

Ultrafiltration von Karstquellen

Flockung erweitert den Einsatzbereich

Ultrafiltration des sources karstiques

Élargissement du champ d'application grâce à la floculation

La Suisse compte actuellement plus de 35 installations de traitement d'eaux de sources karstiques – souvent à un seul étage. Ces installations se trouvent pour la plupart en Valais, dans les Préalpes de Suisse centrale, dans le Jura ou dans la région du Säntis. Leur capacité de production est de 200 à 10 000 m³/jour. Elles fonctionnent sans prétraitement, mis à part une préfiltration à 200 µm. En cas d'orage ou de fonte des neiges, certaines eaux brutes se chargent de substances organiques à une concentration telle qu'un prétraitement devient nécessaire. D'après les premiers résultats d'un projet de recherche, l'analyse du carbone organique par chromatographie en phase liquide permet de valider la détermination d'un indice de colmatage. Cet indice renseigne sur la faisabilité de l'ultrafiltration et l'optimisation du prétraitement (par floculation ou par charbon actif en poudre).

Ultrafiltration of Karstic Springs

Floculation Expands the Area of Use

At present in Switzerland drinking water is obtained from karstic spring water in more than 35 plants – often in only one processing stage. Most plants are located in the Valais, in the foothills of the Alps in central Switzerland, in the Jura or in the area around the Säntis mountain. They have an output of 200 to 10 000 m³/day. Apart from pre-filtration at 200 µm they can be operated without any other pre-treatment, however some natural water contains such high levels of organic material after thunderstorms or when the snow melts that pre-treatment becomes necessary. Initial results from a research project show that by determining a fouling index, which is validated by LC-OCD analysis, useful information on the feasibility of ultra-filtration as well as the best type of pre-treatment with flocculants or powdered activated carbon can be obtained.

Joachim Klahre



Aktuell wird in der Schweiz in über 35 Anlagen Trinkwasser aus Karstquellwässern erzeugt – oft in nur einem Aufbereitungsschritt. Die meisten Anlagen stehen im Wallis, in den Innerschweizer Voralpen, im Jura oder am Säntis-Massiv und haben eine Leistung von 200 bis 10 000 m³/Tag. Ausser einer Vorfiltration bei 200 µm können sie ohne weitere Vorbehandlung betrieben werden, jedoch enthalten einige Rohwässer nach Gewittern oder bei der Schneeschmelze derart hohe Gehalte an organischen Stoffen, dass eine Vorbehandlung erforderlich wird. Erste Ergebnisse aus einem Forschungsprojekt zeigen, dass durch die Bestimmung eines Fouling-Index, der durch LC-OCD-Analytik untermauert wird, nützliche Hinweise zur Machbarkeit der Ultrafiltration sowie zur besten Art der Vorbehandlung mit Flockungsmitteln oder Pulverkohle gewonnen werden können.

1. Einleitung

In der Schweiz wird derzeit in über 35 Anlagen Trinkwasser mit dem *Ultrafiltrationsverfahren* (UF) aufbereitet. Davon sind 25 gross-technische Anlagen mit einer maximalen Stundenleistung von 10 bis 575 m³/h, die Wasser aus Karstquellen oder Grundwasser aus Karstgebieten verarbeiten. Nicht berücksichtigt sind dabei kleine Einzelversorgungen für isolierte Bauernhöfe oder Berghütten.

Die umfangreichen *Betriebserfahrungen* seit der Inbetriebnahme der ersten Anlagen im Jahr 2000 bestätigen weitgehend die damaligen Einschätzungen [1, 2] betreffend Wirtschaftlichkeit und Aufbereitungsleistung. Insbesondere bietet die Membranfiltration mit

und bei angenommenen Werten für Transmembrandruck (0,28 bar), Wassertemperatur (10 °C), Membranflux (85 l/hm²) und Permeabilität (400 l/hm²bar) nur ein Energieaufwand von 7,6 Wh pro m³ erforderlich. Die weiteren Verluste werden durch andere Komponenten der Aufbereitungsanlage verursacht und können somit durch deren Wahl (z.B. FU-regulierte Pumpen) beeinflusst werden. Messwerte für den alleinigen Stromverbrauch der UF-Anlage sind schwierig zu erhalten, da meistens die gesamte Gebäudetechnik inkl. Lüftung und Entfeuchtung ebenfalls erfasst wird. Der Stromverbrauch lässt sich aufgrund der eingesetzten Komponenten jedoch recht genau abschätzen: Er beträgt 0,1 kWh pro m³ bei einer Beschickung mit frequenzregulierten Pumpen und kann bei Nutzung von topografisch gegebenem, hydrostatischem Druck für Beschickung und Rückspülung auf unter 0,025 kWh pro m³ gesenkt werden. An einer grossen UF-Anlage mit 1800 m³ Stundenleistung konnte bei einer mittleren Auslastung von ca. 45 % ein Stromverbrauch von 0,06 kWh pro m³ gemessen werden.

Chemische Hilfsmittel

Der Verbrauch an chemischen Hilfsmitteln fällt bei der Betriebskostenrechnung mit unter 0,1 Rappen pro Kubikmeter kaum ins Gewicht. Auf ca. der Hälfte der Anlagen wird die Membran nur einmal jährlich präventiv gereinigt, bei hoher Auslastung mit stark belasteten Rohwässern können maximal sechs jährliche Reinigungen erforderlich werden. Als sehr wirksam gegen das Biofouling der Membranen erwies sich die Desinfektion mit *Javelle-Wasser* (NaOCl). Sie wird im Mittel zweimal täglich im Offline-Betrieb (also nicht über das Rückspülwasser!) mit 10 bis 30 ppm Chlor (bezogen auf das Totvolumen der Filteranlage) durchgeführt und verursacht so einen Verbrauch von zirka einem Liter NaOCl (7 %) pro tausend Kubikmeter aufbereitetem Trinkwasser. Dieses Desinfektionsmittel wird nur zur Pflege der Membran eingesetzt und gelangt nicht ins erzeugte Trinkwasser.

Permeabilität und Spülwasser

Die PES-Membranen der neuen Generation verfügen im sauberen Zustand über eine Permeabilität von ca. 800 l/hm²bar und können bei korrekter Dimensionierung langfristig bei 400 bis 600 l/hm²bar betrieben werden. In einem elf Monate dauernden Versuch mit Karstquellwasser konnte bei mittleren Fluxwerten von über 100 l/hm² neben einer mittleren

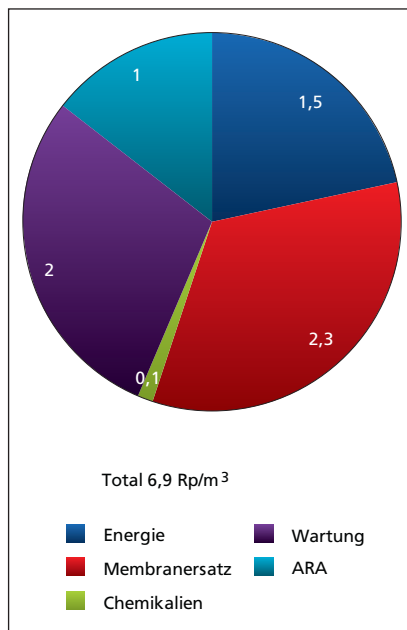


Abb. 2 Aufteilung der Betriebskosten für eine einstufige UF-Anlage bei einer mittleren Auslastung von 65 % der Nennleistung.

Permeabilität von 500 l/hm²bar ein Spülwassereinsatz von unter 3 % der verarbeiteten Rohwassermenge erreicht werden. Im Vergleich zu den Werten, die mit Membranen der ersten Generation erreicht wurden, entspricht dies einer Halbierung der Spülwasserverluste bei doppelt so hoher Permeabilität.

Wartung

Kleine und mittelgrosse Anlagen (bis ca. 200 m³/h) können mit einem Zeitaufwand von ungefähr einer Stunde pro Woche gewartet und unterhalten werden. Die Qualifikation als *Brunnenmeister* ist in Verbindung mit einer *Schulung* durch den Lieferanten der Anlage in der Regel ausreichend für die Betreuung, da Störungen weniger die Membranen, als die bekannten peripheren Elemente (Vorfilter, Pumpen, Ventile) betreffen.

Insgesamt kann eine einstufige UF-Anlage also bei Betriebskosten von rund sieben Rappen pro Kubik-

meter (Abb. 2) betrieben werden, wobei naturgemäss bei grösseren Anlagen der Membranersatz, bei kleineren die Wartung stärker ins Gewicht fällt.

2.2 Einstufige UF-Technik

Trübung

Selbst stark getrübe Rohwässer können mit der UF ohne weitere Beeinträchtigung der Permeabilität aufbereitet werden, solange sie eine geringe Härte aufweisen und wenig gelösten Kohlenstoff (*Dissolved Organic Carbon*, DOC) enthalten. Dies ist bei alpinen Oberflächenwässern mit Gletscherschliff der Fall. Auch bei Karstwässern sind es weniger die mineralischen Tonpartikel, die das Membranfouling verursachen. Rohwässer mit bis zu 200 NTU¹ Trübung können zuverlässig geklärt und entkeimt werden, sodass bezüglich der Qualität des erzeugten Trinkwassers eine sehr hohe Sicherheit besteht. Allerdings können die zusammen mit der Trübung aus dem Karstsystem ausgeschwemmten organischen Stoffe die Durchlässigkeit der Membran durch Fouling beeinträchtigen.

Organische Stoffe (DOC, NOM)

Aufgrund ihrer Porengrösse halten UF-Membranen die im Rohwasser gelösten, organischen Stoffe nur zu ca. 20 % zurück. Bei Karstquellen handelt es sich dabei meist um organische Stoffe *natürlichen Ursprungs* (NOM), z.B. aus dem Abbau von Pflanzen und nur in wenigen Fällen um *anthropogene Mikroverunreinigungen* aus Altlasten. NOM sind nicht toxisch oder anderweitig biologisch aktiv, können aber im Zusammenhang mit einer Netzschutz-Chlorung als Vorläuferstoffe für

¹ NTU = nephelometrische Trübungseinheit (Nephelometric Turbidity Unit)

gesundheitsgefährdende Desinfektionsnebenprodukte eine Rolle spielen.

Der aktuell gültige Grenzwert wird als Oxidierbarkeit mit Kalium-Permanganat ausgedrückt und liegt bei $6 \text{ mg KMnO}_4/\ell$ (Erfahrungswerte gemäss Lebensmittelbuch: $< 3 \text{ mg KMnO}_4/\ell$; $< 1 \text{ mgC}/\ell$ für den DOC). Zudem können NOM die Durchlässigkeit der Filtermembranen beeinträchtigen, da sie trotz Rückspülungen und Desinfektionen auf der Membran haften bleiben. Im Gegensatz zu einem Tiefenfilter werden NOM an der Membran kaum adsorptiv gebunden oder biologisch abgebaut, hingegen kann eine bedeutend bessere Elimination von 30 bis über 50 % des DOC bereits mit geringen Dosen von *Flockungsmitteln* erreicht werden.

Geruch, Geschmack, Mikroverunreinigungen

Da geruchs- und geschmacksaktive Stoffe (G & G) in der Regel ebenfalls in gelöster Form im Wasser auftreten, können sie wie die Mikroverunreinigungen nur mit sogenannt «dich-

ten» *Membranen* (Umkehrosmose, Nanofiltration) und nicht mit einer einstufigen UF abgetrennt werden. Auch die Kombination der UF mit Flockungsmitteln, wie sie zur Abtrennung von NOM eingesetzt wird, reicht hier nicht aus und es werden weitere Verfahrensstufen wie Oxidation und Adsorption mit Ozon und *granulierter* (GAK) oder *pulverförmiger Aktivkohle* (PAK) erforderlich. Es ist bekannt, dass in gewissen Situationen G & G durch *Biofouling* bei der Verteilung des Trinkwassers im Netz entstehen können, wenn der Netzschutz mit sehr geringen Dosen an freiem Chlor betrieben wird [3].

3. Optimierung

W Weil hohe Konzentrationen von gelösten organischen Stoffen sowohl die Leistungsfähigkeit des Membranfilters als auch die Qualität des erzeugten Trinkwassers beeinträchtigen können, wird zurzeit nach *einfachen Mitteln* gesucht, die hier Abhilfe schaffen könnten. Eine Möglichkeit besteht in der Dosierung geringer Mengen von *Flockungsmitteln*



Abb. 3 Transportable Labor-Anlage zur Bestimmung des Fouling-Index.

tehn auf der Basis von Metallchloriden (Eisenchlorid FeCl_3 , Poly-Aluminiumchlorid PaCl) oder von pulverförmiger Aktivkohle (PAK) direkt in den Rohwasser-Zulauf der Filteranlage. Bei dieser sogenannten «In-line»-Dosierung sind die Reaktionszeiten sehr kurz, da dafür keine separaten Becken eingesetzt werden. Dennoch können die Abtrennleistungen auf diese Weise stark verbessert werden, da bei dem geringen Durchmesser der Membranporen (20 nm) auch keine grossen Flocken erzeugt werden müssen [4].

In einem vom Bundesamt für Umwelt unterstützten *Forschungsprojekt* der Eawag in Zusammenarbeit mit dem Kanton Jura, der Gemeinde Küsnacht SZ und einem Industriepartner wird untersucht, in welcher Weise die Dosierung von Flockungsmitteln oder PAK den

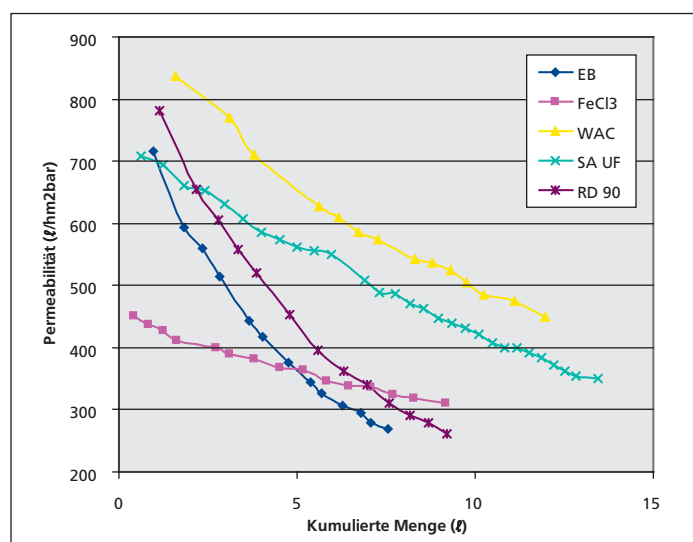


Abb. 4 Permeabilitätsverlauf eines Rohwassers, das mit Eisenchlorid, Poly-Aluminiumchlorid (WAC HB) und zwei Typen von PAK (SA UF, RD 90) behandelt wurde (Kontaktzeit 5 Minuten). EB = Rohwasser.

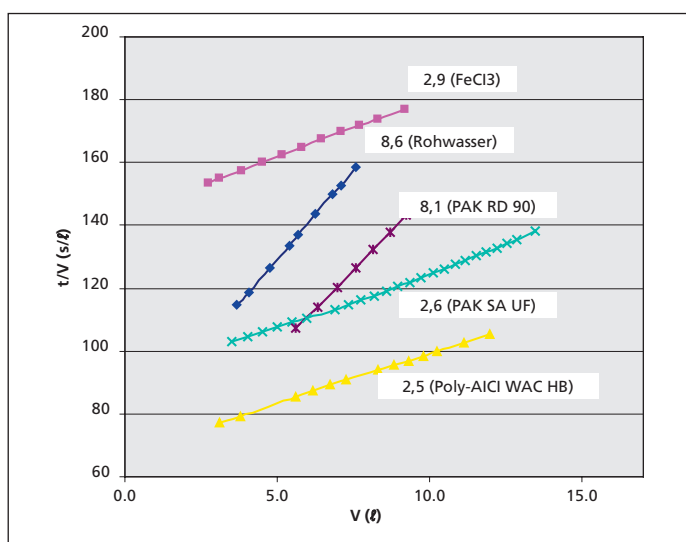


Abb. 5 Fouling-Indices des Rohwassers aus Abbildung 4, das mit Eisenchlorid, Poly-Aluminiumchlorid (WAC HB) und zwei Typen von PAK (SA UF, RD 90) behandelt wurde (Kontaktzeit 5 Minuten).

Betrieb der UF verbessern kann und wie dies von der dadurch veränderten Zusammensetzung der gelösten organischen Stoffe abhängt.

3.1 Erfolgskontrolle

Bestimmung des MFI-UF

Nach einer Methode von Boerlage [5] wird mit einer transportablen Labor-Filtrations-Anlage (Abb. 3) ein «Modified Fouling Index Ultrafiltration» (MFI-UF) bestimmt. Dazu werden kleine Filtermodule mit einer Membranfläche von 0,07 m² bei einem konstanten Transmembrandruck von 1 bar und Fluxwerten von rund 200 l/m²h eingesetzt. Die Membran ist die gleiche, aber sie wird viel höheren Belastungen als auf grosstechnischen Anlagen ausgesetzt. Wenn das Verhältnis der Zeit zum filtrierten Volumen (t/V) als Funktion des filtrierten Volumens aufgezeichnet wird, resultiert eine Gerade, deren Steigung ein Mass für das Membranfouling darstellt (Abb. 4 und 5). So erhält man mit einer Probe von 25 l nach ca. 20 Minuten eine Aussage zu deren Filtrierbarkeit.

Dabei wird sichtbar, dass sowohl Eisenchlorid, Poly-AlCl als auch einer der beiden PAK-Typen den Fouling-Index deutlich vermindern können. Mit dem zweiten PAK-Typ, der mit seiner mikroporösen Struktur die NOM-Moleküle vermutlich weniger gut aufnehmen konnte, war dies nicht möglich.

DOC-Analyse mit LC-SEC-OCD

Mit der von Huber [6] beschriebenen Kombination von Flüssigchromatografie (Liquid Chromatography, LC), einer Grössenausschluss säule (SEC) und der Detektion der vollständig zu CO₂ oxidierten organischen Kohlenstoffkomponenten (Organic Carbon Detection, OCD) ist es möglich, die im hydrophilen Anteil des DOC in der Summe erfassten Fraktionen der organischen Stoffe nach ihrem Molekulargewicht aufzutrennen und zu quantifizieren. Insbesondere interessieren die höhermolekularen Anteile der Biopolymere und der Huminstoffe, von denen bekannt ist, dass sie die Durchlässigkeit der Membranen negativ beeinflussen [7]. Die Analyse erlaubt festzustellen, in welchem Mass die geprüften Zusätze diese für die Membran kritischen DOC-Fraktionen vor der Abtrennung an der Membran zu binden vermögen.

Wenn man die erhaltenen MFI-Werte denjenigen aus der weitergehenden DOC-Analytik gegenüberstellt, wird sichtbar, dass eine deutliche Verminderung der Biopolymer-Fraktion

den Wert des Fouling-Index ebenfalls stark zu senken vermag. So bringt das Flockungsmittel WAC HB beim Fouling-Index des Rohwassers die stärkste Verminderung, obwohl mit einer Pulverkohle insgesamt mehr DOC zurückgehalten werden kann (Abb. 6).

Die Kombination der beiden Methoden hat sich bewährt, um die Machbarkeit einer Aufbereitung mit UF hinsichtlich des Fouling-Potenzials eines bestimmten Rohwassers abzuklären.

3.2 Bedarfsabhängige Anpassung

Flockungsmittelzusatz

Im Betrieb grosstechnischer UF-Anlagen lässt sich die Vorbehandlung mit Flockungsmitteln oder PAK derart einbinden, dass sie nur in den periodisch auftretenden Phasen mit erhöhten Gehalten an Trübung und organischen Stoffen (Schneesmelze, Gewitter) bedarfsabhängig aktiviert wird. Als Basis für diese Regelung werden die folgenden Messdaten (Inputs) erhoben:

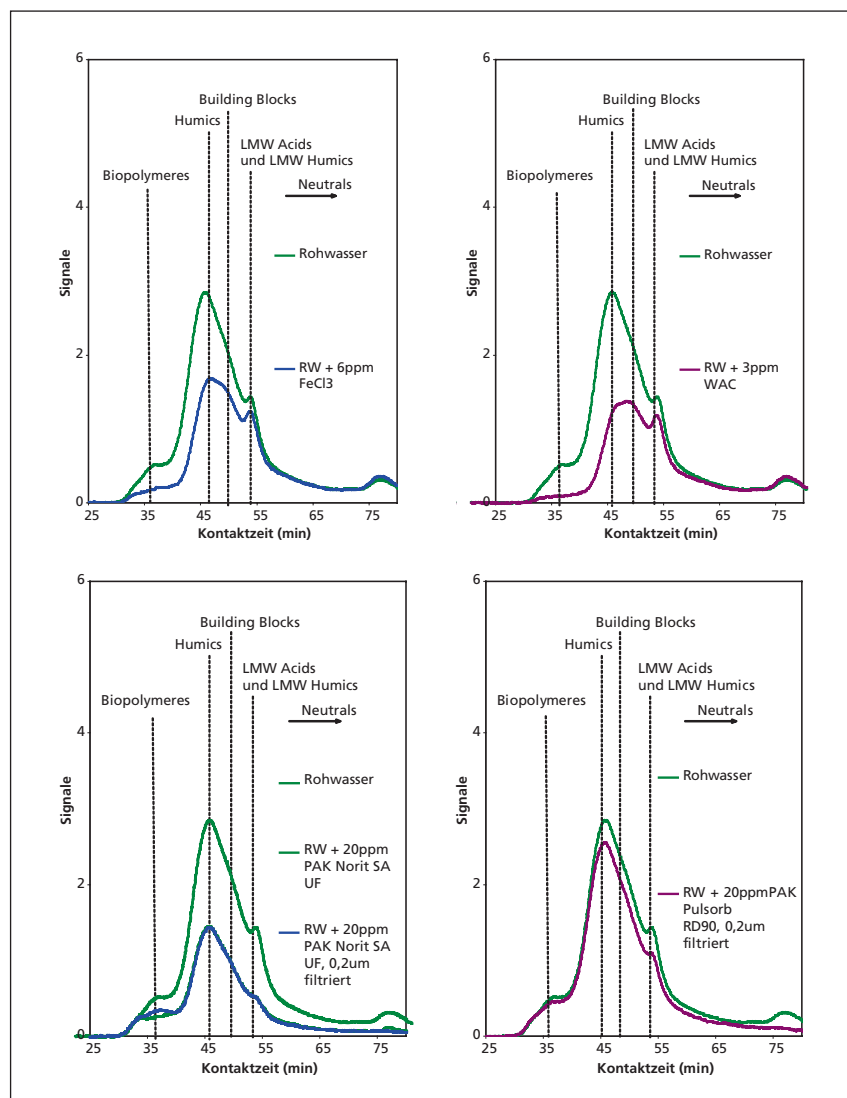


Abb. 6 LC-SEC-OCD-Chromatogramme des Rohwassers aus Abbildung 4, das mit Eisenchlorid, Poly-Aluminiumchlorid (WAC HB) und zwei Typen von PAK (SA UF, RD 90) behandelt wurde (Kontaktzeit 5 Minuten).

Messwerte:

- Trübung Rohwasser
- SAK² Rohwasser
- Verlauf Permeabilität (zeitabhängige Abnahme, normalisiert bez. Flux)
- Rohwasserzulauf
- Reinwasserbedarf (Füllstand Reservoir)

Weitere Betriebsparameter

Neben der zusätzlichen Vorbehandlung können dann über das Rohwasser-Monitoring weitere Betriebsparameter automatisch angepasst werden, sodass die Auswirkungen der erhöhten Rohwasser-Belastung auf den UF-Betrieb und die Trinkwasserqualität gemildert werden:

Regelgrößen:

- Flockung aktiv/inaktiv
- Konzentration des Flockungsmittels
- Wasserverlust (Spülfrequenz und -dauer)
- Frequenz der Membran-Desinfektionen
- Aufbereitungsleistung (vorübergehend erhöhte Toleranz bezüglich Wasserbedarf ab Füllstandsmessung)

- Crossflow On/Last Minute/Off
- Rückspülung mit Luft

Damit wird ein stabiler Betrieb auch mit periodisch stark mit Trübung und NOM belasteten Karstwässern möglich (Abb. 7).

In einem elf Monate dauernden Versuch konnten ausserdem mit einem typischen Karstwasser (Trübung bis 18 NTU, DOC 0,5 mgC/l, SAK 1 m⁻¹) mit handelsüblichen PES-Membranen mittlere Werte beim Flux von über 100 l/m²h, eine mittlere Permeabilität von 500 l/m²hbar und Spülwasserverluste von < 3 % erreicht werden. Der Chemikalienverbrauch blieb dabei mit zwei Liter NaOCl (3 %) pro 1000 m³ Reinwasser ohne weitere chemische Reinigungen im üblichen Rahmen.

4. Schlussbetrachtungen

Angesichts der weiteren Verbesserungen, die bei der Packungsdichte, der Permeabilität und der Standzeit der organischen Polymer-Membranen in den letzten drei Jahren erreicht werden konnten, bieten *keramische Werkstoffe* bei höheren Membrankosten und kleineren modulspezifischen Membranflächen bisher keine wirtschaftlich vertretbare Alternative für die Erzeugung

Preis/m² (inkl. Druckrohr)	< CHF 300.–
Membranfläche/Modul	> 40 m ²
Trenngrenzenbereich	Ultrafiltration (< 200 kD, log3 Viren-rückhalt ohne Flockung)
Permeabilität	dauerhaft > 1000
Standzeit	> 15 Jahre

Tab. 1 Eigenschaften eines konkurrenzfähigen Keramik-Moduls.

von Trinkwasser. Auch wenn die Verwendung von anorganischen Werkstoffen an sich erwünscht ist, müssen die bisher verfügbaren Keramikmembranen stets in der Kombination mit Flockungsmitteln betrieben werden, was ihren Einsatzbereich selbst dann stark einschränken würde, wenn sie zu vergleichbaren Lebenszykluskosten betrieben werden könnten. Aus der Sicht des Trinkwassermarktes bestünde hier der Wunsch nach einer Keramikmembran mit den beschriebenen Eigenschaften in *Tabelle 1*.

Die *organischen Polymer-Membranen* haben sich im Dauereinsatz in jeder Hinsicht bewährt, sodass der Bedarf nach neuen Werkstoffen eigentlich nicht dringend gegeben ist. Insbesondere konnten mit den von innen nach aussen betriebenen Hohlfasermembranen aus *Polyethersulfon* wesentliche Verbesserungen bezüglich der Fluxleistungen und der Permeabilität gegenüber den früheren Werkstoffen Cellulose-Acetat und Polyvinylidenfluorid (PVDF) erreicht werden. UF-Membranen aus Cellulose-Acetat und dessen Derivaten sind anfällig auf mikrobiellen Abbau, was sich in häufigen Faserbrüchen und der Notwendigkeit von Rückspülungen mit Chlor niederschlägt. Auf der anderen Seite sind Membranen aus PVDF zwar chemisch sehr widerstandsfähig, erreichen aber aufgrund ihrer wasserabweisenden Oberfläche bei vergleichbaren Werten für Porosität und Transmembrandruck geringere flächenspezifische Durchsatzleistungen [8].

Weitere Optimierungen betreffen den *Anlagenbau* mit einer möglichst raumsparenden Anordnung der Filtermodule, die gleichzeitig Druckverluste und somit den Energieverbrauch vermindert. Hier hat sich die *vertikale Anordnung* der Filtermodule in 1- bis 2-reihigen Racks gegenüber einer horizontalen Anordnung in Druckrohren durchgesetzt, nicht zuletzt wegen der Möglichkeit, die Module nach der Integritätsüberprüfung im Druckhaltetest einfach entlüften und an einzelnen Modulen Wartungsarbeiten durchführen zu können.

² SAK = Spektraler Absorptionskoeffizient

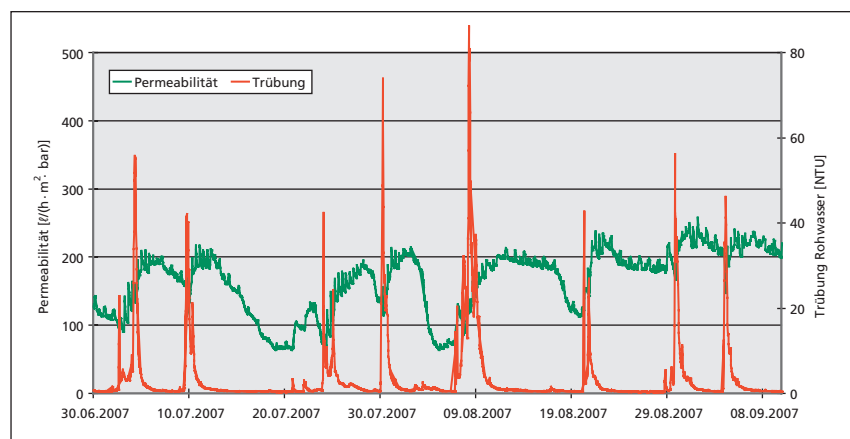


Abb. 7 Verlauf von Trübung und Permeabilität bei der Aufbereitung eines Karstwassers mit hoher NOM-Belastung mit bedarfsgesteuerter Flockung.

Forschungsbedarf besteht weiterhin hinsichtlich der optimalen Einbindung der UF in *mehrstufige Aufbereitungsverfahren*. Hier wird mit pulverförmiger Aktivkohle experimentiert, die an der Membran zusammen mit den daran adsorbierten Verunreinigungen abgetrennt und gesondert behandelt werden kann. Gegenüber den herkömmlichen granulierten Filterkohlen sind als Vorteile der geringere Raumbedarf und die Möglichkeit des gezielten, bedarfsabhängigen Einsatzes zu nennen. Herkömmliche Festbett-Filter mit granulierter Filterkohle verlieren ihre Adsorptionsleistung für natürliche (NOM) und anthropogene, organische Stoffe in der Regel im Verlauf weniger Monate, wie umfangreiche Versuche im Rahmen des WAVE 21-Projekts gezeigt haben [9].

Die Autoren bedanken sich beim Fonds Umwelttechnologieförderung des Bundesamts für Umwelt für die Finanzierung des besprochenen Forschungsprojekts.

Literaturverzeichnis

- [1] Boller, M.; Pianta, R. (2000): Trinkwasser aus Karstquellen – ein Fall für die Membrantechnik, Eawag News 48: 29–31.
- [2] Klahre, J.; Robert, M. (2002): Ultrafiltration zur Gewinnung von Trinkwasser, gwa 82 (1): 61–68.
- [3] Peter, A. (2008): Taste and Odour in Drinking Water: Sources and Mitigation Strategies. Dissertation ETH Zürich, No. 17761, 141 p.
- [4] Lerch, A. et al. (2003): Trinkwasseraufbereitung von Oberflächengewässern mittels Flockung/ Ultrafiltration. In: Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung, 5. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik. Hrsg. Melin, T. und Dohmann, M.
- [5] Boerlage, S.F.E. et al. (2000): Modified fouling index (ultrafiltration) to compare pretreatment processes of reverse osmosis feedwater, Desalination 131: 201–214.
- [6] Huber, S.A.; Frimmel F.H. (1992): A New Method for the Characterization of Organic-Carbon in Aquatic Systems, International Journal of Environmental Analytical Chemistry 49: 49–57.
- [7] Jermann, D. et al. (2007): Interplay of different NOM fouling mechanisms during ultrafiltration for drinking water, Wat. Res. 41: 1713–1722.
- [8] Tatzel, A. et al. (2009): Pilotstudie über verschiedene Aufbereitungskonzepte der SEBES – Trinkwasseraufbereitung in Luxemburg, in: Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung, 8. Aachener Tagung Wasser und Membranen. Hrsg. Melin, T. und Dohmann, M.
- [9] Boller, M. et al. (2008): Trinkwasseraufbereitung mittels Aktivkohle. Neue Erkenntnisse, gwa 88 (1), 1–9.

Keywords

Ultrafiltration – Flockungsmittel – LC-OCD – Karstquellen

Adressen der Autoren

Joachim Klahre, Dr.
joachim.klahre@membratec.ch

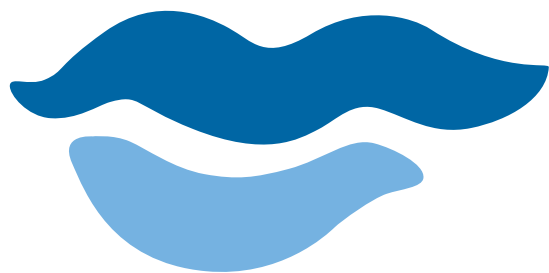
Sarah Bitz
sarah.bitz@membratec.ch

Membratec AG
Technopôle 3, CH-3960 Sierre
Tel. +41 (0)27 456 86 30

Jacqueline Traber
jacqueline.traber@eawag.ch

Wouter Pronk, Dr.
wouter.pronk@eawag.ch

Eawag
Abteilung Verfahrenstechnik
CH-8600 Dübendorf



Trinkwasser
santé
eau potable
acqua potabile

membratec
La référence en ultrafiltration
Die Referenz für Ultrafiltration

www.membratec.ch
3960 Sierre / Switzerland