

**Kurzfassung des Abschlussberichtes für das Ministerium für
Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV)**

**Strategien zur Foulingkontrolle bei
Membranbelebungsanlagen in der kommunalen
Abwasserbehandlung**

RWTHAACHEN

Erft  Verband

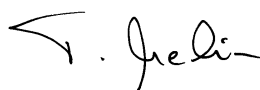
Institut für Verfahrenstechnik

Erftverband Bergheim

Institut für Hygiene und Umweltmedizin

Institut für Siedlungswasserwirtschaft

Aachen, im März 2007



Prof. Dr.-Ing. T. Melin

(Leiter des Instituts für Verfahrenstechnik)

Beteiligte Projektpartner

a)

Institut für Verfahrenstechnik der RWTH Aachen (IVT)

Prof. Dr.-Ing. Thomas Melin, Lehrstuhlinhaber und Direktor

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Sven Lyko, Projektleitung

Projektmitarbeiter: Dipl.-Ing. Anne Batsch

Dipl.-Ing. (FH) Tina Bauer

Dr.-Ing. Thomas Wintgens

Turmstr. 46

52056 Aachen

Telefon: 0241/80-95470

Telefax: 0241/80-92252

E-Mail: lyko@ivt.rwth-aachen.de

b)

Lehrstuhl und Institut für Hygiene und Umweltmedizin der RWTH Aachen (IHU)

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Dott, Direktor

Projektmitarbeiter: Dipl.-Biotechnol. Djamila Al-Halbouni

Prof. Dr. Juliane Hollender

Pauwelsstr. 30

52074 Aachen

Telefon: 0241/80-88-282/-385/-485

Telefax: 0241/8888-477

E-Mail: wdott@ukaachen.de

c)

Lehrstuhl und Institut für Siedlungswasserwirtschaft

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp, Lehrstuhlinhaber und Direktor

Projektmitarbeiter: Dipl.-Ing. Stefan Grinwis

Dipl.-Biol. Bettina Schürmann

Dipl.-Ing. Daniela Tacke

Mies-van-der-Rohe-Str. 1

52056 Aachen

Telefon: 0241/80-5207

Telefax: 0241/8888-285

E-Mail: pinnekamp@isa.rwth-aachen.de

d)

Erftverband

Dr.-Ing. Wulf Lindner, Vorstand Erftverband

Projektmitarbeiter: Dipl.-Ing. Kinga Drensla

Dipl.-Ing. Andreas Janot

Paffendorfer Weg 42

50126 Bergheim

Telefon: 022711/88-0

Telefax: 02271/88-210

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Material und Methoden.....	5
3	Charakterisierung von Fouling.....	6
4	Charakterisierung von Foulingmechanismen und foulingverursachenden Substanzen...	7
5	Beschaffenheit des Belebtschlammes im Hinblick auf die Filtrierbarkeit – GKW Nordkanal	10
5.1	Mikrobiologische Untersuchung des Belebtschlammes des GKW Nordkanal.....	10
5.2	Charakterisierung des Belebtschlammes und Permeates des GKW Nordkanal	10
6	Vergleichendes Screening kommunaler Belebtschlämme hinsichtlich foulingbildender Substanzen.....	14
7	Einfluss von Betriebsparametern auf die Leistungsfähigkeit von Membranen	15
7.1	Einfluss der hydraulischen Belastung der Membranen	15
7.2	Einfluss der Luftblasenüberströmung	16
7.3	Einfluss des Schlammalters	17
8	Wirkung und Effektivität unterschiedlicher Reinigungschemikalien.....	18
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	19
	Danksagung	19

1 Einleitung

In Membranbelebungsanlagen führen unterschiedliche Phänomene zu einer verminderten Leistungsfähigkeit der Membranen. Hierzu zählen mikroskopische Phänomene, die sich unmittelbar auf oder in der Membran abspielen. Zentrale Bedeutung hat dabei das Membranfouling in Form von Deckschicht- und Biofilmbildung auf der Membran sowie die Porenverblockung innerhalb der Membran. Diese Phänomene werden durch verfahrens- und betriebstechnische Faktoren, wie beispielsweise die transmembrane Druckdifferenz oder die Belüftungsrate, aber insbesondere auch durch materialspezifische Aspekte (Membraneigenschaften) sowie stoffspezifische Aspekte (Problemstoffe im Belebtschlamm) beeinflusst (Abbildung 1-1).

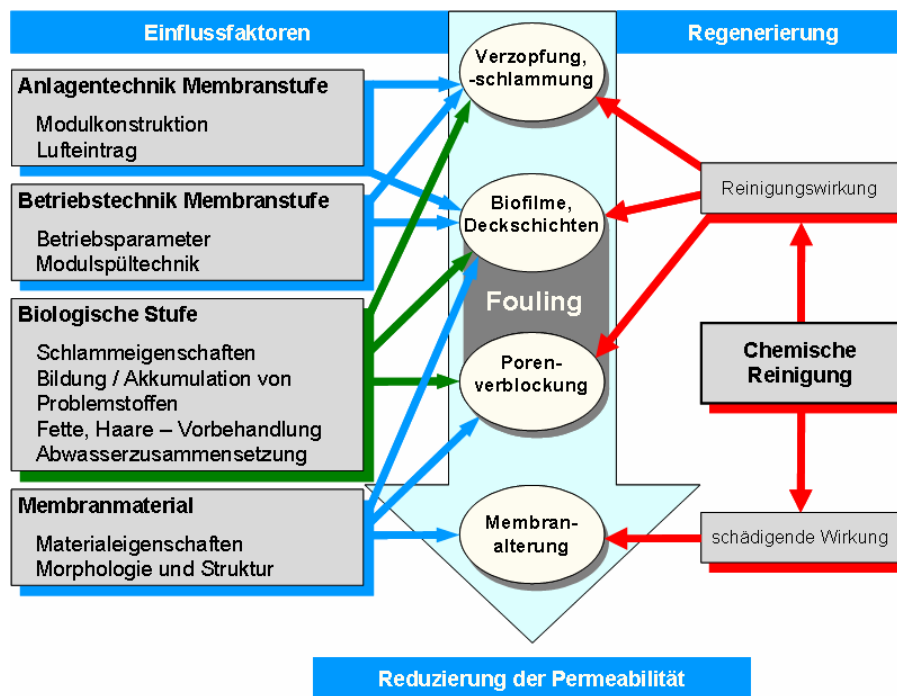


Abbildung 1-1: Permeabilitätsmindernde Faktoren beim Membranbelebungsverfahren

Im Rahmen des Projektes wurden einzelne Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von Membranbelebungsanlagen grundlegend untersucht. Die Arbeiten gliederten sich in zwei Betrachtungsebenen:

- Grundlagenorientierte Ebene – phänomenologische Untersuchung des Foulingverhaltens von Membranen
- Prozessorientierte Ebene – Einfluss der Betriebstechnik auf die Leistungsfähigkeit der Membranen.

Nach einer Charakterisierung gefaulter Membranen und der Zusammensetzung der Deckschichten wurden Laborversuche zum Einfluss ausgewählter repräsentativer Modellsubstanzen durchgeführt. Die Ergebnisse des Monitoring des GKW Nordkanal wurden durch die Untersuchung weiterer großtechnischer Membranbelebungsanlagen bewertet und auf ihre Übertragbarkeit überprüft. Der Einfluss von Betriebsparametern und die Wirkung und Effektivität verschiedener Membranreinigungsprozeduren wurde anhand von Pilotanlagen untersucht. Abschließend werden die Projektergebnisse zusammengefasst und darauf aufbauend Verfahrensgrundsätze und optimierte/angepasste Betriebsstrategien zur Foulingkontrolle beim Membranbelebungsverfahren entwickelt.

2 Material und Methoden

Im Arbeitsbereich Verfahrens- Anlagen- und Betriebstechnik erfolgte eine Fokussierung auf den Einfluss der Betriebsparameter und Anlagentechnik. Dazu wurden praktische Untersuchungen zur Foulingkontrolle an fünf Pilotanlagen und auf dem großtechnischen Gruppenklärwerk (GKW) Nordkanal durchgeführt (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Pilotanlagen

	Pilotanlage 1	Pilotanlage 2	Pilotanlage 3	Pilotanlage 4	Pilotanlage 5
Standort	GKW Nordkanal	GKW Nordkanal	KA Eilendorf	KA Soers	KA Soers
Membranfirma	ZENON®	PURON®	PURON®	KUBOTA®	PURON®
Membrantyp	Hohlfaser	Hohlfaser	Hohlfaser	Platten	Hohlfaser
Membranfläche	60 m ²	2 x 30 m ²	3 x 1,74 m ²	1,1/0,8 m ²	2,23/1,43m ²

Zusätzlich zu den Pilotanlagen wurden Untersuchungen auf dem GKW Nordkanal durchgeführt (Abbildung 2-1).

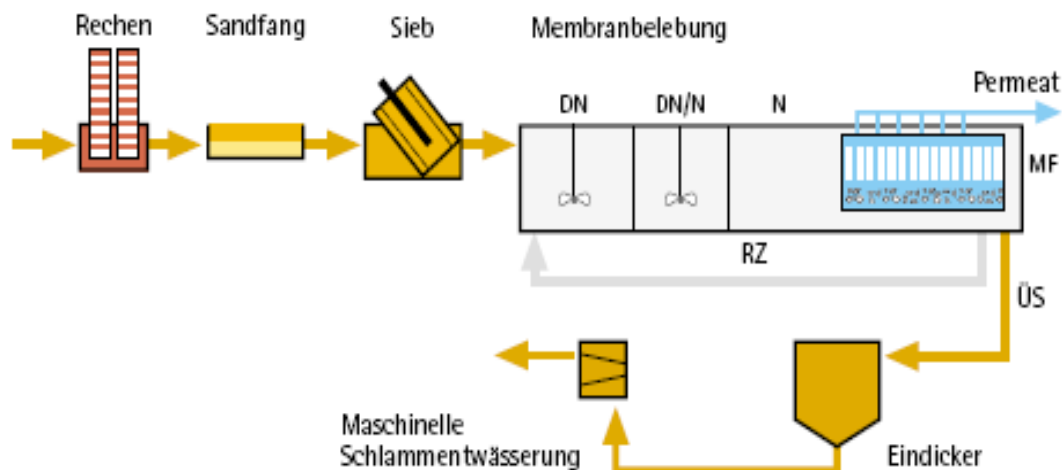


Abbildung 2-1: Fließbildschema des GKW Nordkanal

Um der Komplexität der auftretenden Phänomene Rechnung zu tragen wurde eine angepasste Methode zur Foulingcharakterisierung etabliert. In Tabelle 2-2 wurden die im Projektzeitraum untersuchten Parameter zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 2-2: Im Projektverlauf untersuchte Parameter

Belebter Schlamm	Überstand des belebten Schlammes	Permeat	Membran
Entwässerbarkeit (CST)	Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	Trockenrückstand (TR)	EPS der Deckschicht und Poren
Schlammvolumenindex (ISV)	Summe des organisch gebundenen Kohlenstoffes (TOC)	Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	Metalle
Viskosität	Spektraler Absorptionskoeffizient (SAK)	Summe des organisch gebundenen Kohlenstoffes (TOC)	REM, ESEM und EDX
Trockenrückstand (TR)	PS _{gel}	Spektraler Absorptionskoeffizient (SAK)	CLSM
Trockensubstanz (TS)	Nitrat	PS _{gel}	
Glühverluste bez. auf TR u. TS	Proteine	Nitrat	
Gesamtstickstoff (N _{ges.})	Huminsäuren	Proteine	
Gesamtstickstoff (P _{ges.})	Kohlenhydrate	Huminsäuren	
Mikrobiologie	Uronsäuren	Kohlenhydrate	
Filtrationsindex FI ₁₅	Metalle	Uronsäuren	
geb. EPS und Metalle	DNA	Metalle	
		DNA	

3 Charakterisierung von Fouling

Anhand der Untersuchungen real gefouelter Hohlfasern der Pilot- und großtechnischen Membranbelebungsanlagen kann die Charakterisierung des Membranfouling wie folgt zusammengefasst werden:

- Durch optimierte Durchmischung und Rückspülzyklen in der KA Nordkanal wird der Ausbildung eines ausgeprägten Biofilms auf den Membranen effizient entgegen gewirkt.
- Permeabilitätsrückgang und Porenverblockung der Membranen sind im Wesentlichen auf zwei Bestandteile extrazellulärer polymer Substanzen (EPS) (Huminsäuren und Kohlenhydrate) zurückzuführen, die sich zusammen mit Eisen auf und in den Membranen ablagern.
- Gelöste höhermolekulare organische Substanzen/Fraktionen konnten im Gegensatz zum Belebtschlammüberstand auf bzw. in den Membranen nicht detektiert werden, obwohl der Rückhalt dieser Substanzen mittels Gel-Permeations-Chromatographie (GPC) nachgewiesen werden konnte (Abbildung 3-1).
- Die Intensität des Fouling unterscheidet sich je nach Position der Membran innerhalb eines Moduls und auch je nach Position des Moduls im Filtrationsbecken. Es liegt insgesamt eine sehr heterogene Situation vor.
- Hypothese: Die Ausbildung anaerober Zonen führt zur Rücklösung von Eisen aus den Flocken, so dass Fe^{2+} mit Bestandteilen der NOM (hier besonders Huminstoffe) komplexieren kann und diese Moleküle an den Membranen binden können.
- Die Situation ist spezifisch für die gegebenen Bedingungen im Belebungsbecken des GKW Nordkanal und für die dort eingesetzten Membranen und tritt in einer Vergleichsanlage nicht auf, obwohl dort ähnliche Konzentrationen an EPS und Eisen vorhanden waren.
- Zur Rücklösung von Eisen und Huminstoffen aus diesen Membranen eignet sich Citronensäure (oder eine andere Säure) besser als NaOCl (oder Basen allgemein).

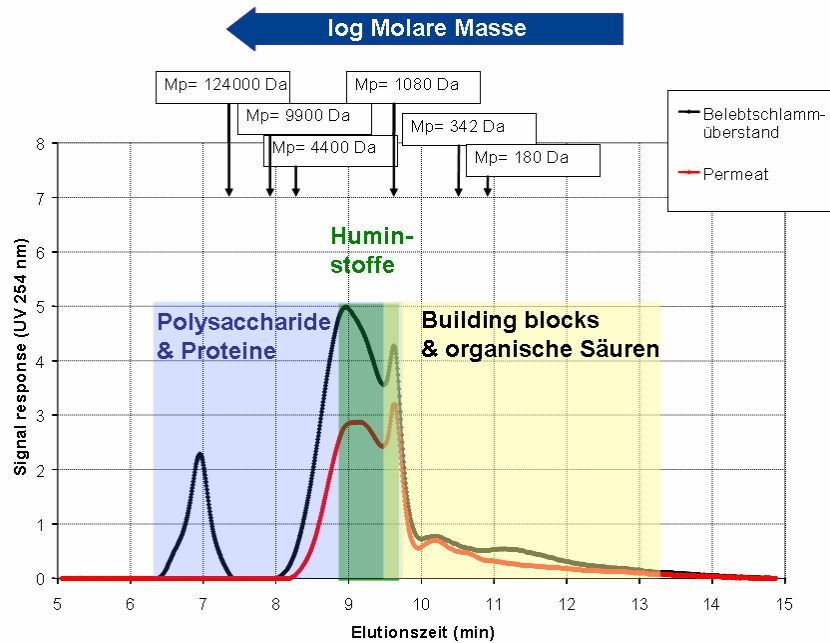


Abbildung 3-1: Vergleich der Molmassenverteilung in Belebtschlammüberstand und Permeat des GWK Nordkanal

4 Charakterisierung von Foulingmechanismen und foulingverursachenden Substanzen

Auf Grundlage der Foulingcharakterisierung konnten die foulingverursachenden Substanzklassen erfasst und repräsentative Modellschubstanzen definiert werden. Als Leitsubstanz für Polysaccharide wurde Dextran 60 gewählt. Bovine serum albumin (BSA) repräsentiert die Fraktion der Proteine und Humussäure (HS) wurde als Leitparameter für Huminsäuren und Humine, verwendet. Zur Bestimmung der Foulingmechanismen wurden mithilfe von Testzellenversuchen folgende Einflussfaktoren auf die Filtrationsleistung näher untersucht:

- Interaktionen zwischen den Modellschubstanzen
- Einfluss des Membranmaterials
- Einfluss der Porengröße bzw. Trenngrenze der Membran
- Einfluss divalenter Kationen bei konstanter Ionenstärke

In den Versuchen konnte für eine Modelllösung aus BSA und HS eine Verschiebung des maximalen Molekulargewichts um etwa 30 kDa festgestellt werden (bezogen auf den BSA-Einzelstandard) (Abbildung 4-1). Zusätzlich wurde eine Änderung des Adsorptionsverhaltens von BSA durch den Vergleich unterschiedlicher GPC-Detektorsignale nachgewiesen.

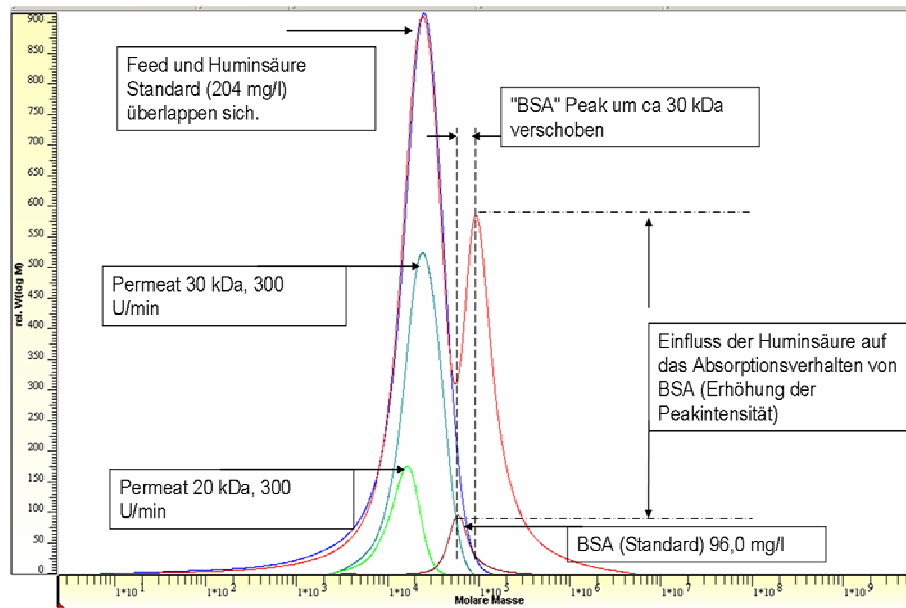


Abbildung 4-1: Assoziationen der Modellspezies bei einer Mischung aus BSA, Dextran und Huminsäure

Sowohl für die Mischung aus Dextran und Huminsäure, als auch für Mischung aus Dextran und BSA konnten keine Interaktionen zwischen den Modellspezies ermittelt werden. Bei einem Vergleich mit Huminsäure als Einzelstandard kann eine Erhöhung der Peakintensität festgestellt werden, die bei der Überlappung von Dextran und Huminsäure entsteht. Für die Mischungen konnte in den Filtrationsversuchen ein verstärktes Fouling infolge Deckschichtbildung ermittelt werden (Darstellung der Filtrationswiderstände in Abbildung 4-2).

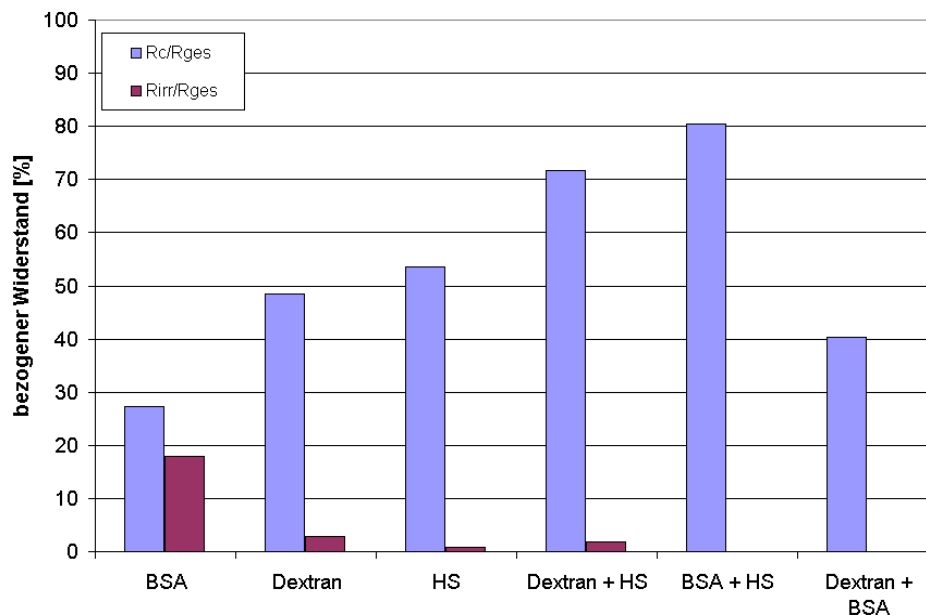


Abbildung 4-2: Vergleich des Deckschichtwiderstandes der binären Modelllösung mit denen der Einzelstandards für eine 150 kDa Membran bei 300 U/min

Zusammenfassend ist in eine Tabelle 4-1 qualitative Bewertung der verschiedenen Einflussgrößen durchgeführt wurden.

Tabelle 4-1: Qualitative Bewertung des Foulingpotentials verschiedener Modellösungen

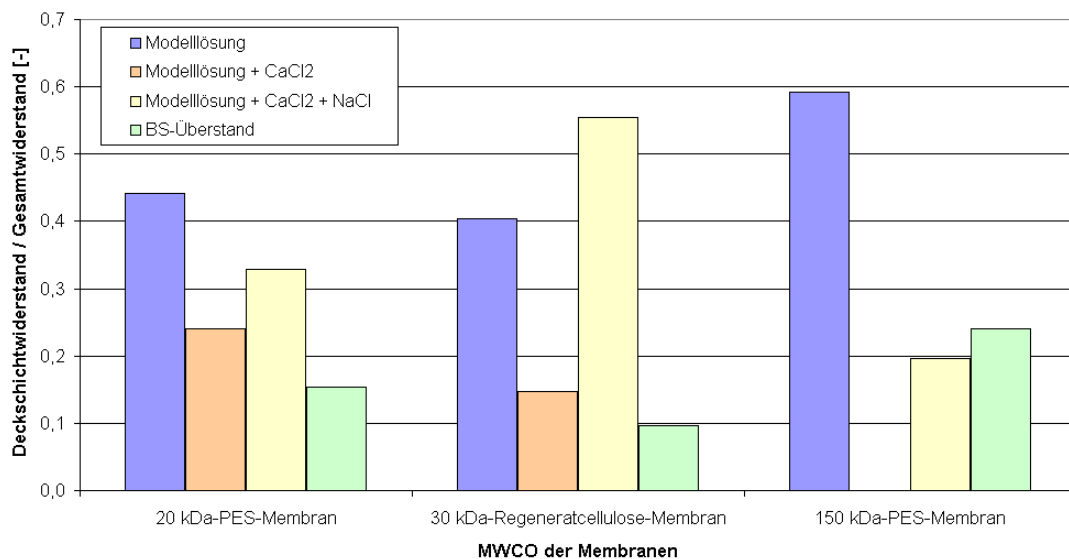
3 Komponenten- Modellösungen	Deckschichtbildung			Porenverblockung			Interaktionen mittels GPC					
							Verschiebung Molekulargewicht			Peakintensität		
	20	30	150	20	30	150	HS	BSA	Dextran	HS	BSA	Dextran
BSA, Dextran und Huminsäure	++	++	++	+	+	+	0	Z		0	ZZ	
Unterschiedlicher Struktur Proteine	+	+	+	+	+	+	0	Ø		Ø	Ø	
Zugabe CaCl ₂ (divalente Kationen)	+	+	++	++	++	-	0	ZZ		0	A	
Zugabe CaCl ₂ und NaCl (Mischung mono- und divalenter Kationen)	++	+	++	+	+	+	0	ZZ		0	A	

+	stark	HS	Huminsäure
++	sehr stark	Z / ZZ	Zunahme / starke Zunahme
-	schwach/gering	A / AA	Abnahme / starke Abnahme
--	vernachlässigbar	20	20 kDa Polyethersulfon-Membran
0	keine Änderung	30	30 kDa Regeneratcellulose-Membran
Ø	keine Detektion möglich	150	150 kDa Polyethersulfon-Membran

* Die Angaben für die Mischungen mit divalenten Kationen beruhen auf dem quantitativen Vergleich mit der 3 Komponenten Modelllösung

** In Anwesenheit von divalenten Kationen ändern sich die Eigenschaften der Deckschicht und dieser wird schlecht entfernt. Es wird daher ein großer irreversibler Anteil bestimmt (vgl. Abbildung 4-26).

Ein Vergleich der Filtrationswiderstände der Modelllösung mit denen bei der Filtration von Belebtschlammüberstand wurde durchgeführt um die Übertragbarkeit der Laborversuche zu überprüfen. Da die TOC-Konzentration der Modelllösung um ein Vielfaches über der des realen Belebtschlammüberstandes lag, wurde als Bezugspunkt ein vergleichbarer Wert des angelieferten TOC (TOC_{delivered}) definiert. Dieser TOC_{delivered} berechnet sich aus dem Produkt des abgezogenen Permeatvolumens und der TOC-Konzentration im Feed. In Abbildung 4-3 wird deutlich, dass die 3-Komponenten-Modelllösung mit Zusatz divalenter Kationen (orange) sehr gut das Foulingpotential des Belebtschlammüberstandes (grün) repräsentiert.


Abbildung 4-3: Vergleich der anteiligen Deckschichtwiderstände zwischen Modelllösung und Belebtschlammüberstand

5 Beschaffenheit des Belebtschlammes im Hinblick auf die Filtrierbarkeit – GKW Nordkanal

5.1 Mikrobiologische Untersuchung des Belebtschlammes des GKW Nordkanal

Die mikroskopischen Untersuchungen der Fauna und Flora des Belebtschlammes weisen die Membranbelebungsanlage Nordkanal als Anlage mit extrem niedriger CSB-Schlammbelastung und hoher Betriebsstabilität aus. Dies reflektiert sich auch in der im Laufe des Untersuchungszeitraumes zu beobachtenden rückgängigen Fädigkeit. Zwar sind die Fadenbildner der typischen Gruppe der Nocardioformen und Actinomyceten weiterhin nachzuweisen, doch hat die Häufigkeit ihres Auftretens stetig abgenommen. Der Bezug des Auftretens dieser Fadenbildner zur Zusammensetzung des Abwassers lässt erwarten, dass ein vollständiger Rückgang dieser Fadenbakterien erst dann eintreten wird, wenn sich die Qualität des Abwassers grundlegend ändert.

Die Auswertung der Vitalfärbungen zeigt in den ersten Monaten des Betriebs der Membranbelebungsanlage bei allen Untersuchungen hohe Aktivität an. Man muss diese Zeit als Phase der Etablierung der Biozönose des Belebtschlammes bezeichnen, bis sich augenscheinlich bei bestehenden stabilen Betriebsverhältnissen und wenn keine gravierenden verfahrenstechnischen Änderungen vorgenommen werden ein Gleichgewichtszustand einstellt (Abbildung 5-1).

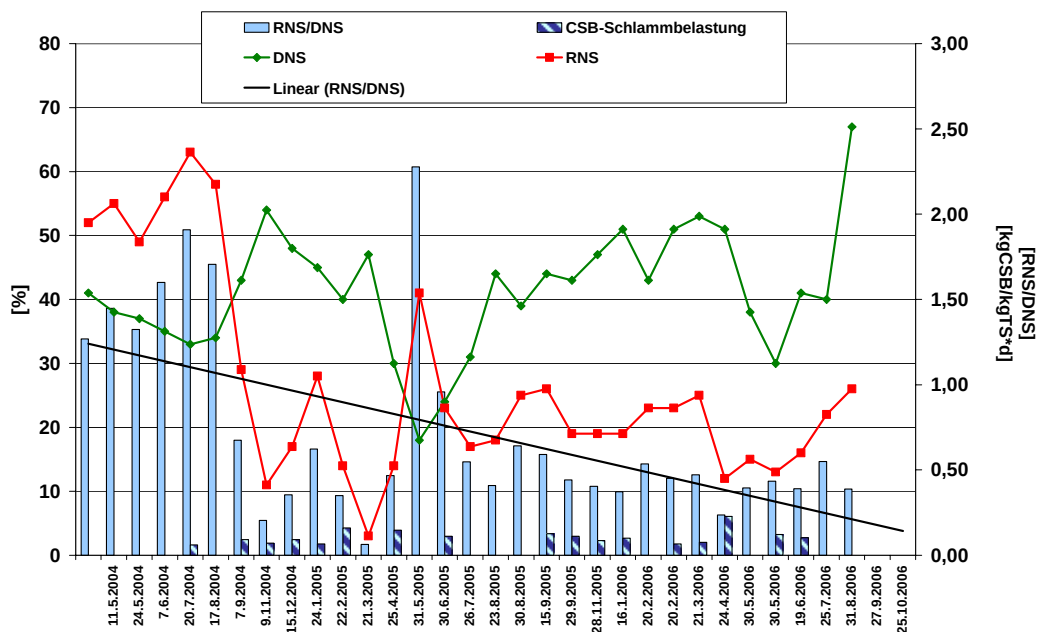


Abbildung 5-1: Darstellung der Nukleinsäuren DNS- und RNS-Färbungen über den Versuchszeitraum (Acridin-Orange-Färbungen)

5.2 Charakterisierung des Belebtschlammes und Permeates des GKW Nordkanal

Die gebundenen EPS im Belebtschlamm des GKW Nordkanal zeigen jahreszeitliche Schwankungen mit höheren EPS-Gehalten pro g Trockensubstanz bei tiefen Abwassertemperaturen. Dies kann durch die Stresssituation für Mikroorganismen im Winter bedingt sein, da solche Situationen zur erhöhten EPS-Bildung führen können. Den höchsten Anteil der gebundenen EPS bilden Huminsäuren mit einem Mittelwert (der gesamten Proben

2004-2006) von 17.3 ± 5.7 mg/g Trockensubstanz (TS), gefolgt von Proteinen mit 8.9 ± 3.2 mg/g TS und Polysacchariden mit 6.4 ± 1.7 mg/g TS. Nukleinsäure DNS war mit einem Mittelwert von 0.7 ± 0.4 mg/g TS nur in unbedeutenden Mengen vorhanden. Die Konzentration an Uronsäuren, eine spezielle Art von Polysacchariden, betrug 2.6 ± 1.1 mg/g TS (Abbildung 5-2).

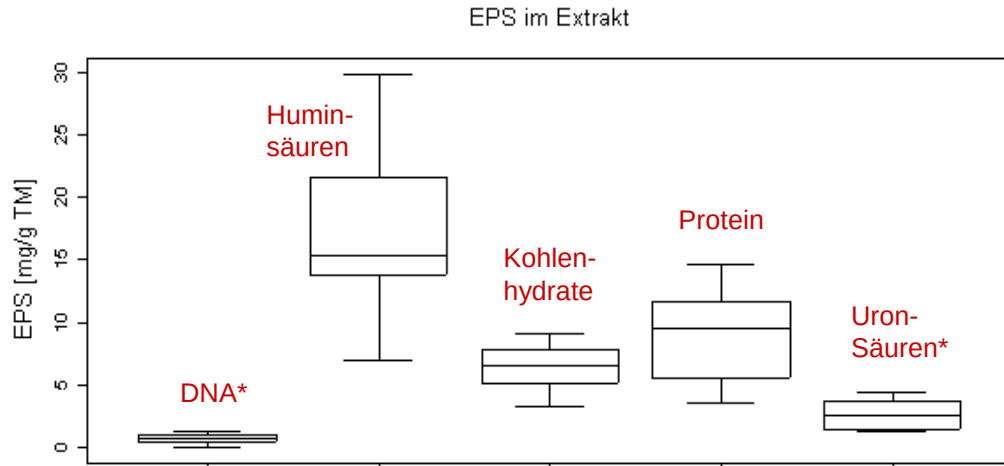


Abbildung 5-2: Boxplot der einzelnen EPS-Bestandteile im Extrakt des Belebtschlammes des GWK Nordkanal. (* Uronsäuren und DNA wurden nur bei einem Teil der Proben bestimmt).

Gelöste EPS im Überstand des Belebtschlammes der KA Nordkanal bestehen zum größten Teil aus Huminsäuren (24.8 ± 10.9 mg/L). Einen geringeren Anteil tragen Proteine (2.4 ± 4.1 mg/L) und Polysaccharide (3.6 ± 2.9 mg/L) dazu bei. Die gelösten Huminsäuren passieren die Membran und sind in vergleichbaren Konzentrationen (16.2 ± 8.8 mg/L) im Permeat wieder zu finden. Dagegen wurden Proteine mit einer Ausnahme (Dez. 2004) nie und Polysaccharide selten im Permeat detektiert.

Der Metallgehalt im Belebtschlamm des GWK Nordkanal variiert ebenfalls über der Beobachtungsdauer, wobei die Schwankungen hauptsächlich auf den Gehalt an Eisen zurückzuführen sind, während Calcium, Magnesium und Aluminium mit wenigen Ausnahmen kaum Veränderungen zeigen (Abbildung 5-3).

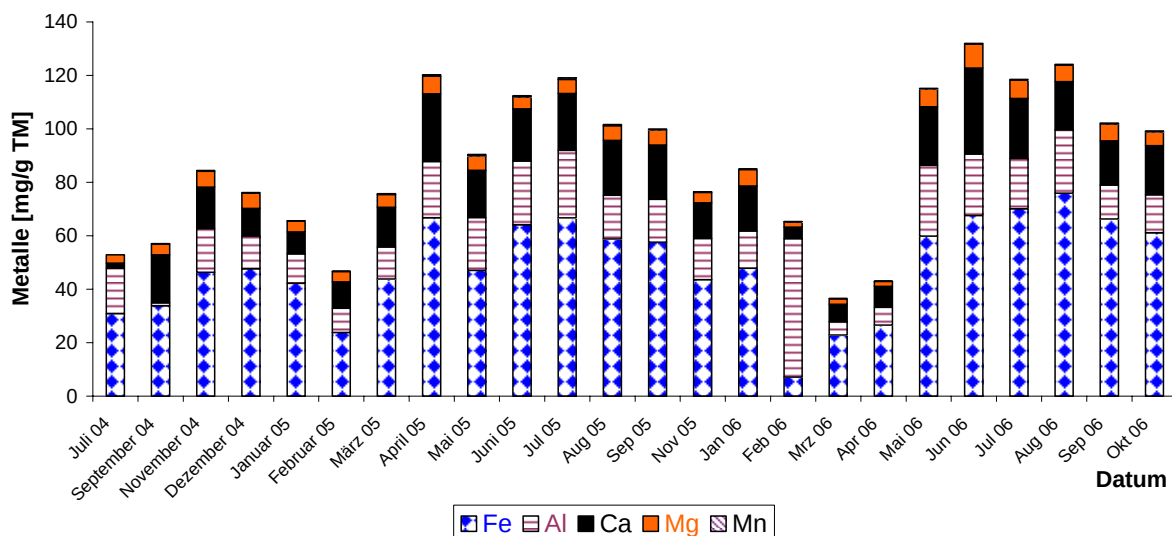


Abbildung 5-3: Metalle im Belebtschlamm des GWK Nordkanal. Die Bestimmung erfolgte nach Säureaufschluss des getrockneten Schlamm-Pellets.

Der Anteil an Fettsäuren beträgt im Extrakt (gebundene EPS) 0.5 – 9.7 %, im Überstand (gelöste EPS) 0.8 – 5.5 % und im Permeat 0.6 – 5.8 % der Gesamt-EPS. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass in Nordkanal der größte Teil detektierter Fettsäuren bakteriellen Ursprungs ist, dass aber zusätzlich weitere Fettsäuren als Bestandteil von Huminsäuren eine Rolle spielen können. Ob dieser relativ geringe Anteil von Fettsäuren an den EPS eine spezielle Bedeutung für das Membranfouling hat, konnte innerhalb des gegebenen Untersuchungszeitraums für Nordkanal nicht festgestellt werden.

Die Anwendung der FT-IR zum qualitativen Nachweis verschiedener EPS in den Proben wurde getestet. Es wurde das Vorkommen der bereits über photometrische Methoden nachgewiesenen Substanzklassen bestätigt (Amidbanden für Proteine, Polysaccharidbanden für Kohlenhydrate, Fettsäuren als Bestandteil von Lipiden sowie in Huminsäuren) (Abbildung 5-4). Die Intensitäten der FT-IR Banden nahmen in folgender Reihenfolge ab: Extrakt (gebundene EPS des Belebtschlammes) > Überstand (gelöste EPS) > Permeat > Membraneluat (gebundene EPS der gefaulten Membranen).

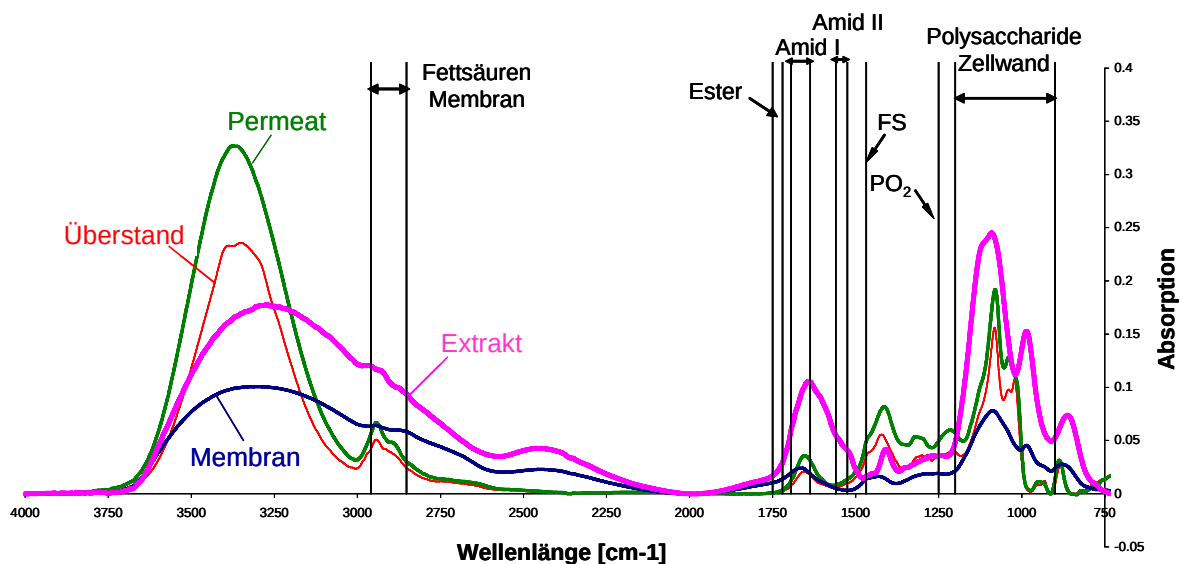


Abbildung 5-4: FT-IR Spektren von Proben der KA Nordkanal im Vergleich: EPS aus Permeat, Belebtschlammüberstand und Extrakt (gebundene EPS des Belebtschlammes) sowie ein Membranextrakt. Die charakteristischen Bereiche für typische Substanzklassen sind eingezeichnet.

Auch wenn mit den Messwerten des GKW Nordkanal nicht der komplette Bereich der verschiedenen TS-Gehalte abgedeckt werden konnte, wurde eine gute Übereinstimmung der scheinbaren Viskosität von Belebtschlamm aus Membranbelebungsanlagen mit dem Berechnungsansatz von Rosenberger et al. (2002) deutlich (Abbildung 5-5).

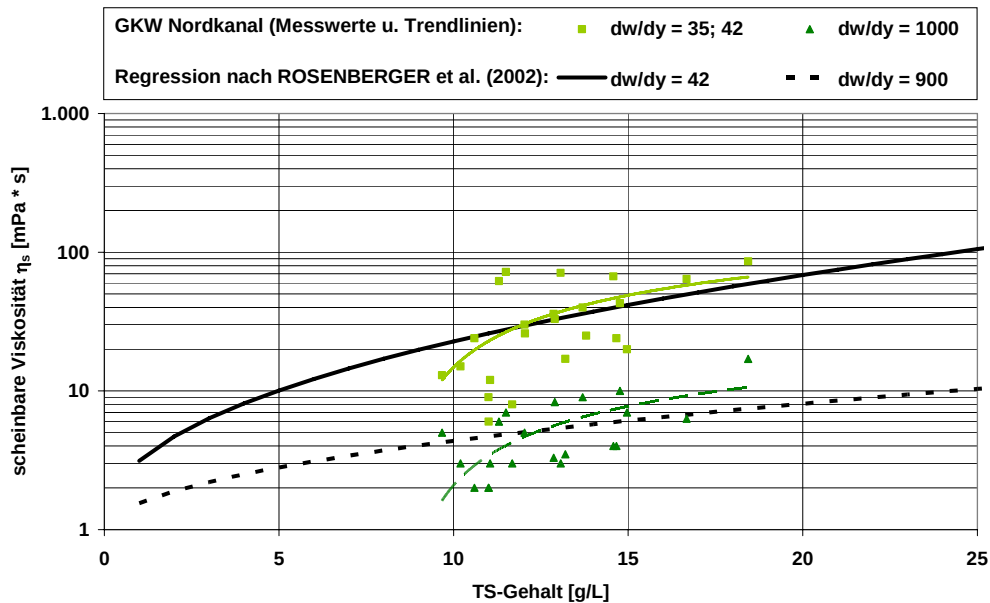


Abbildung 5-5: Scheinbare Viskosität des belebten Schlammes des GKW Nordkanal im Vergleich zur Regression nach Rosenberger et al. (2002).

Der Schlammvolumenindex ISV der belebten Schlämme des GKW Nordkanal lag konstant unter 120 ml/g und zeigt damit eine gute Absetzbarkeit. Der ISV bewegt sich dabei unabhängig vom Trockensubstanzgehalt in dem Bereich von rund 60 – 110 ml/g , wobei die meisten Messwerte um 90 ml/g zu finden waren.

Die untersuchten Belebtschlämme des GKW Nordkanal wiesen alle Capillary Suction Time (CST)-Werte unterhalb von 60 s auf, wobei der für Membranbelebungsanlagen interessante Bereich für einen TS-Gehalt von 11 bis 13 g/l eindeutig CST-Werte unterhalb von 40 s aufwies. Für Klärschlämme mit einem TR-Gehalt von mindestens 2% wird ein Schlamm mit einem CST-Wert < 80 s als gut entwässerbar bezeichnet. Abgesehen von wenigen Ausreißern, scheint der ISV und der CST bei niedrigen Temperaturen zu und bei höheren Temperaturen abzunehmen. Werden die Ergebnisse der Filtrierbarkeit (FI_{15}) mit den CST-Werten und ISV-Werten korreliert, wird deutlich, dass ein schlechter filtrierbarer Schlamm tendenziell auch eine schlechtere Entwässerbarkeit und schlechteres Absetzverhalten aufweist.

Eine weitere Korrelation ergibt sich beim Vergleich der EPS-Konzentrationen mit dem FI_{15} (Abbildung 5-6). Es zeigt sich eine schlechtere Filtrierbarkeit des Schlammes mit höheren EPS-Gehalten, also in der kalten Jahreszeit (niedrigere FI_{15} -Werte); Umgekehrtes gilt für höhere FI_{15} -Werte.

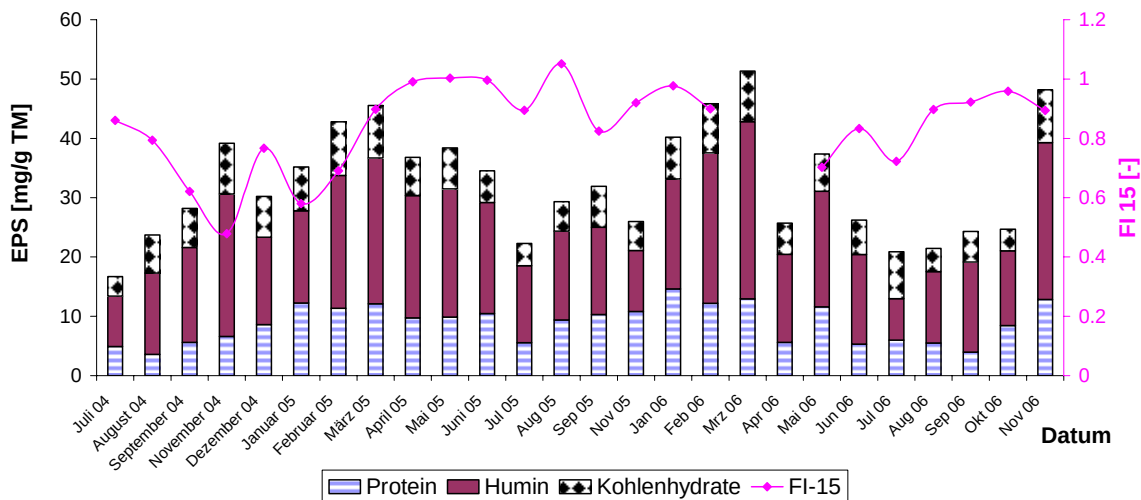


Abbildung 5-6: Gebundene EPS aus dem Belebtschlamm der KA Nordkanal im Vergleich zum Filtrationsindex FI₁₅ über den Probenahmezeitraum von 2004-2006

6 Vergleichendes Screening kommunaler Belebtschlämme hinsichtlich foulingbildender Substanzen

Zur Verifizierung der Ergebnisse des GKW Nordkanal wurden die großtechnischen Vergleichsanlagen Seelscheid, Rödingen, Simmerath und die Pilotanlage Eilendorf untersucht. Die Analysen zeigten, dass die gemessenen Konzentrationen gebundener Proteine, Huminsäuren, Polysaccharide, DNA und Uronsäuren der Vergleichsanlagen in der gleichen Größenordnung lagen wie die Werte des GKW Nordkanal (Abbildung 6-1). Auch die weiteren untersuchten Parameter zeigten ähnliche Tendenzen.

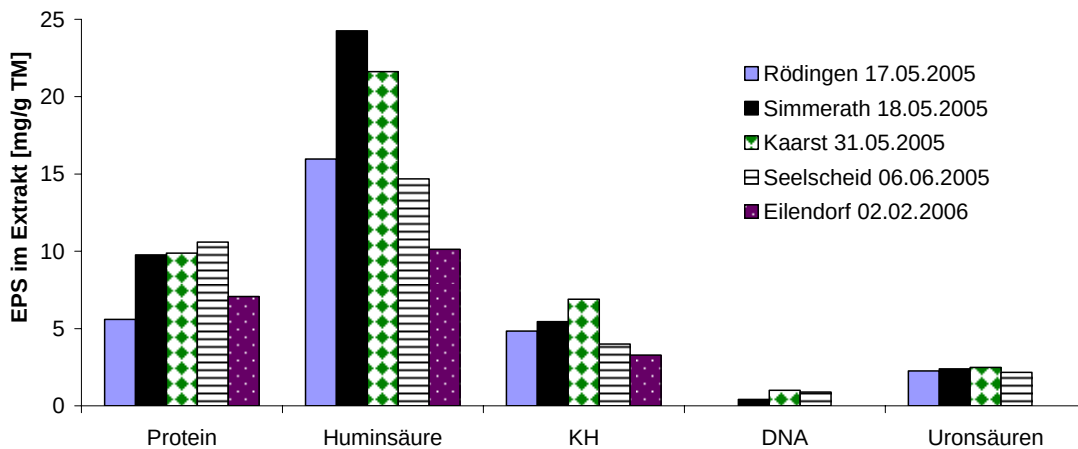


Abbildung 6-1: Gebundene EPS im Belebtschlamm verschiedener Kläranlagen im Vergleich zur KA Nordkanal

7 Einfluss von Betriebsparametern auf die Leistungsfähigkeit von Membranen

Um den Einfluss unterschiedlicher Betriebsparameter gezielt zu untersuchen wurden innerhalb des Projektes insgesamt fünf Pilotanlagen betrieben:

- 1) ZENON®-Pilotanlage
- 2) PURON®-Pilotanlage
- 3) PURON®-MBR-Pilotanlage
- 4) Kubota®/PURON®-Referenzanlagen.

7.1 Einfluss der hydraulischen Belastung der Membranen

Die starke Abhängigkeit der Foulingrate vom transmembranen Fluss und damit die Bedeutung unterkritischer Bedingungen für eine wirksame Foulingkontrolle wurden beim Betrieb der einzelnen Stränge der PURON®-MBR auf unterschiedlichen Flussniveaus deutlich (Abbildung 7-1). Ebenso konnte gezeigt werden, dass starkes Fouling unter überkritischen Bedingungen durch eine Verringerung des Flusses und eine daraus erfolgende Rückbildung der Deckschicht teilweise reversibel ist. Im Betrieb mit hohem Fluss und einer anschließenden Entspannungsphase bei niedrigem Fluss konnten dadurch, bei gleichem Gesamtfiltrationsvolumen, Permeabilitäten in der gleichen Größenordnung wie bei einer konstanten Filtration auf mittlerem Niveau erreicht werden. Die Steigerung des Flusses einer bei unterkritischen Bedingungen gefaulten Membran verursacht eine stärkere Foulingzunahme als ein von Beginn an hoher Filtrationsfluss. Eine mögliche Ursache könnte die Kompaktierung der bei niedrigem Fluss gebildeten Deckschicht durch die Erhöhung des Flussniveaus und die daraus resultierende Steigerung des Deckschichtwiderstandes sein.

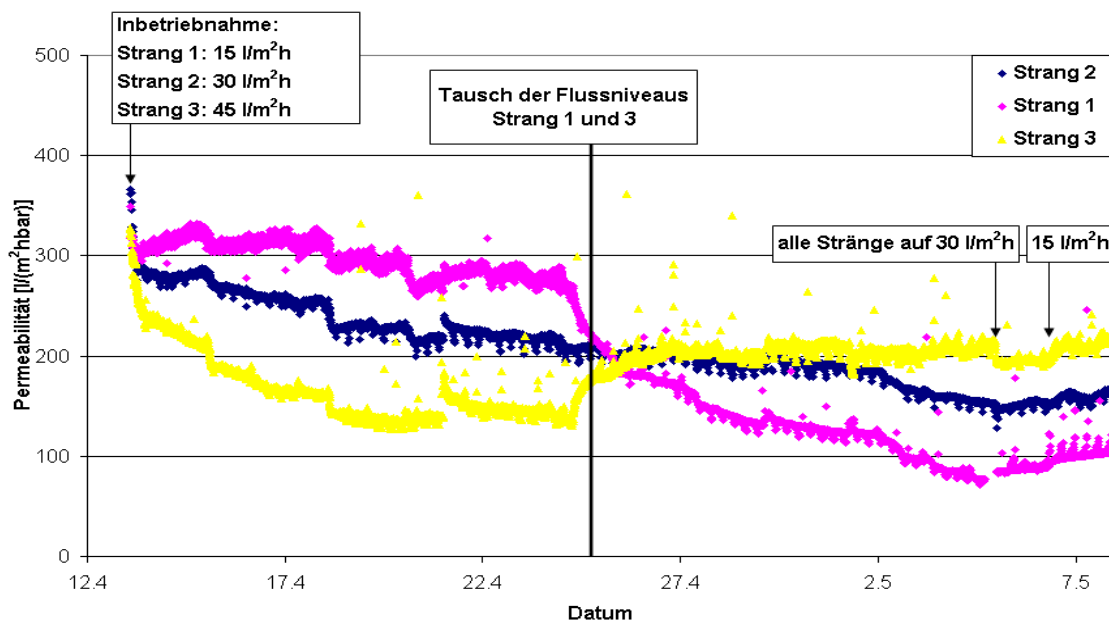


Abbildung 7-1: Permeabilitätsverlauf der ersten Versuchreihe

Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch bei der PURON®-Anlage im GKW Nordkanal. Während bei Flüssen $< 25 \text{ L}/(\text{m}^2\text{h})$ eine wirksame Foulingkontrolle möglich ist, steigt das Fouling im überkritischen Bereich bei Flüssen $> 25 \text{ L}/(\text{m}^2\text{h})$ überproportional an und verblockt die Membran innerhalb kürzester Zeit (Abbildung 7-2).

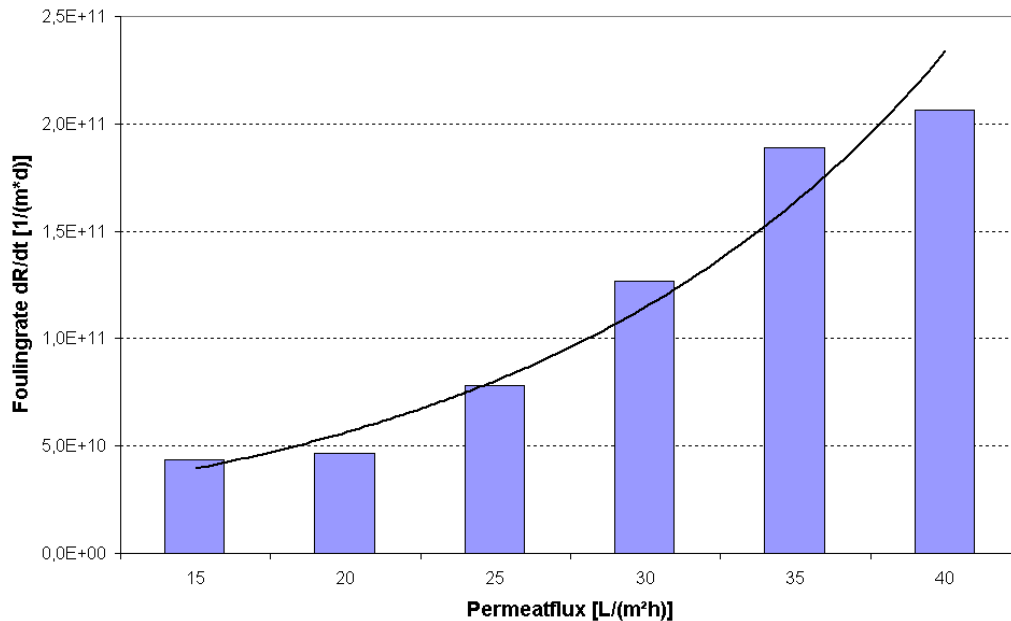


Abbildung 7-2: Foulingraten der PURON®-Pilotanlage GKW Nordkanal

7.2 Einfluss der Luftblasenüberströmung

Die Betrachtung des Foulingverhaltens bei unterschiedlichen Belüftungsintensitäten bestätigte mit beiden Pilotanlagen die Resultate der unter gleichen Bedingungen durchgeführten Critical Flux-Bestimmung. Während bei der Pilotanlage in Eilendorf eine Belüftungsintensität $> 0,3 \text{ m}^3/(m^2 \cdot h)$ keine nennenswerte Foulingminderung bewirkte, konnte bei der Pilotanlage auf dem GKW Nordkanal eine deutliche Verringerung der Foulingrate festgestellt werden (Abbildung 7-3). Zudem wurde eine höhere Effizienz der gepulsten Luftspülung gegenüber der kontinuierlichen Belüftung nachgewiesen.

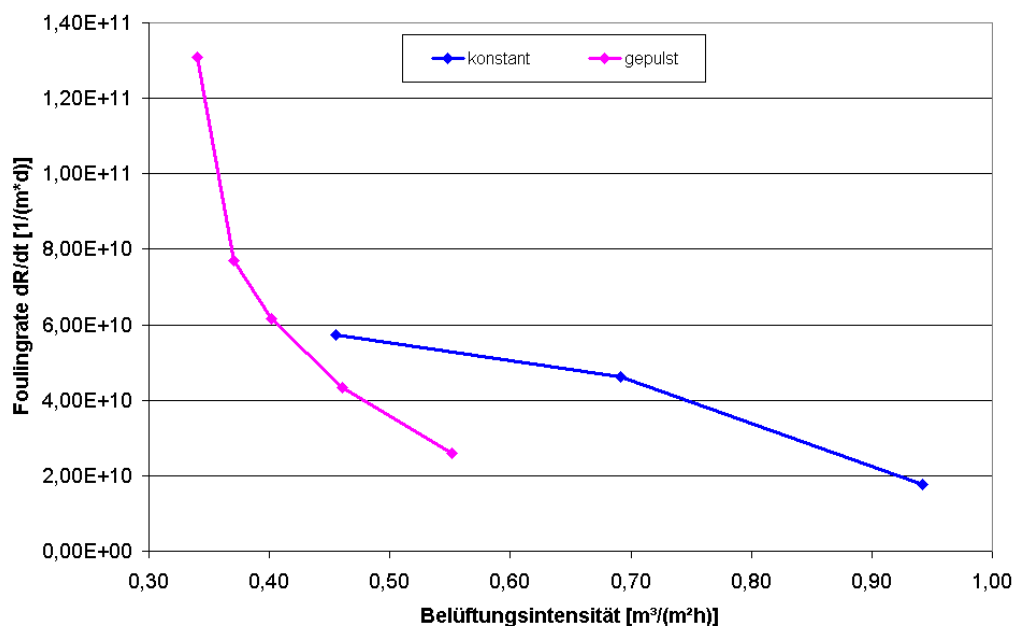


Abbildung 7-3: Variation der Belüftung

7.3 Einfluss des Schlammalters

Durch den parallelen Betrieb zweier Versuchsanlagen (Referenzanlagen) auf der Kläranlage Aachen-Soers wurde der Einfluss unterschiedlichen Schlammalters untersucht. Die gewählten Schlammalter von 15 d und 30 d waren sehr ähnlich und entsprachen realistischen Bedingungen. Die in unseren Versuchen beobachteten EPS-Konzentrationen sowohl im Schlamm (gebunden und gelöst) als auch auf den Membranen implizieren eine höhere Fouling-Neigung des MBR bei 15 d Schlammalter im Vergleich zu 30 d (Abbildung 7-4).

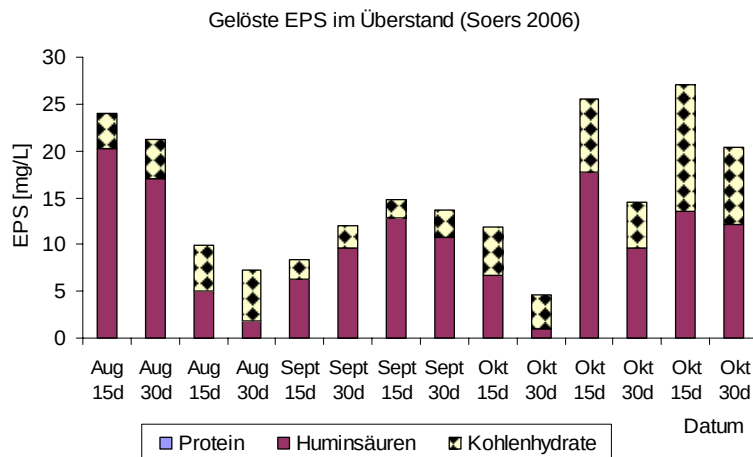


Abbildung 7-4: Gelöste EPS aus den Belebtschlammüberständen der Referenzanlagen mit verschiedenen Schlammaltern (15 d und 30 d) August – Oktober 2006

Außerdem wurde eine schlechtere Filtrierbarkeit, geringere Absetzbarkeit und geringere Entwässerbarkeit des Schlammes bei 15 d Schlammalter festgestellt (Abbildung 7-5).

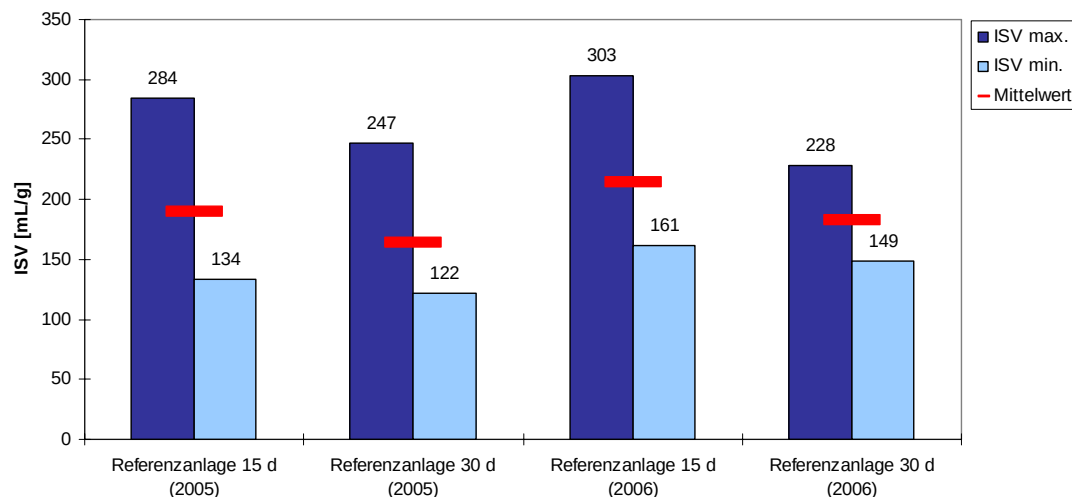


Abbildung 7-5: ISV (ml/g) für die Referenzanlagen

8 Wirkung und Effektivität unterschiedlicher Reinigungschemikalien

Es wurde festgestellt, dass die Permeabilitäten einzelner entnommener Hohlfasern deutliche Unterschiede aufwiesen. Außerdem konnte gezeigt werden, dass der relative Reinigungserfolg abhängig ist vom Ausgangszustand der Membran ist, d.h. je geringer die Ausgangspermeabilität, umso höher ist der prozentuale Permeabilitätsgewinn (Abbildung 8-1).

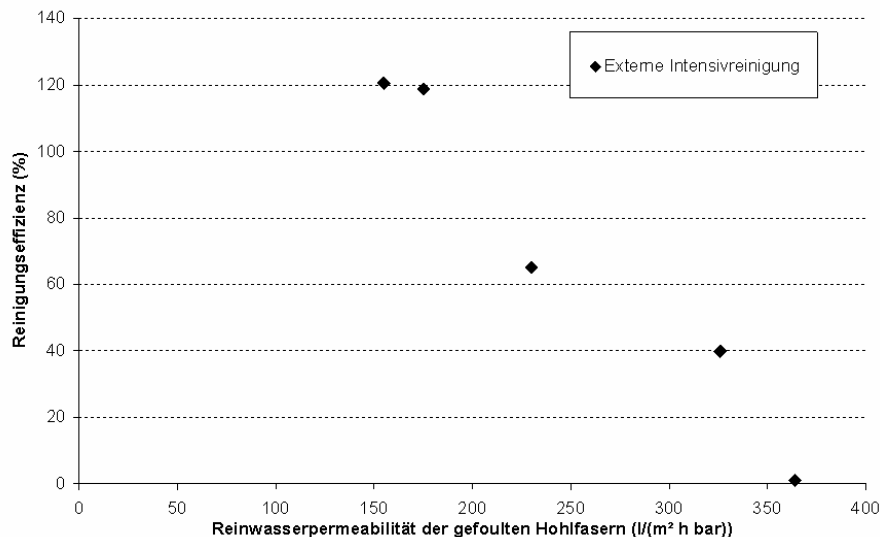


Abbildung 8-1: Effizienz der Reinigung in Abhängigkeit der Ausgangspermeabilität

Die chemische Reinigung beeinflusst die Trenngrenze der Membranen, die für die gereinigten Fasern deutlich größer bestimmt wurde bzw. nicht mehr bestimmt werden konnte. Die Ergebnisse zeigten, dass durch häufige chemische Reinigungen ein stabiles und hohes Permeabilitätsniveau gewährleistet werden kann. Die Wirkung von Natriumhypochlorit konnte bei neutralem pH-Wert deutlich intensiviert werden, so dass empfohlen wird auf die übliche Einstellung eines basischen pH-Wertes zu verzichten (Abbildung 8-2).

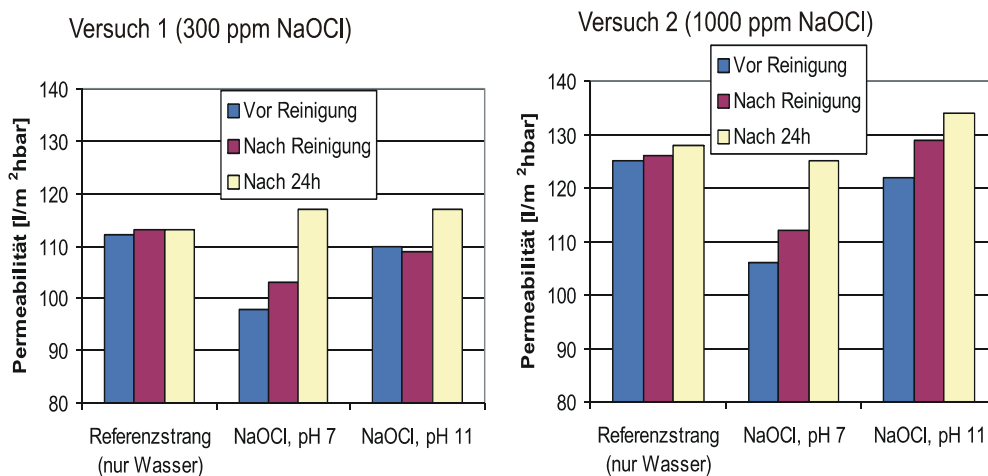


Abbildung 8-2: Reinigungserfolg Versuch 1 und 2

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine umfassende Charakterisierung foulingverursachender Substanzen beim Membranbelebungsverfahren in der kommunalen Abwasserreinigung durchgeführt. Aufgrund neuerer Literatur wurde eine Methode zur Charakterisierung von Fouling und potentiellen Foulingkomponenten adaptiert.

Durch Testzellenversuche wurden die Einflüsse potentieller Foulanten gezielt untersucht. Dabei wurden Einflüsse des Membranmaterials und die Milieubedingungen der Modelllösungen variiert, um Wechselwirkungen zwischen Foulant und Membran zu untersuchen.

Mit Hilfe eines umfassenden langfristigen Monitoring des GKW Nordkanal wurden die Einflüsse potentieller Foulanten gezielt untersucht. Dabei wurden vor allem saisonale Abhängigkeiten detektiert. Durch die parallele Bestimmung der Schlammeigenschaften kann eine Korrelation der Zusammensetzung des Belebtschlammes mit Schlammeigenschaften (Absetzbarkeit, Entwässerbarkeit, Filtrierbarkeit) erfolgen. Mithilfe des Vergleiches mit der Filtrationsleistung der Membranstufe können die Einflüsse der Schlammzusammensetzung für den realen Anwendungsfall bewertet werden.

Durch den Betrieb von Pilotanlagen wurde der Einfluss von Betriebsbedingungen auf die Entwicklung der Filtrationsleistung untersucht. Aus der Bewertung der Einflussgrößen können geeignete Betriebsstrategien zur Foulingkontrolle abgeleitet werden.

Die Wirkung und Effizienz von Reinigungschemikalien wurde im Labormaßstab mittels einer 2-Strang-Einzelfasertestanlage untersucht. Dazu wurden real gefoulte Membranfasern von Membranbelebungsanlagen entnommen und repräsentativ gereinigt. Dabei stellte sich die im Labor simulierte On-Air-Reinigung als gering wirksam heraus.

Im Pilotbetrieb wurden verschiedene Reinigungsprozeduren gezielt untersucht. Möglichst kurze Filtrationsintervalle stellten sich dabei als besonders günstig für ein stabiles und hohes Permeabilitätsniveau heraus. Dies konnte in einer gesonderten, mit dem Betrieb des GKW Nordkanal abgestimmten, Pilotuntersuchung auch für den großtechnischen Anwendungsfall nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse zusammenfassend können Betriebsstrategien für eine effiziente Foulingkontrolle in kommunalen Membranbelebungsanlagen abgeleitet werden.

Danksagung

Dem Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen wird für die Finanzierung des Projektes gedankt.