, R. CAULER, J. P. IWEMA, A.	Biological aerated Filters An attractive and alternative biological process IAWPRC 16th Biennial Conference and Exhibition Washington, D. C. 24.05.-30.05.1992
PUJOL, R. KANDEL HAMON, M.	Biofilters: adaptable and reliable reactors Second International Specialized Conference on "Biofilm Reactors", 29.09.-01.10.1993, Paris
RHEINHEIMER G. HEGEMANN, W. RAFF, J. SEKOULOV, I.	Stickstoffkreislauf im Wasser, Stickstoffumsetzungen in natürlichen Gewässern, in der Abwasserreinigung und Wasserversorgung R. Oldenburg Verlag München, Wien 1988
RICHARD, Y. FAUP, G. M.	The removal of nitrogen compound by fixed cultures in upflow beds International Water Supply Association 14th Congress, Zürich 1982
ROHMANN SONTHEIMER	Nitrat im Grundwasser - Ursachen, Bedeutung, Lösungen Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe (TH), ISBN 3 - 922671 - 12 - 8
SAGBERG, P. DAUTHUILLE, P. HAMON, M.	Biofilmreactors Wat. Sci. Tech. Vol. 26, No. 3 - 4, 1992
SEYFRIED, C. F.	Gutachterliche Stellungnahme zur Genehmigungsplanung der Kläranlage Rostock unveröffentlicht, November 1993
TSCHUI, M. BOLLER, M. GUJER	Tertiary nitrification in biofilter reactors Second International Specialized Conference on "Biofilm Reactors", 29.09.-01.10.1993, Paris
TSCHUI, M.	Nitrifikation mit submersen Festbettreaktoren Stickstoffelimination auf Kläranlagen VSA Tagung, 05.11.1993