



Membrantechnik

in der Wasseraufbereitung
und Abwasserbehandlung

– Perspektiven, Neuentwicklungen und
Betriebserfahrungen im In- und Ausland –

T. Melin, J. Pinnekamp, M. Dohmann



**6. Aachener Tagung
Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik**

Der Einsatz von druckgetriebenen Membranverfahren wie Mikro- und Ultrafiltration sowie der Nanofiltration wird in weiter fortschreitendem Maße in vielen Bereichen der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung realisiert. In Deutschland und anderen europäischen Ländern sind mehrere Großanlagen und eine Vielzahl von Pilotanlagen zur Trinkwasseraufbereitung, Filterrückspülwasserbehandlung sowie zur kommunalen Abwasserbehandlung mit Membrantechnik im Betrieb. Die Aufbereitung von Abwasser zur Wiederverwendung und die Schließung von Wasserkreisläufen ist ein verstärkt zu beachtender Einsatzbereich für Membranverfahren, die so zu nachhaltigen Wasserwirtschaftskonzepten beitragen können. Die Perspektiven für den Einsatz von Membranverfahren in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung hängen neben den technisch-wirtschaftlichen Aspekten auch von politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen ab. Strenge Anforderungen an Gewässergüte und die Sicherung der Qualität von Trink- und Brauchwasser lassen die Membrantechnik für viele Aufbereitungsaufgaben als das Verfahren der Wahl erscheinen.

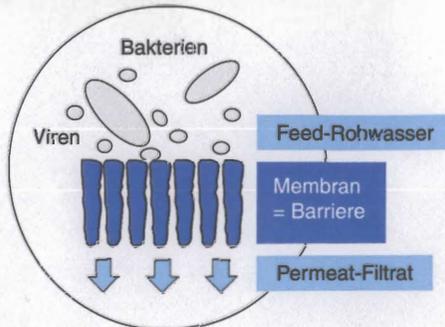
In diesem Buch werden Betriebserfahrungen mit Membrananlagen vor allem in der kommunalen Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung vorgestellt sowie anwendungsnahe Erkenntnisse aus dem wissenschaftlichen Bereich dargestellt. Neueste Entwicklungen nahezu aller am Markt vertretenden Anbieter von Membransystemen für diesen Anwendungsbereich werden vorgestellt. In ca. 70 Fachbeiträgen von Autoren aus Forschung, Behörden, Membranherstellern sowie aus Anlagenplanung und Anlagenbau wird der aktuelle Stand der Technik dokumentiert. Darüber hinaus werden zentrale Fragestellungen diskutiert. Dabei stehen insbesondere Aspekte der Betriebssicherheit sowie der Wirtschaftlichkeit im Vordergrund.

Das Buch erscheint als Tagungsband zur 6. AACHENER TAGUNG Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, die von den Hochschulinstituten für Verfahrenstechnik (IVT) und Siedlungswasserwirtschaft (ISA) veranstaltet wird.

Organisation:

Dipl.-Ing. K. Tarnacki
Dipl.-Ing. T. Wintgens
IVT Aachen

Dr. rer. nat. M. Krumm
ISA Aachen



ISBN 3-921955-28-9



Membrantechnik

**in der Wasseraufbereitung
und Abwasserbehandlung**

**-Perspektiven, Neuentwicklungen und
Betriebserfahrungen im In- und Ausland -**

**Univ. Prof. Dr.-Ing. T. Melin
Institut für Verfahrenstechnik (IVT)**

**Univ. Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA)**

**Univ. Prof. Dr.-Ing. M. Dohmann
Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA)**

**Begleitbuch zur 6. AACHENER TAGUNG
Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik
26. - 27. Oktober 2005**

Aufbereitung von Kläranlagenablauf mit dem PAK-NF-Prozess

Inhalt

- 1 Einleitung und Problemstellung
- 2 Grundlagen
 - 2.1 Untersuchte Aktivkohlen
 - 2.2 Rohwasser
 - 2.3 Pilotanlage und Membranmodule
- 3 Wirkung der Aktivkohle auf die organische Fracht
- 4 Ergebnisse der Pilotversuche bzgl. Fouling
- 5 Ergebnisse der Pilotversuche bzgl. Pemeatqualität und Anlagenrückhalt
- 6 Kostenschätzung
- 7 Zusammenfassung
- 8 Literatur

Autoren:

Johannes Meier, Thomas Melin
Institut für Verfahrenstechnik der RWTH Aachen
Turmstr. 46, 52056 Aachen
+49 (0)241 80-95428
meier@ivt.rwth-aachen.de

1 Einleitung und Problemstellung

Der Ablauf biologischer Kläranlagen als Quelle für wiederverwendbares Wasser rückt auch in Ländern mit traditionell ausreichenden Trinkwasserreserven immer mehr in den Mittelpunkt des Interesses. Dabei reicht das Spektrum der möglichen Verwendungen des wiedergewonnen Wassers von industriellem Brauchwasser über Wasser zur Bewässerung bis hin zu Trink- oder hochwertigem Prozesswasser. Je höher die Qualitätsanforderungen an das Wasser sind, desto aufwendiger ist das entsprechende Aufbereitungsverfahren.

Nimmt man die Parameter der Trinkwasserverordnung (TrinkWV) als Maßstab, sind im Ablauf biologischer Kläranlagen vor allem die mikrobiologischen Parameter und die organischen Parameter CSB (bzw. Oxidierbarkeit) und die Färbung problematisch. Für industrielle Anwendungen wie z.B. die Verwendung als Kesselspeisewasser sind aber auch die anorganischen Parameter wie Leitfähigkeit oder Härte von Bedeutung.

Die Nanofiltration (NF) ist in der Lage ein bzgl. der mikrobiologischen Parameter und der zweiwertigen Ionen hochwertiges Permeat zu erzeugen. Auch bzgl. der organischen Parameter ist die Reinigungsleistung einer NF sehr gut. Problematisch könnten hier allerdings organische Spurenstoffe und die NOM-Fraktion unterhalb von 200-300 g/mol sein.

Ein weiteres Problem bei der Aufbereitung von Kläranlagenablauf mit Hilfe einer NF ist das Membran-Fouling.

In dem vorliegenden Vortrag wird über Pilotversuche zum Einsatz des PAK-NF-Prozess als Verfahren zur Aufbereitung von Kläranlagenablauf berichtet. Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine Kombination aus Adsorption an Pulveraktivkohle (PAK) und Nanofiltration (NF), bei der das Adsorbens in den Zulauf der NF dosiert wird.

Ziel der PAK-Zugabe ist zum einen die Verbesserung der Reinigungsleistung bzgl. der organischen Parameter und zum anderen über die vorgeschaltete Entfernung von Fouling-verursachenden Substanzen und eine Wirkung als Filterhilfsmittel oder Turbulenz-Promotor ein reduziertes Membran-Fouling.

Eine ähnliche Kombination aus PAK-Adsorption und Ultrafiltration (UF) wird in Frankreich bereits seit Mitte der neunziger Jahre zur Aufbereitung von Oberflächenwasser zu Trinkwasser eingesetzt [1]. Die PAK wird hier zur Entfernung von organischen Spurenstoffen und Geruchsstoffen und zur Reduzierung der organischen Hintergrundbelastung im Permeat eingesetzt.

2 Grundlagen

2.1 Untersuchte Aktivkohlen

Insgesamt wurden vier verschiedene Pulverkohlen untersucht (s. Tabelle 1), darunter drei Aktivkohlen und mit mahlaktiviertem Herdofenkoks (HOK) ein preiswertes Adsorbens mit vergleichsweise kleiner innerer Oberfläche.

Tabelle 1: Untersuchte Aktivkohlen

	HOK (mahlaktivierter Herdofenkoks)	PAK 1000	PAK 1000 K	SAE Super
Hersteller	RWE	CarboTech	CarboTech	Norit
Rohstoff	Braunkohle	Kokosnuss	Steinkohle	Diverse
Spezifische Oberfläche, m ² /g	350	> 900	> 1000	1300
d ₅₀ , µm	24			15
Spez. Preis, €/t	300	950	875	1200

Aufgrund der jeweiligen Leistungsfähigkeit bzgl. der Entfernung der NOM (Natural Organic Matter, s. Abschnitt 3) und des spezifischen Preises wurden PAK 1000 K und HOK für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

In den Abbildungen 1 und 2 sind REM-Aufnahmen der beiden Adsorbentien dargestellt. Im Vergleich zu HOK hat die PAK 1000 K eher splitterartige Partikel und eine glattere Oberfläche.

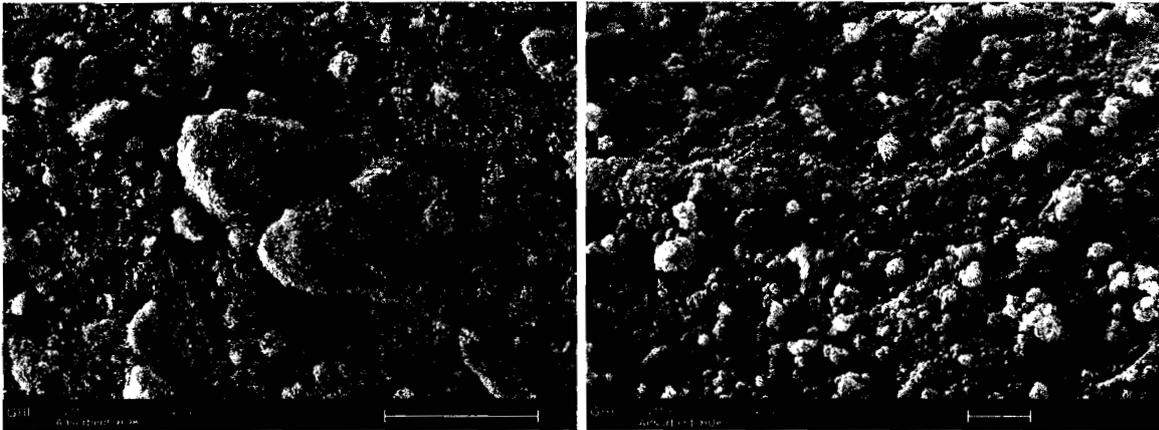


Abbildung 1 REM-Aufnahmen von HOK-Partikeln

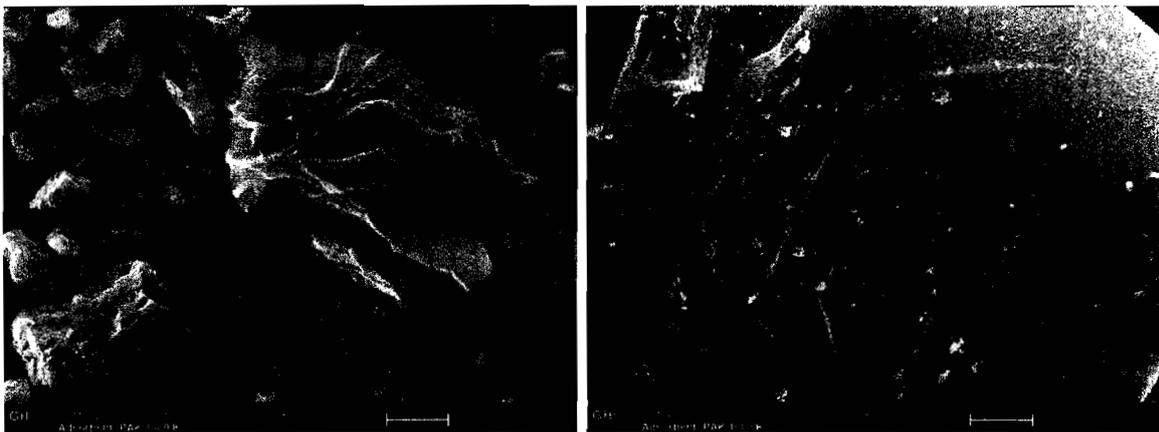


Abbildung 2: REM-Aufnahmen von PAK 1000 K - Partikeln

Die Partikelgrößenverteilungen der beiden Adsorbentien sind sehr ähnlich. Beide Adsorbentien weisen Partikel im Bereich von 0,1 μm bis etwa 200 μm auf.

2.2 Rohwasser

Das Rohwasser für die Aufbereitung ist der Ablauf des Sandfilters der Kläranlage Aachen Soers, der einer vergleichsweise weitgehenden biologischen Behandlung sowie der Nachklärung folgt.

Trotz der weitgehenden Reinigung ist der Fouling-Index des Kläranlagenablaufs immer noch hoch. Der SDI (Silt Density Index) und der MFI (Modified Fouling Index, /2/) liegen bei 5,6 bzw. 86. Der empfohlene Bereich für NF liegt bei 0-3 (SDI) bzw. 0-10 (MFI).

In Tabelle 2 sind einige Parameter des Sandfilterablaufs dargestellt. Ebenfalls dargestellt sind die entsprechenden Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkWV), die als Bewertungsrichtlinie herangezogen wurde.

Tabelle 2 Parameter des Sandfilterablaufs (* = Grenzwert für die Oxidierbarkeit)

Parameter	Einheit	Grenzwert Trink- WV	Me- dian	Mittel- wert	95%- Konfi- denz	Analysen (gesamt/über Nachweisgr./ über Grenzw.)
CSB	mg/l	5*	16,5	17,3	+/- 1,2	61/61/61
UVA ₂₅₄	m ⁻¹	-	12,9	13,0	+/- 0,4	59/59/-
Färbung (UVA ₄₃₆)	m ⁻¹	0,5	0,87	0,86	+/- 0,04	62/62/61
Escherichia Coli	KBE/ 100 ml	0	440	973	+/- 694	18/18/18
Coliforme Bakt.	KBE/ 100 ml	0	6000	8731	+/- 3475	18/18/18
KBE, 22°C	KBE/ 1 ml	100	820	7183	+/- 11866	18/18/18
KBE, 36°C	KBE/ 1 ml	20	410	1194	+/- 1057	18/18/18
Sulfat	mg/l	240	88,5	85,9	+/- 3,4	84/84/0
Chlorid	mg/l	250	158	169	+/- 15,9	66/66/8
Leitfähigkeit	µS/cm	2500	981	985	+/- 56,1	68/68/0
pH-Wert	-	-	7,8	7,8	+/- 0,1	61/61/-

Man erkennt, dass die Grenzwerte für CSB und Färbung in fast allen Proben überschritten wurden. Gleiches gilt für die mikrobiologischen Parameter. Bzgl. der anorganischen Parameter gibt es nur einige Überschreitungen des Chlorid-Grenzwertes, der durch den Einsatz von Streusalz im Winter verursacht wurde.

2.3 Pilotanlage und Membranmodule

Die Pilotversuche wurden auf der Kläranlage Aachen Soers durchgeführt. Das Fließbild der permeatflussgesteuerten Anlage ist in Abbildung 3 dargestellt.

Der Vorlagebehälter hat ein Volumen von etwa 580 l und die Membrananlage ein Volumen von 50 l. Bei den gefahrenen Betriebspunkten entspricht dies mittleren Verweilzeiten von 1,45 - 1,08 h im Vorlagebehälter bzw. 0,5 - 0,38 h in der Membrananlage.

In vorgegebenen Intervallen führt die Anlage hydraulische Spülungen der Membran durch. Die hydraulischen Spülungen bestehen aus einer Permeatrückspülung mit 1 bar und einer drucklosen Cross Flow - Spülung mit dem Konzentrat in der Rezirkulationsleitung, jeweils vor und nach der Permeatrückspülung.

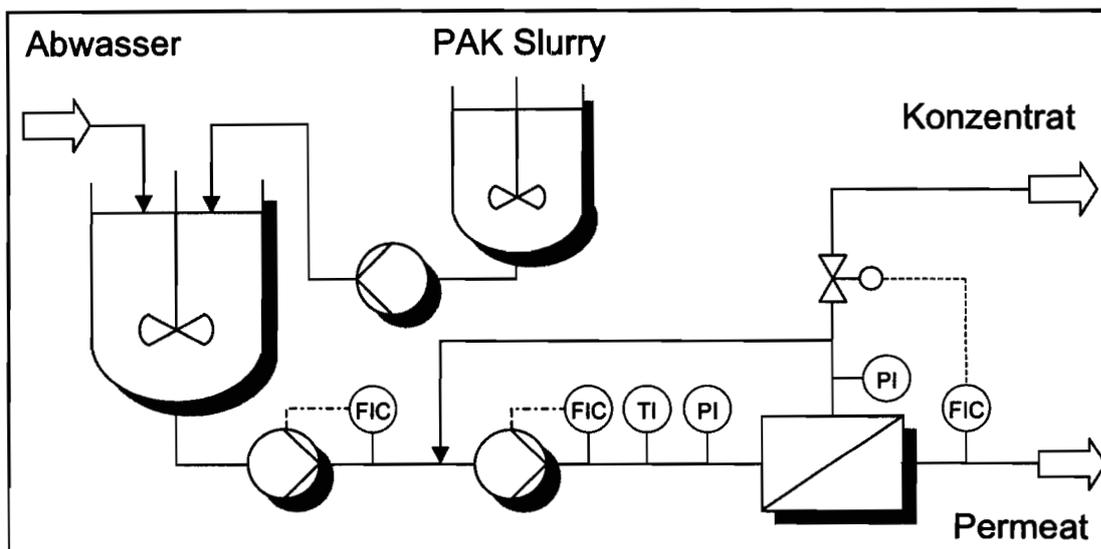


Abbildung 3: Fließbild der Pilotanlage

Zwei verschiedene Membranmodule wurden getestet (s. Tabelle 3).

Tabelle 3: Eingesetzte Membranmodule

	NF-PES-010	NF50 M10
Hersteller	Microdyn-Nadir	X-Flow
Modultyp	Wickelmodul	Kapillarmodul
Feedspacer / Kapillardurchmesser	80 mil parallel	1,5 mm
Moduldurchmesser	4"	8"
Modullänge	40"	1537 mm
Membranfläche	3,8 m ²	20 m ²
Permeabilität	5-10 l/m ² hbar	14-18 l/m ² hbar
Na ₂ SO ₄ -Rückhalt	30-60 %	92-96 %
NaCl-Rückhalt	5-15 %	30-40 %

3 Wirkung der Aktivkohle auf die organische Fracht

Im Rahmen der Pilotversuche wurde in erster Linie die Wirkung des Verfahrens auf die NOM untersucht. Zum einen soll die NOM durch das Verfahren aus dem Produkt, also dem Permeat entfernt werden. Sie verursacht eine Färbung des Wassers, bei einer nachfolgenden Desinfektion ermöglicht sie die Entstehung von als kanzerogen eingestuftem Desinfektionsnebenprodukten und sie kann zu einer Wiederverkeimung des Wassers führen.

Darüber hinaus ist die NOM für das Membran-Fouling verantwortlich. Eine weitgehende Entfernung der NOM vor dem Membran-Verfahren sollte zu einer Reduzierung des Membran-Foulings führen.

Im Folgenden sind Ergebnisse von Laborversuchen zur Wirkung der Adsorbentien auf die NOM, erfasst über die Summenparameter CSB und DOC dargestellt. In Abbildung 4 sind CSB-Isothermen in zwei unterschiedlichen Auftragungen dargestellt (72 h bei Raumtemperatur geschüttelt).

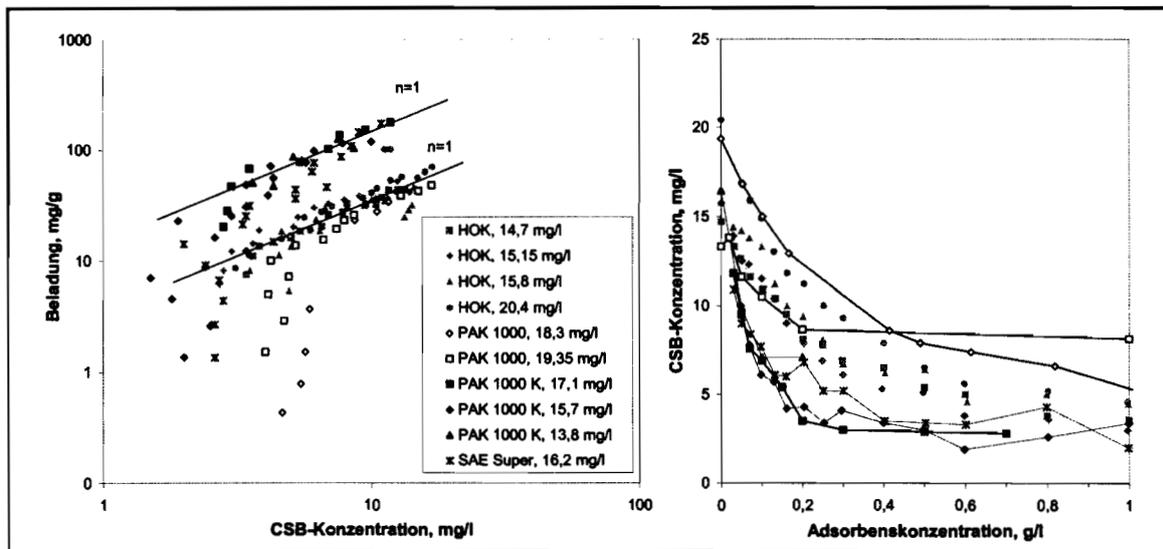


Abbildung 4: CSB-Isothermen für HOK, PAK 1000, PAK 1000 K und SAE Super

Die PAKs SAE Super und PAK 1000 K sind deutlich höher beladbar als HOK und PAK 1000. Im Falle der PAK 1000 dürfte das auf eine ungünstigere Porenradienverteilung zurückzuführen sein, im Falle des HOK auf die kleinere innere Oberfläche.

Basierend auf den Preis-Leistungsverhältnissen wurden PAK 1000 K und HOK für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

In Abbildung 5 ist die Wirkung der Adsorbentien auf die Partikelgrößenverteilung, erfasst über LC-OCD-Analyse [3] am Beispiel von HOK dargestellt. Die HOK-Dosierung bewirkt für alle Fraktionen eine Konzentrationsminderung.

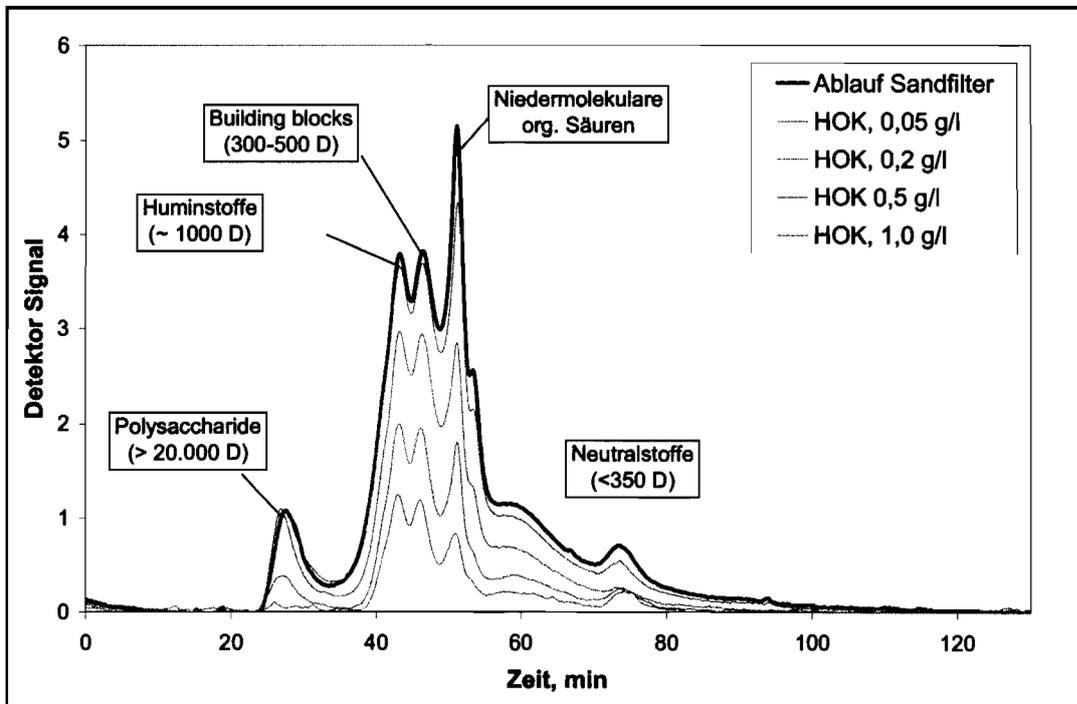


Abbildung 5: LC-OCD-Analyse der Wirkung von HOK auf den DOC im Sandfilterablauf

Insgesamt wurden fünf HOK-Konzentrationen (0,05; 0,1; 0,2; 0,5 und 1,0 g/l) und drei PAK-Konzentrationen (0,05; 0,1 und 0,2 g/l) untersucht. Die Wirkung dieser Dosierungen bzgl. der einzelnen Fraktionen sind in Abbildung 6 dargestellt.

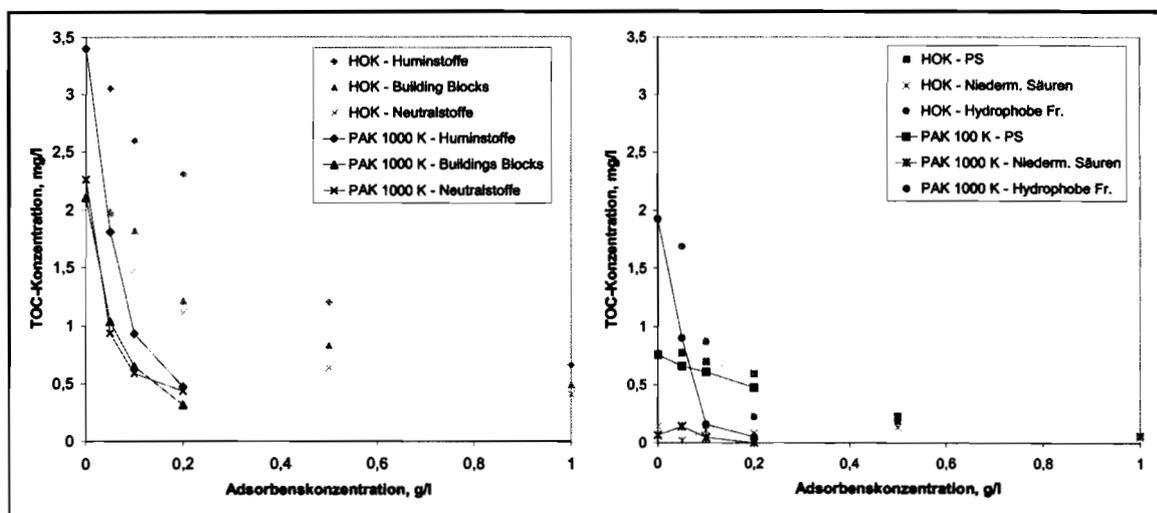


Abbildung 6: TOC-Fraktionsisothermen für HOK und PAK 1000 K, basieren auf LC-OCD-Analysen

Für die meisten Fraktionen ist die PAK 1000 K deutlich leistungsfähiger als die HOK. Sind die Konzentration, die durch Zugabe von 0,2 g/l PAK 1000 K entstehen für die meisten Konzentrationen erst durch 1,0 g/l HOK zu erreichen.

Bemerkenswert ist allerdings die Fraktion der Polysaccharide, die von beiden Adsorbentien etwa gleichgut entfernt wird. Die Polysaccharide werden oft mit dem Membran-Fouling in Verbindung gebracht.

4 Ergebnisse der Pilotversuche bzgl. Fouling

Die Frage ob und wenn ja in welchem Maß bei einem Membranverfahren Fouling auftritt, hängt von zahlreichen Parametern ab. Neben den Eigenschaften des Feeds wie z.B. die Art und die Konzentration der gelösten Stoffe und den geometrischen Eigenschaften des Membranmoduls sind vor allem die Betriebsparameter von Bedeutung. Hier sind in erster Linie die Überströmungsgeschwindigkeit, die Permeatflussdichte (oder Permeatflux), die Temperatur und die Permeatausbeute zu nennen.

Das Fouling kann quantitativ über den Widerstand R erfasst werden, der sich aus der Summe des Strömungswiderstands der ungefoulten, sauberen Membran und einem durch Membranfouling verursachten Widerstand zusammensetzt.

$$R = R_{Membran} + R_{Fouling} = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\eta v_p} \quad (1)$$

Durch Differenzieren nach der Zeit und unter der Annahmen eines konstanten Betriebspunkts (d.h. die Viskosität η , die Differenz des osmotischen Drucks $\Delta \pi$ und der Permeatflux v_p sind konstant) kann die Zunahme des Membranfoulings aus den Betriebsparametern berechnet werden.

$$\frac{dR}{dt} = \frac{dR_{Fouling}}{dt} = \frac{1}{\eta v_p} \cdot \frac{d\Delta p}{dt} \quad (2)$$

Wie bereits in Abschnitt 2.3 erwähnt, wurden zwei verschiedene Module eingesetzt. Dabei hat sich der Betrieb des Membranwickelmoduls auf Grund von Feed-Spacer Verblockungen als nicht umsetzbar erwiesen. Im Folgenden soll deshalb nur auf den Betrieb des Kapillarmoduls eingegangen werden.

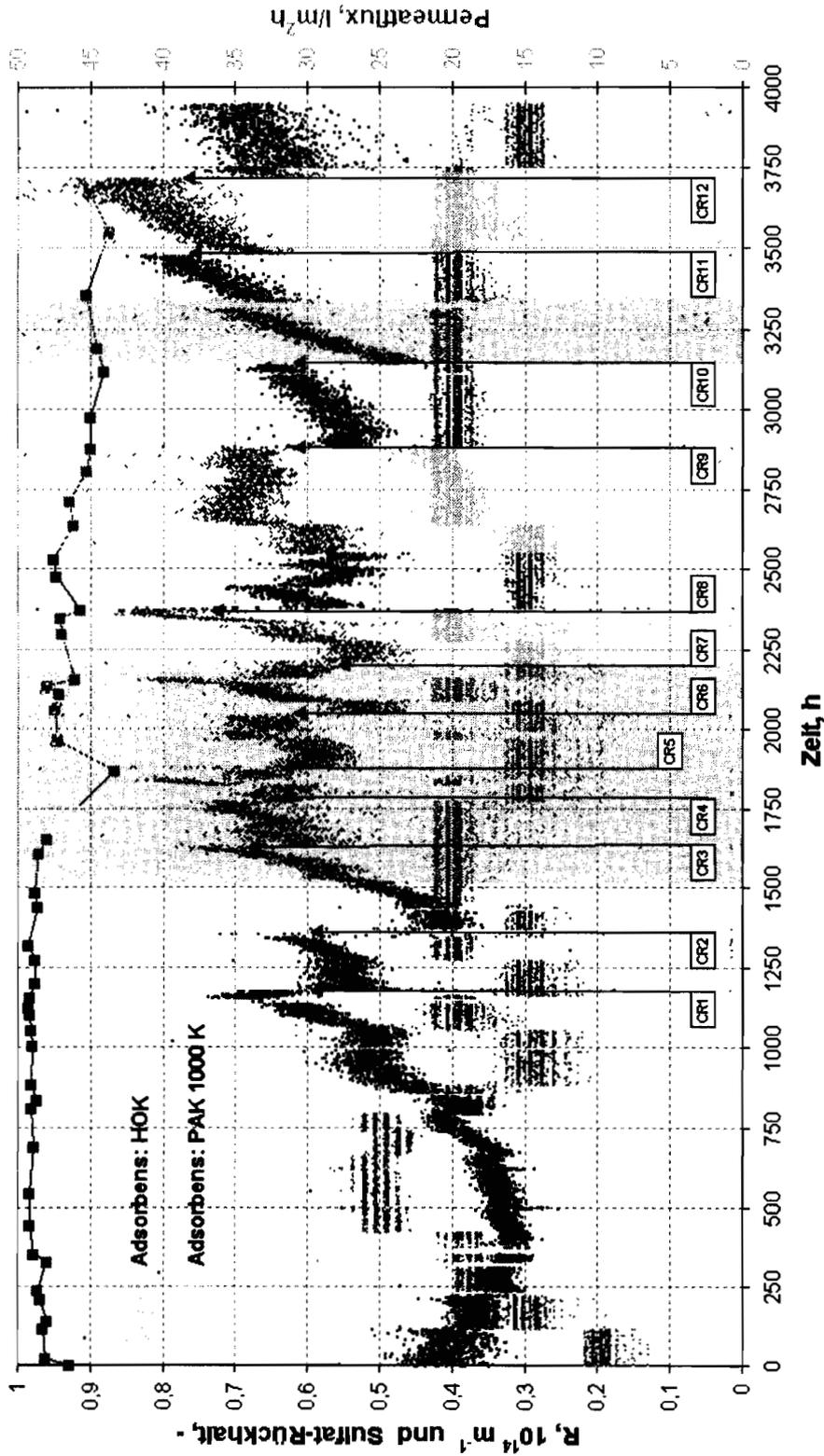


Abbildung Membranwiderstand R (links), Membranrückhalt für Sulfat (links) und Permeatflux (rechts) für den Betrieb des Kapillatmoduls

In Abbildung 7 sind Permeatflux, Widerstand und Sulfatrückhalt für die ersten 4000 h Betriebsstunden des Kapillarmoduls dargestellt. Das Modul wurde abwechselnd ohne Adsorbens, mit HOK- und mit PAK 1000 K – Dosierung bei unterschiedlichen Betriebsbedingung gefahren.

Die entsprechenden dR/dt - Werte der Betriebspunkte sind in Tabelle 4 dargestellt. In den Fällen einer mehrfachen Einstellung des Betriebspunktes sind die Werte explizit und in chronologischer Reihenfolge dargestellt.

Tabelle 4: Anstieg des Membranwiderstands für bestimmte Betriebspunkte

Adsorbens	Dosierung, g/l	Flux, l/m^2h	Ausbeute, %	Spülintervall, min	dR/dt , $10^{10} m^{-1} h^{-1}$
-	-	15	75	15	3; 6
-	-	15	75	60	0; 3,5; 7; 11
HOK	0,5	15	75	60	2; 0; 7
PAK 1000 K	0,2	15	75	60	0
-	-	20	75	15	6; 11; 12
HOK	0,5	20	75	15	15,5
HOK	0,2	20	75	15	12
PAK 1000 K	0,2	20	75	15	0; 7
-	-	20	75	60	12
HOK	0,5	20	75	60	16
PAK 1000 K	0,2	20	75	60	22

Zunächst ist festzustellen, dass die Reproduzierbarkeit der dR/dt -Werte sehr schlecht ist und da auf Grund der vergleichsweise langen Zeit, die für einen Messpunkt benötigt wird nur wenige Messwerte zur Verfügung stehen sind kaum gesicherte Aussagen möglich, d.h. die Abweichungen zwischen den einzelnen Betriebspunkten können auch zufällig sein. Es sind daher nur tendenzielle Aussagen möglich.

Weiterhin weisen die Wiederholungen der gleichen Betriebspunkte meist ein stärkeres Fouling auf, als die vorangegangenen. Das könnte auf ein zunehmendes irreversibles Fouling zurückzuführen sein.

Wie zu erwarten, verursachen ein höherer Permeatflux sowie einen längeres Intervall für die hydraulischen Spülungen tendenziell eine stärkere Foulingzunahme.

Bzgl. der Adsorbensdosierung sind bei Permeatflüssen von 15 l/m²h weder für HOK noch für PAK 1000 K Auswirkung auf das Fouling festzustellen.

Bei 20 l/m²h scheint die Zugabe von HOK das Membranfouling im Vergleich zum Betrieb ohne Adsorbens zu verstärken. Gleiches gilt für die Zugabe von PAK 1000 K bei langen Rückspülintervallen, während die Werte für kurze Rückspülintervalle auf eine Minderung des Membranfoulings hindeuten.

5 Ergebnisse der Pilotversuche bzgl. Permeatqualität und Anlagenrückhalt

Neben einem reduzierten Membran-Fouling sollte durch die Adsorbenszugabe auch eine verbesserte Permeatqualität erzielt werden.

In Tabelle 5 sind die erzielten mittleren Permeatkonzentrationen dargestellt. Auf die Darstellung der mikrobiologischen Parameter wurde hier verzichtet, da die Permeatleitung offensichtlich verkeimt war und für eine NF unrealistisch hohe Werte gemessen wurden.

Tabelle 5: Mittelwerte nach Rührkessel und im Permeat sowie Anzahl der durchgeführten Analysen, der Permeatwerte über der Nachweisgrenze und der Überschreitungen des Grenzwerts der TrinkWV

Parameter	Einheit	Grenzw. TrinkWV	Permeat			Anzahl Analysen / > Nachweisgrenze /		
			-	HOK	PAK	-	HOK	PAK
CSB	mg/l	5	4,5	3,2	4,6	22/5/5	11/1/1	8/4/4
UVA ₂₅₄	m ⁻¹	-	1,52	<0,39	0,99	15/15/-	11/6/-	8/8/-
Färbung	m ⁻¹	0,5	0,08	<0,03	<0,06	19/19/0	11/11/0	8/8/0
Sulfat	mg/l	240	9,5	16,7	29,5	33/33/0	17/17/0	12/12/0
Chlorid	mg/l	250	171	162	151	24/24/4	12/12/0	9/9/0
LF	μS/cm	2500	824	793	841	27/27/0	12/12/0	9/9/0
pH-Wert	-	-	7,79	8,37	8,08	25/25/-	11/11/-	9/9/-

Das Diagramm in Abbildung 7 zeigt den Anlagen- und den Adsorptionsrückhalt, berechnet nach den folgenden Gleichungen:

$$R_{Anl} = 1 - \frac{C_{Perm}}{C_{Rohw}}, \quad R_{Ads} = 1 - \frac{C_{Feed}}{C_{Rohw}} \quad (3), (4)$$

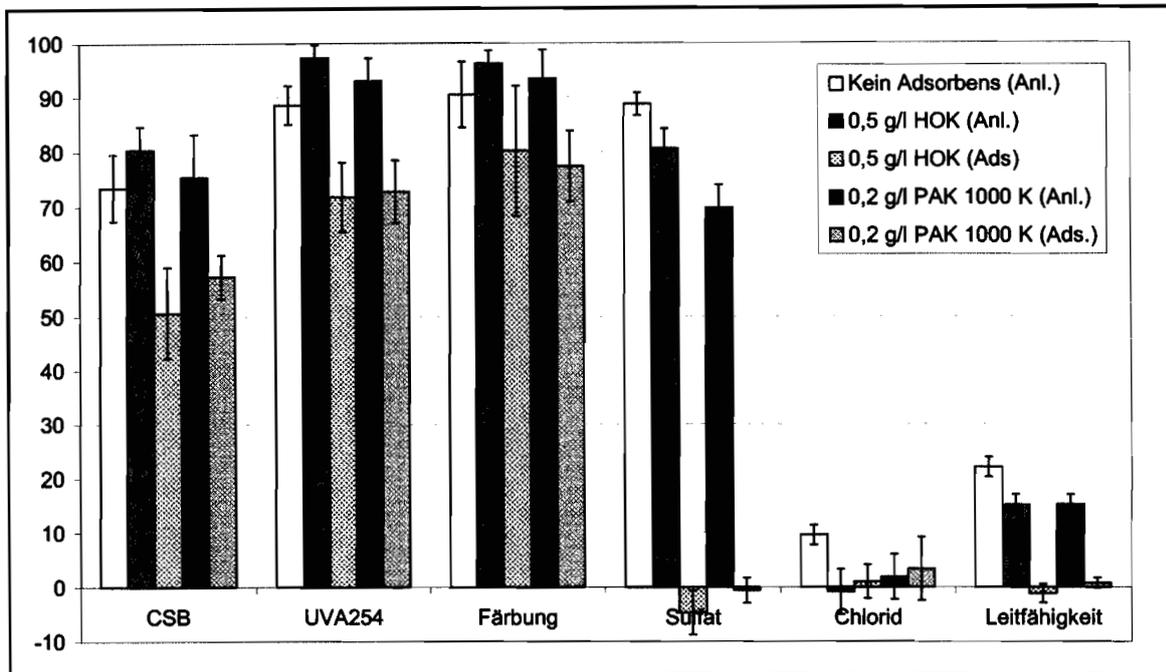


Abbildung 7: Mittlere Anlagen- und Adsorptionsrückhalte gemäß Gleichung (3) und (4) mit 95%-Konfidenzbereich

Insgesamt bewirkt die Zugabe von Adsorbentien bzgl. der organischen Parameter eine Verbesserung des Anlagenrückhalt und bzgl. der anorganischen Parameter eine Minderung des Anlagenrückhalts.

Ein Vergleich der CSB-Werte nach dem Rührkessel und im Konzentrat der Anlage mit den im Labor gemessenen CSB-Isothermen zeigt, dass das Potenzial der Adsorbentien offensichtlich nicht voll ausgeschöpft werden kann. Die Anlagen-Isothermen liegen unterhalb der Labor-Isothermen. Dies kann auch nur zu einem geringen Anteil durch niedrigere Verweilzeiten in Rührkessel und Membranmodul begründet werden. Zwei Feed- und die entsprechenden zwei Konzentratproben wurden nach der Entnahme für 48 h geschüttelt und dann analysiert. Im Fall der Feedprobe fand nur eine sehr geringfügige weitere Adsorption statt. Im Falle der Konzentratproben konnte der gelöste CSB noch deutlich weiter reduziert werden.

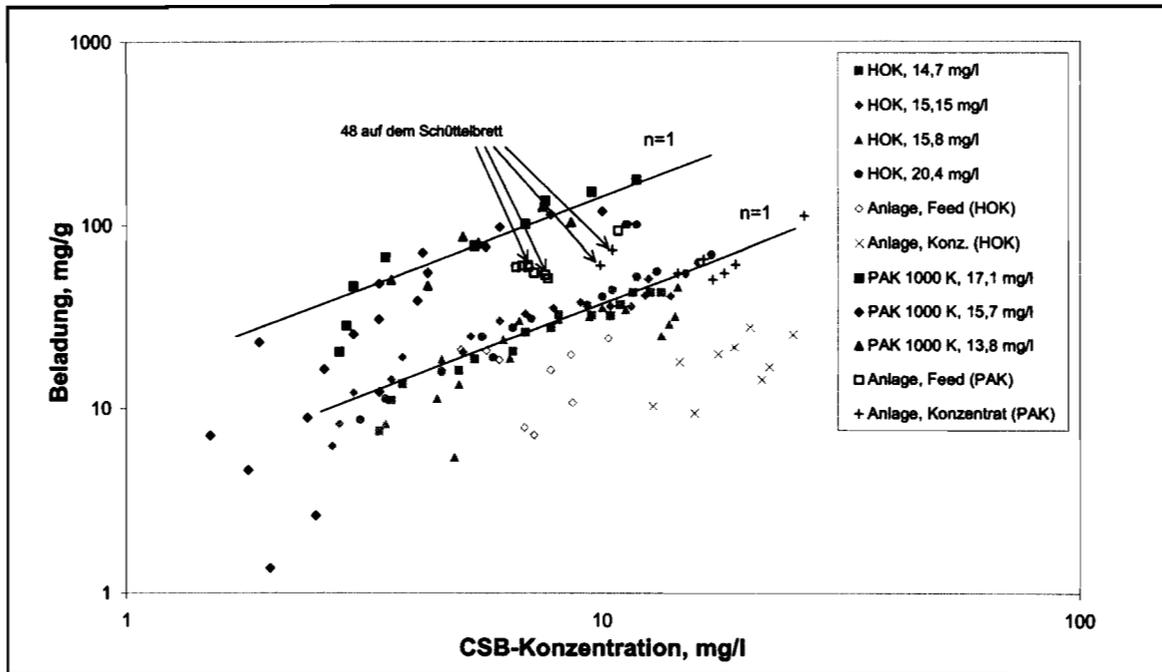


Abbildung 8: CSB-Isothermen für HOK und PAK 1000 K mit den entsprechenden Betriebsergebnissen der Pilotanlage

6 Kostenschätzung

Die Kosten des Verfahrens wurden mit der Faktormethode nach Lang abgeschätzt [4].

Für den Lang-Faktor sowie für alle anderen Randbedingungen der Kostenschätzung wurde dabei jeweils ein günstiger, ein mittlerer und ein ungünstiger Wert angenommen. Als Adsorbens-Dosis wurde für HOK 0,5 g/l und für PAK 1000 K 0,2 g/l angenommen.

Die sich daraus ergebenden spezifischen Betriebskosten liegen zwischen 0,46 €/m³ für den günstigsten, 0,52 €/m³ für den mittleren und 1,09 €/m³ für den ungünstigsten Fall. Darin enthalten sind Adsorbenskosten von 0,19 €/m³, sowohl im Fall von HOK als auch im Fall von PAK 1000 K.

7 Zusammenfassung

Die Pilotversuche zur Reinigung von Kläranlagenablauf mit dem PAK-NF-Prozess haben gezeigt, dass das Verfahren mit einem Kapillarmodul im Dauerbetrieb umsetzbar ist.

Die erhoffte positive Wirkung der Adsorbensdosierung auf das Membran-Fouling konnte nicht festgestellt werden.

Die Reinigungsleistung bzgl. der organischen Parameter konnte im Vergleich zum Betrieb einer NF ohne Adsorbensdosierung verbessert werden. Der Rückhalt für anorganischen Substanzen wurde durch die Adsorbensdosierung jedoch vermindert.

Die spezifischen Aufbereitungskosten für das Verfahren wurden zu etwa 0,50 €/m³ abgeschätzt, wovon 0,19 €/m³ durch den Adsorbensverbrauch bestritten werden.

Das vorgestellte Forschungsprojekt wurde im Auftrag der Forschungsgemeinschaft Deutsche Braunkohleindustrie e.V. durchgeführt und über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) gefördert (AiF-FV-Nr. 13882 N1).

8 Literatur

- /1/ I. Baudin, M.R. Chevalier, C. Anselme, S. Cornu, J.M. Lainé, L'Apié and Vigneux case studies: First months of operation, *Desalination* 113, 273-275 (1997)
- /2/ J.C. Schippers, J. Verdouw, The modified fouling index, a method of determining the fouling characteristics of water, *Desalination* 32, 137-148 (1980)
- /3/ Stefan A. Huber, Evidence for membrane fouling by specific TOC constituents, *Desalination* 119, 229-234 (1998)
- /4/ H.J. Lang, "Simplified approaches to preliminary cost estimates", *Chemical Engineering* 55 (6), 112-113 (1948)