
WASSER ABFALL

■ SCHRIFTENREIHE

des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV)

Heft 142

Membrantechnologie – Chancen und Grenzen

Wien 2001

In Kommission bei:
ON Österreichisches Normungsinstitut
A-1020 Wien, Heinestraße 38

Einsatz von Membranfiltration zur Gewinnung von Trink- oder Badewasser aus kommunalen Kläranlagen

Bernhard MAYR

Vorbemerkung: eine kurze Internetrecherche lieferte bei Eingabe der mit „UND“ verknüpften Suchkriterien „Trinkwasser“, „Abwasser“, „Membran“ über 1.000 Querverweise. Der Vortrag kann und will daher nicht den Stand der Technik bzw. der Wissenschaft vermitteln.

1. Einleitung

Österreich ist wasserreich.

Die großen natürlichen Ressourcen lassen hierzulande den Gedanken an eine Trinkwassergewinnung aus kommunalen Abwasser absurd erscheinen. Selbst für „niedere“ Dienste, z.B. Bewässerungen oder Reinigungsaufgaben, wird im Regelfall bestes Trinkwasser verwendet.

Mit anderen Worten, für Österreich erscheint ausschließlich die europäische Badesewässerrichtlinie als rechtliche Vorgabe in diesem Zusammenhang von Bedeutung. Sandfilter in Kombination mit Ozonisierungsanlagen gelten derzeit bei diesen weitergehenden Anforderungen an die Abwasserqualität als Stand der Technik. Membranverfahren können diese letzten Reinigungsstufen kommunaler Kläranlagen im Bereich sensibler oder leistungsschwacher Vorfluter oder Seen ersetzen, wobei die Membran in Abhängigkeit von der gewählten Trenngrenze auch als **Barriere** für Krankheitserreger und sogenannte Umwelthormone wirkt. Andererseits können damit Kläranlagen in Extremlagen für Stoßbelastungen gewappnet werden. Die Gewinnung von Trinkwasser aber ist nicht von Interesse.

Gänzlich anders gelagert ist die weltweite Situation.

Schon in Deutschland, England oder Frankreich sind beispielsweise entlang der großen Flüsse wie Rhein oder Seine abwechselnd Trink- und Abwasseraufbereitungsanlagen aufgereiht, die Interaktionen liegen auf der Hand und die Membrantechnik gewinnt zunehmend an Bedeutung, sowohl im Trink-, als auch im Abwasserbereich. Beispielsweise wurde kürzlich in Paris das weltweit größte Wasserwerk auf Basis von Nanofiltrationsmembranen eröffnet.

Einen noch stärkeren Bedarf für membrangestützte Aufbereitungsmethoden gibt es natürlich in Gebieten mit Wassermangel. Besonders in Tourismusgebieten und auf Ferieninseln wird das Wasser zum bestimmenden Element. Teure Wassertransporte oder

Entsalzungsanlagen lassen die membrangestützte Gewinnung von Trinkwasser aus kommunalen Abwässern zunehmend attraktiver erscheinen. Erste Projekte, zum Beispiel in Namibia, werden bereits realisiert.

2. Erzielbare Reinigungsleistungen

2.1 Erfahrungen aus dem Bereich der Deponiesickerwasserreinigung

In Österreich werden Membranbioreaktoren seit 1994 hauptsächlich zur Reinigung von Deponiesickerwässern eingesetzt [1]. Als Membrananlage finden Cross-Flow-Mikrofiltrationsmembrane Verwendung; diese weisen zwar einen relativ hohen spezifischen Energiebedarf (2,5–10 kWh/m³) auf, der jedoch aufgrund der geringen Abwassermenge (<100 m³/d) kostenmäßig im Vergleich zu den kaufmännischen Abschreibungen kaum ins Gewicht fällt. Umgelegt auf kommunale Anwendungen würden sich aber bei Cross-Flow-Anlagen zu hohe Energiekosten ergeben. Diese Behälterbiologien werden zum Teil seit Jahren ohne Überschussschlammabnahme betrieben. Die erzielbaren TS-Gehalte erreichen 40 g/l [2].

Die größte derartige Anlage mit 390 m³ Bioreaktorvolumen wurde zur Behandlung von 100 m³/d mit den Belastungswerten CSB = 25.000 mg/l und NH₄-N = 4.000 mg/l in Form einer Behälterbiologie (Denitrifizierung und Nitrifizierung) mit Injektorbelüftung, Prozesskühlung und einer keramischen Crossflowmikrofiltration (40 m²) errichtet. Im Anschluss an den Membranbioreaktor wird das Filtrat in einer 2-stufigen Umkehrosmoseanlage auf Direkteinleitungsqualität (CSB < 15 mg/l/ Nachweisgrenze und Ammonium-N < 0,1 mg/l) gereinigt [2, 3].

Eine geringer belastete Anlage mit einer Kapazität von ca. 40 m³/d reinigt ebenfalls seit 1994 Deponiesickerwasser auf Direkteinleitungsqualität. Der Membranbioreaktor ist ebenfalls mit einer nachgeschalteten Umkehrosmose kombiniert [4].

Die prozentuale Reinigungsleistung der Verfahrenskombination Membranbiologie – 2-stufige Umkehrosmose überschreitet bei allen wesentlichen Parametern den Wert von 99,9%. Dies gilt natürlich auch für alle Salze, so dass in diesem Fall das gewonnene Permeat wenn schon nicht als Trinkwasser, wohl aber als Reinwasser bezeichnet werden kann.

Wie aus Tab. 1 ersichtlich wird, lassen sich durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Umkehrosmosestufen beliebig hohe Rückhalteraten für jene Stoffe, die ein bestimmtes Molekulargewicht überschreiten, realisieren.

„Kleine“ Substanzen, etwa Ammoniak, Sulfid oder Chloride, können die Membran allerdings weitgehend ungehindert passieren und müssen daher durch geeignete Prozessführung eliminiert werden.

Prozentualer Schadstoffrückhalt						
Parameter	Stufenzahl					
	1		2		3	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
CSB	84,2	96,8	97,5	99,9	99,61	99,997
BSB5	81,0	95,5	96,4	99,8	99,31	99,991
TOC	85,9	94,5	98,0	99,7	99,72	99,983
AOX	84,2	92,9	97,5	99,5	99,61	99,964
N-Ges.	77,6	90,0	95,0	99,0	98,87	99,900
NH ₄ -N	77,6	87,8	95,0	98,5	98,87	99,820
NO ₂ -N	77,6	85,9	95,0	98,0	98,87	99,720
PO ₄ -P	77,6	90,0	95,0	99,0	98,87	99,900
Hg	68,4	90,0	90,0	99,0	96,84	99,900
Cd	68,4	90,0	90,0	99,0	96,84	99,900
Cr	68,4	90,0	90,0	99,0	96,84	99,900
Ni	68,4	90,0	90,0	99,0	96,84	99,900
As	68,4	90,0	90,0	99,0	96,84	99,900
Pb	68,4	90,0	90,0	99,0	96,84	99,900
Cu	68,4	90,0	90,0	99,0	96,84	99,900
Zn	68,4	90,0	90,0	99,0	96,84	99,900

Tab.1: Integrale Reinigungsleistung von Umkehrosmoseanlagen

3. Ergebnisse der Pilotversuche mit einer Hohlfasermembran [5]

Die Ergebnisse wurden an einer Pilotanlage zur membrangestützten Abwasserreinigung erzielt, die im Wesentlichen aus einer intermittierend betriebenen Biologie und einer getauchten Hohlfasermembran als Ersatz für eine sedimentative Nachklärung besteht.

3.1 Biologische Abbauleistung

Die CSB-Ablaufkonzentration (siehe Abb. 1) lag bis auf wenige „Ausreißer“ immer unter der Nachweisgrenze des Photometers (15 mg/l). Die Ausreißer sind zumeist durch besondere Anlagenumstände (Betriebsstillstände, Versuche) zu erklären.

Im Regelfall stellte sich die Ablaufkonzentration als unabhängig von der Zulaufbelastung heraus! Weder die Konzentrationsspitzen durch Schlachthofabwasser oder Schlammpresswasser zeigten einen Einfluss auf die Ablaufkonzentration.

Die gesetzlichen Anforderungen (75 mg/l) werden bei weitem unterschritten! Der Schlamm in der Membranbiologie ist offensichtlich überaus optimal an das Abwasser adaptiert und baut selbst „harte“ CSB-Verbindungen ab.

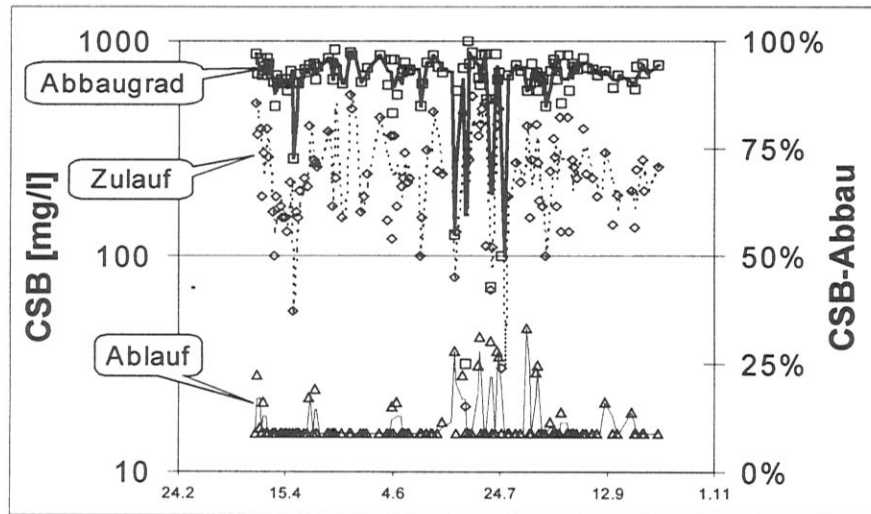


Abb. 1: CSB Verlauf

Die Ammonium Ablaufkonzentration (Abb. 2) bewegte sich praktisch über den gesamten Versuchszeitraum im Bereich der analytischen Nachweisgrenze des Photometers (0,2 mg/l). Der gesetzliche Ablaufwert (5 mg/l) wurde nur einmal infolge einer Betriebsstörung (längerer Ausfall der Belüftung) überschritten.

Änderungen der Zulaufkonzentrationen haben keine Auswirkungen auf die Beschaffenheit des Ablaufs. Toxische Effekte konnten nicht festgestellt werden, die Membranbiologie verhält sich aufgrund der optimalen Adaption (hohes Schlammalter) überaus robust in Hinsicht auf Einleitungen von Presswasser oder anderen gewerblichen Abwässern. Die Abbauraten bewegen sich ständig am erreichbaren Maximum.

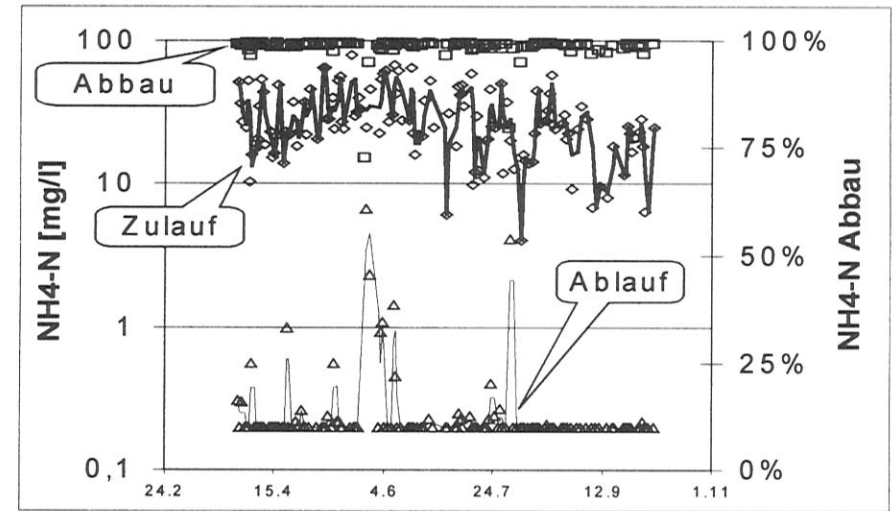


Abb. 2: NH_4-N Verlauf

3.2 Daten zum Membraneinsatz

Im Versuchszeitraum (März - Oktober 1998) konnten keine Hinweise auf eine Verschlechterung der Filtrationseigenschaften oder auch der mechanischen Stabilität der Membran nachgewiesen werden.

Trotz zahlreicher spezieller Versuche zur Abschätzung der Leistungsgrenzen (z.B. Aufkonzentrierung, max. Durchfluss, Membranrelaxation etc.) waren alle Leistungsminierungen durch die dafür vorgesehenen Reinigungsverfahren zu beseitigen.

Im Regelfall reichte eine innere Spülung der Membranfasern. Nur einmal musste eine externe Reinigung vorgenommen werden, da durch Aufkonzentrierungsversuche – zur Bestimmung der Belastungsgrenze wurde die Biomasse im Filtrationstank möglichst hoch konzentriert (TS > 25 g/l) – mechanisch stabile Schlammpanpackungen an den Modulfasern aufgetreten sind.

Am Versuchsende wurde der Modul ausgebaut und optisch begutachtet. Die Farbe der Membran hatte sich von weiß zu lachsrot verändert. Diese Farbänderung wird auf das in der Großanlage als Phosphatfällungsmittel verwendete Eisensulfat zurückgeführt, da es den Schlamm der Großanlage etwa gleich färbt und da der Überschussschlamm vor der Vorklärung zurückgeführt wird.

3.3 Einhaltung der EU-Richtlinie für Badegewässer

Die hygienische Beschaffenheit des Permeats wurde in Hinsicht auf die Einhaltung der EU-Richtlinie für Badegewässer insgesamt viermal untersucht [6, 7].

Als Resümee kann festgehalten werden, dass das gereinigte Abwasser der Membrananlage eine Gesamtkeimzahl von 1.900 cfu/100 ml aufweist.

In diesen Keimen sind keine Fäkalcoliforme Bakterien oder Salmonellen und nur 7 *Streptococcus faecalis* nachweisbar.

Das Permeat erfüllt daher die Anforderungen der EU-Badegewässerrichtlinie.

4. Zwischenergebnisse Teichkläranlage: Flach- und Hohlfasermembran

4.1 Problemstellung

Zahlreiche kommunale Teichkläranlagen in Österreich verfehlen die gesetzlich geforderten Reinigungsleistungen deutlich. Besonders während der kalten Jahreszeit frieren die Teiche aufgrund der großen Oberfläche resp. Verweilzeit ein, eine Nitrifizierung wird unmöglich.

Die Zielsetzung des Projektes liegt in der Definition des Optimierungspotenzials kommunaler Teichkläranlagen, das sich einerseits durch den Einsatz alternativer Belüftungs- und Mischungstechnologien und andererseits durch den Einsatz innovativer Membrantrenntechnik zur Abauffiltration ergibt.

Der Sauerstoffeintrag über ein Injektorsystem ist für die Nachrüstung bestehender Anlagen mit geringen Investitionskosten verbunden. Zusätzlich erreicht man durch den Injektor eine gegenüber konventionellen Belüftungssystemen deutlich homogene Durchmischung des Belebungsbeckens und vermeidet damit die Ausbildung von anaeroben Zonen.

Die Membran dient als nachgeschaltete Barriere und soll auch im Störfall (Schlammabtrieb etc.) eine einwandfreie Abwasserqualität gewährleisten. Im Regelbetrieb dient die Membran auch zum Rückhalt von Krankheitserregern.

Die für den Winterbetrieb wesentliche Prozessumstellung ergibt sich aus der drastischen Reduktion des Beckenvolumens und damit verbunden auch der Oberfläche, da die Klärteichanlage nur mehr mit einem Teich (statt mit vieren) betrieben werden soll. Der Wegfall von 70% des Klärvolumens und die Umstellung auf intermittierende Fahrweise des Belebungsbeckens führt einerseits zu einem spezifisch höheren Energieeintrag pro Volumseinheit und andererseits zu geringeren Wärmeverlusten über die Oberfläche.

4.2 Ergebnisse der biologischen Stufe

Besonders während der kalten Jahreszeit können die geforderten Ablaufwerte ($\text{NH}_4\text{-N}$, CSB) nur mit Hilfe der Membranfiltration des Ablaufs eingehalten werden.

Die derzeit ins Auge gefasste Strategie zur Anpassung liegt daher in der Membranfiltration des Ablaufes des Nachklärbereiches, da in diesem Fall von einem vollständigen Biomasserückhalt ausgegangen werden kann. Mit der Entkoppelung der hydraulischen Verweilzeit vom Schlammalter sollte auch die Nitrifikation sichergestellt werden können.

4.3 Ergebnisse der Membranfiltration

4.3.1 Dead-End Filtrationsanlage

Ein Teilstrom des Kläranlagenablaufes wird über eine Vorfiltration aus einem Vorlagebehälter der Anlage zugeführt. Die Filtration ist wahlweise mit einer Ultrafiltrationsflachmembran aus Polyacrylnitril (200 k Dalton) mit 18 m² Filterfläche (Abb. 3) oder mit einer Hohlfasermembran aus Polypropylen (45 k Dalton, Abb. 4) ausgerüstet.

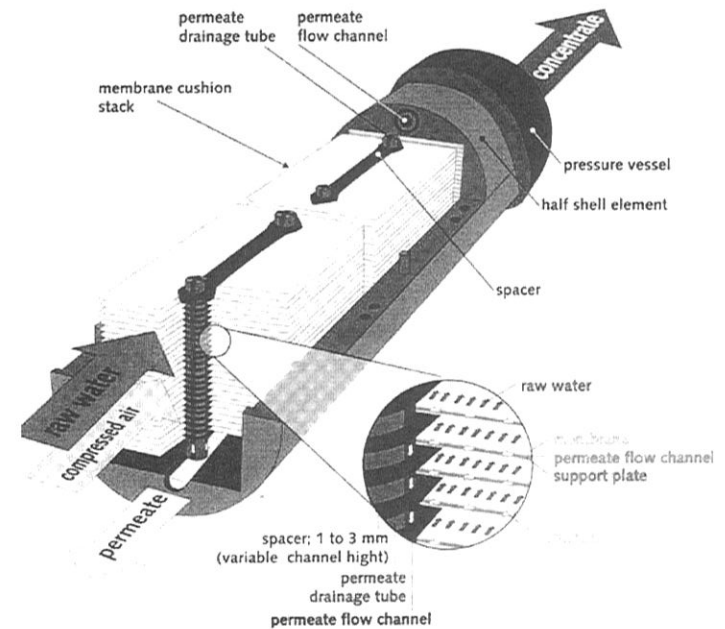


Abb. 3: Prinzipskizze des Flachmembran-UF-Moduls

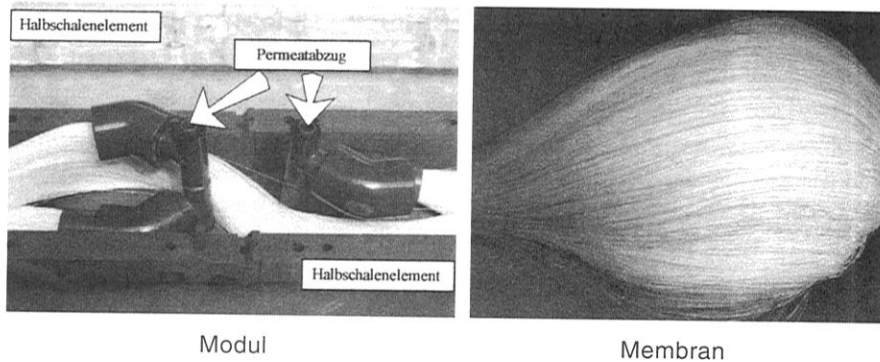


Abb. 4 UF-Hohlfasermembran

Das Abwasser wurde im Kläranlagenablauf (Schönungsteich) entnommen. Dabei wurden folgende Resultate erzielt:

Feststoffgehalt im Rohwasser	ca. 10 mg/l	
	Flachmembran	Hohlfasermembran
Filtratvolumenstrom (5 °C)	25 l/m ² h	15 l/m ² h
Dauer des Filtrationsintervalls	20 min	30 min
Spez. Nettofiltratstrom	17 l/m ² h	12 l/m ² h
Transmembrandruck	0,4 – 1,2 bar	0,4–0,9 bar
chemische Reinigung	etwa alle 7 bis 10 Tage	60 Tage
CSB-Reduktion	ca. 30%	ca. 30%
Flockungsmittel	Jedenfalls erforderlich	Zur P-Entfernung im Bedarfsfall

Tab. 2: Resultate der Dead-End Ablauffiltration

Die in Tab. 2 aufgelisteten Ergebnisse zeigen, dass die erreichbaren Filtratströme im Bereich der bekannten getauchten Systeme für kommunale Abwässer liegen, obwohl das zugeführte Abwasser aus der letzten Klärteichstufe entnommen wurde und nur geringe Mengen an abfiltrierbaren Stoffen enthielt.

Die aufwendige Modulkonstruktion (siehe Abb. 3 und Abb. 4) würde daher zu überhöhten Investitionskosten für die großtechnische Realisierung führen.

Aus diesem Grund wurde in weiterer Folge ein einfaches und kostengünstiges Modulsystem für die Hohlfasermembran zur Nachrüstung in bestehenden Kläranlagen getestet.



Abb. 5: Hohlfaser-UF-Modul

Obwohl die Versuche derzeit noch nicht abgeschlossen sind, lässt sich die Eignung dieser Konstruktion aufgrund der guten Resultate für den gegenständlichen Fall bereits belegen. Bei einem angelegten permeatseitigen Unterdruck zwischen 0,05 und 0,5 bar wurde ein stabiler Flux von etwa 12 l/m²h über längere Zeiträume erzielt. Dabei wurde die Membran (realitätsnah) direkt mit dem Ablauf des belüfteten Teichs beaufschlagt. Die Membran wird kontinuierlich abgereinigt, indem einerseits von unterhalb Luft zugeführt wird und andererseits Permeat über die Membran mit Drücken bis zu 10 bar rückgepresst wird.

Zusammenfassung

Die Neuentwicklung von preiswerten Membranen hat für diese Technologie die Tür zur Anwendung im kommunalen Bereich geöffnet. Betrachtet man die spezifischen Modulkosten pro m² Membranfläche des letzten Jahrzehnts [8], erkennt man unsicher einerseits eine stark sinkende Tendenz und andererseits, dass das tiefste Niveau noch (lange) nicht gefunden ist.

Werden noch die rasante technische Entwicklung und die zahlreichen Forschungsvorhaben in Betracht gezogen, so scheint die Prognose einer mittelfristigen Marktdurchdringung der Membranverfahren im Abwasser- und Trinkwasserbereich nicht überzogen.

Aus den Erfahrungen unserer Forschungsprojekte muss zusammenfassend darauf hingewiesen werden, dass die Membranfiltration eines Kläranlagenablaufs (beispielsweise installiert als Sicherheitsstufe oder zur Gewährleistung der Badewasser- oder Versickerungsqualität) kosten- und wartungsmäßig durchaus mit einer in den biologischen Prozess integrierten Membran vergleichbar ist. Daher würden wir auf Basis des aktuellen Wissensstandes die direkte Integration in den Prozess empfehlen, da in diesem Fall die Invest- und Betriebskosten geringer sein werden.

Die Gewinnung von qualitativ hochwertigem Reinwasser aus diesem membranfiltrierten Kläranlagenablauf wird im Vergleich zu konventionellen Mehrwasserentsalzungsanlagen energetisch und kostenmäßig günstiger sein [9], da keine hohen Salzfrachten zu eliminieren sind und auch die biologischen Inhaltsstoffe bereits abgebaut wurden. Eine ein- oder zweistufige Umkehrosmoseanlage kann mit Sicherheit alle Reinheitsanforderungen erfüllen. Die Realisierung wird aber neben den technischen Aspekten primär auch von ethischen Fragen determiniert sein.

Literatur

- [1] Rotreat Abwasserreinigung GmbH&CoKG: Seminarband zum „4. Österr. Sickerwasser-Seminar“, Kirchberg in Tirol, 1997
- [2] ÖWAV-Regelblatt 31 bzw. Wiener Mitteilungen, Band 162, TU Wien, 2000
- [3] Mayr B.: Behälterbiologie BIOJET® mit nachgeschalteter Umkehrosmose; in: Seminarband zum „2. Österr. Sickerwasserseminar“, A.S.A., 1994
- [4] Goldgruber E.: Biologie, Mikrofiltration, Umkehrosmose; in: Seminarband zum „2. Österr. Sickerwasserseminar“, A.S.A., 1994
- [5] Rotreat Abwasserreinigung GmbH&CoKG und EnviCare® DI Dr. Mayr: Tagungsband „Optimierung von Kläranlagen durch innovative Membrantechnik“, Weiz, 1998

- [6] Mayr B.: Membranbioreaktortechnik in Österreich – Aktuelle Projekte, in: Rautenbach R. et al.: Begleitbuch zur 3. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, Klenkes Druck, 8. - 9.2.2000, Aachen/Deutschland
- [7] Hütter M. M., Krämer-Schaffhalter A., Mayr B.: Integration of membrane technology in communal wastewater treatment: operation and cost analysis, European Water Management, Vol. 3, 3, 2000
- [8] Wagner F.: Neue Entwicklungen und Anwendungen in der Membranbioreaktortechnik, in: Rautenbach R. et al.: Begleitbuch zur 3. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, Klenkes Druck, 8. - 9.2.2000, Aachen/Deutschland
- [9] Rautenbach R.: Trinkwasser aus Abwasser – Technisch möglich und sinnvoll?, in: Rautenbach R. et al.: Begleitbuch zur 1. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, Klenkes Druck, 30.6 - 1.7.1997, Aachen/Deutschland

DI Dr. Bernhard Mayr
EnviCare® DI Dr. Mayr
Ingenieurbüro für Verfahrenstechnik
Wittekweg 9
A-8010 Graz