

Ultrafiltration zur Gewinnung von Trinkwasser

Erste Betriebserfahrungen aus Membranfilteranlagen in der Schweiz

JOACHIM KLAHRE, MYRIAM ROBERT



J. KLAHRE

1. Einleitung

Quellwässer in Gebirgsregionen gelten allgemein als qualitativ hoch stehend und die meist kleinen Wasserversorgungen sehen oft aus ökonomischer Notwendigkeit von einer Aufbereitung des Trinkwassers ab. Aus Bayern ist bekannt, dass Rinderkot in 30 % der untersuchten Proben enterohämorrhagische Colibakterien und/oder Campylobacter sowie in 80 % der Fälle Cryptosporidien enthielt [4]. Nicht nur aus der Alpwirtschaft können pathogene Mikroorganismen ins Einzugsgebiet von hoch gelegenen Quellen gelangen, besonders wenn der Untergrund Karst- oder Kluftstrukturen aufweist. In diesem Fall ist die Filterwirkung bei der Bodenpassage ungenügend und von vielen Quellgebieten ist bekannt, dass bei starken Niederschlägen oder zu Zeiten der Schneeschmelze Oberflächenwasser in die Quellen infiltriert [8]. Aus diesen Gründen und weil für eine UV-Bestrahlung mit Verwurf bei zu hoher Trübung oft

Im Vergleich zum angrenzenden Ausland ist die Membranfiltertechnik in der Schweiz noch wenig verbreitet. Dass aber gerade im Berggebiet und dort besonders in Zonen mit kalkhaltigem Untergrund interessante Anwendungen bestehen, beweist die Tatsache, dass seit dem 6. Juli 2000 fünf grosstechnische Anlagen mit Leistungen zwischen 10 und 125 l/sek in Betrieb genommen werden konnten. Aus über 1600 Betriebstagen konnten betreffend Betriebssicherheit und -kosten überwiegend positive Erfahrungen gesammelt werden mit unterschiedlichen Rohwasserqualitäten und Anlagenkonfigurationen, die den besonderen örtlichen Verhältnissen bezüglich Druckverhältnissen und Raumangebot Rechnung tragen.

L'ultrafiltration pour la potabilisation d'eau – premières expériences avec la filtration membranaire en Suisse

La production d'eau potable par ultrafiltration est encore très peu répandue en Suisse. La mise en service de cinq installations depuis le 6 juillet 2000 montre cependant que, même en montagne, et surtout dans les zones karstiques les applications existent. Les débits de production varient entre 10 et 125 l/s et la conception des installations doit tenir compte de diverses contraintes locales concernant la qualité de l'eau brute, les pressions à disposition et l'espace au sol. L'expérience acquise ces derniers mois couvre plus de 1600 jours d'exploitation et permet de tirer un premier bilan positif sur le procédé d'ultrafiltration et sa mise en œuvre dans des installations de taille et de caractéristiques différentes.

Drinking Water from Ultrafiltration – First Results with Membrane Filtration Plants in Switzerland

Membrane technology is a rather uncommon method for drinking water production in Switzerland compared to some neighbouring countries. Five full-scale plants commissioned by water authorities in mountain areas since July 2000 are a sign of increasing interest, particularly in karstic water zones. These plants filter between 10 and 125 l/sec and had to be adapted to the local situations concerning raw and drinking water pressures as well as spatial arrangements. Experiences from over 1600 days of service with different raw water qualities that may vary rapidly show that fouling problems can be controlled while producing high quality drinking water at costs that equal those in conventional systems.

nicht genug Wasser oder Reservoirvolumen zur Verfügung steht, ist in den letzten Jahren die Aufbereitung im Ultrafiltrationsverfahren mit Membranen für kleinere Wasserversorger interessant geworden [6,3]. Im Schweizer Berggebiet sind seit dem Sommer letz-

ten Jahres fünf solche Anlagen in Betrieb gegangen, als Ersatz bestehender Sandfilteranlagen oder zur Aufbereitung bisher nur mit Chlor behandelter Quellwässer. Diese Anlagen und die damit erreichten, ersten Betriebsergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

Filterfläche pro Membranmodul	34,3 m ²
Anzahl Hohlfasern	10000
Innendurchmesser	0,8 mm
Moduldurchmesser	200 mm
Modullänge	1522 mm
Mittlere Porengrösse	10 nm (0,00001 mm)
Material der Hohlfasern	Polyethersulfon
Nennleistung pro Modul	3000 l/Std.
Transmembranärer Druckverlust	0,2 bis 1,0 bar
Geschätzte Lebensdauer	7 Jahre

Tab. 1 Technische Daten des verwendeten UF-Moduls

Filtrat verläuft zentral im Modul und erlaubt bei der Rückspülung eine homogene Druckverteilung (Abb. 1). Dieser Umstand stellt eine wirksame Rückspülung sicher.

Der für die Membranen verwendete Kunststoff Polyethersulfon ist in der Membrantechnik sehr verbreitet, weil er hohe Temperaturen (75 °C), extreme pH-Werte (1 bis 13) und Oxidationsmittel wie Chlor gut erträgt [1]. Ausserdem lassen sich daraus Membranen mit einem breiten Bereich an Porengrössen herstellen.

2.1.2 Beschreibung einer Membranbatterie

Eine Ultrafiltrationsbatterie ist eine selbständig funktionsfähige Einheit mit eigenem Vorfilter und Versorgungsgerät (Pumpe oder Regulierventil). Jede Batterie besteht aus mehreren Ebenen oder Reihen von Modulen und ist wiederum mit mehreren Rezirkulationspumpen ausgestattet, die die ständige seitliche Anströmung (Cross-Flow) der

Rückspülung. Die Hauptaufgabe dieses Vorfilters ist der Schutz der Hohlfasern vor groben Partikeln, die deren Öffnungen (Innendurchmesser von 0,8 mm) verstopfen könnten. Der Vorfilter ist im Rohwasserzulauf vor der Filtereinheit mit den Versorgungsgeräten und den Membranmodulen eingebaut.

Der Vorfilter eliminiert zuerst Partikel mit über einem Millimeter Durchmesser, bevor auf einer Fläche von 3000 bis 4500 cm² aus rostfreiem Stahl Partikel über 80 bis 130 µm abgetrennt werden. In der Regel wird die Rückspülung des Vorfilters mit den Rückspülungen der Filterbatterien synchronisiert. Dabei saugt ein Karussell von Düsen in geringem Abstand von der Oberfläche des Filters alle abgelagerten Verunreinigungen ab. Der Rohwasserbedarf für diese Reinigung beträgt 25 bis 64 Liter. Dieses gering verschmutzte Wasser kann direkt in einen Vorfluter eingeleitet werden.

2.2 Betriebszustände

Die Ultrafiltrationsanlagen sind vollständig automatisiert und funktionieren im Stand-alone-Betrieb mit den folgenden Betriebsmodi:

2.2.1 Modus Produktion

Wenn das Rohwasser drucklos zuläuft, wird der für die Filtration erforderliche geringe Druck von 0,2 bis 1 bar mit einer frequenzregulierten Versorgungspumpe erzeugt. Andernfalls kann die Pumpe durch ein stufenlos variierbares Druckregulierventil ersetzt werden. Mit dem derart eingestellten Druck werden die Membranen mit vorfiltriertem Rohwasser beschickt, die Partikel bleiben auf der Membran zurück und es wird Reinwasser produziert. Die Rezirkulationspumpe kann eingeschaltet (Cross-Flow) oder ausgeschaltet (Dead-End) sein, auch eine Kombination beider Verfahren während eines Produktionszyklus ist möglich. Die Dead-End-Filtration braucht weniger Energie, während im Cross-Flow Schmutzteilchen besser in Schwebelage gehalten werden können, was besonders vor einer Rückspülung erwünscht ist.

Der Rohwasserzufluss wird während der 30 bis 60 Minuten des Produktionszyklus über einen Durchflussmesser im Filtrat gesteuert, sodass immer die gleiche Menge Reinwasser produziert werden kann. Dieser Produktionsmodus wird während 92 bis 96 % der Zeit gefahren.

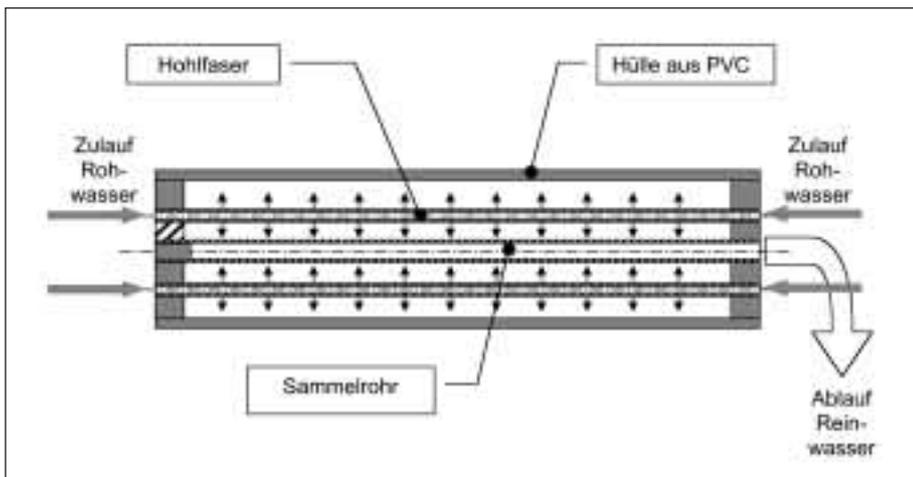


Abb. 1 Schema eines Ultrafiltrationsmoduls im Längsschnitt

2. Membranfilteranlagen im Schweizer Berggebiet

2.1.1 Beschreibung des verwendeten Ultrafiltrationsmoduls

Ein Ultrafiltrations-(UF-)Modul enthält je 10000 Hohlfasern aus Kunststoff, die über eine Länge von 150 cm parallel in einer Kartusche aus Hart-PVC mit 20 cm Durchmesser verlaufen (Tab. 1). Das Rohwasser wird durch die Innenseite der Fasern geleitet, deren Wand für das saubere Wasser durchlässig ist, während Verunreinigungen wie Lehm und Mikroorganismen darauf zurückgehalten werden. Das Sammelrohr für das

Membranen in den Hohlfasern sicherstellen.

In allen besprochenen Anlagen wurden die Module senkrecht eingebaut. Diese aufrechte Anordnung der UF-Module ermöglicht sowohl eine bessere Entlüftung als auch eine vollständige Entleerung der Anlage, was besonders für Reinigung und Desinfektion von Vorteil ist. Ausserdem kann die Sedimentation von Partikeln auf der Konzentratseite verhindert werden, was beim Einbau der Module in Druckrohre von Vorteil ist.

2.1.3 Vorfiltration

Die Vorfiltration erfolgt in einem industriellen Vorfilter mit automatischer

2.2.2 Modus Rückspülung

Mit der Rückspülpumpe wird zuvor filtriertes Wasser aus dem eigens zu diesem Zweck vorgesehenen Rückspülbehälter im Rückwärtsgang durch die Membran gepresst, wodurch einerseits die Verunreinigungen von der Membran abgelöst und andererseits das im Rezirkulationskreislauf befindliche Konzentrat aus der Anlage ausgewaschen werden. Dieses Konzentrat enthält nur die aus dem Rohwasser isolierten Verunreinigungen und keine chemischen Hilfsmittel und kann somit einem Gewässer zugeführt werden. Je nach Qualität des Rohwassers müssen für Rückspülungen 3 bis 8 % des Reinwassers aufgewendet werden. Der Betreiber kann Häufigkeit und Dauer der Rückspülungen einstellen.

Die Rückspüleleistung liegt in der Regel bei 250 bis 300 l/Std. und pro Quadratmeter Membranfläche. Die Rückspülung wird in den letzten Momenten des Produktionsmodus durch Zuschalten der Rezirkulationspumpen vorbereitet. In der letzten Minute des Filtrationsintervalls wird also aus dem Dead-End in den Cross-Flow-Modus umgeschaltet.

2.2.3 Modus Membrandesinfektion

Zur Verhinderung eines mikrobiellen Belags, der durch Rückspülungen nicht mehr entfernt werden kann, wird die Anlage zwei- bis dreimal pro Tag mit einer Lösung eines stark verdünnten Desinfektionsmittels (Wasserstoffperoxid H_2O_2 , Peressigsäure $C_2H_4O_3$ oder Javelwasser $NaOCl$) desinfiziert und gespült. Auch wenn die UF-Membranen eine Barriere für sie darstellen, können sich Mikroorganismen doch auf der Rohwasserseite festheften und vermehren [9]. Mit den Rückspülungen allein kann dies nicht immer verhindert werden. Häufigkeit und Dauer der Desinfektionen werden durch das Ausmass der Belagsbildung auf einer sauberen Membran bestimmt. Mit dieser Desinfektion wird nicht das Reinwasser behandelt, vielmehr wird die Anlage vor der Rückkehr in den Produktionsmodus so lange gespült, bis kein Desinfektionsmittel mehr in das Reinwasser gelangen kann. Wenn kein Anschluss an eine Kläranlage vorliegt, wird die Desinfektionslösung mit Natriumbisulfit ($NaHSO_3$) neutralisiert und einem Vorfluter zugeführt. Der Betreiber kann wiederum die Häufigkeit und die Dauer der Desinfektionen sowie die Konzentration des Desinfektionsmittels wählen.

2.2.4 Modus chemische Reinigung

Die chemische Reinigung wird je nach Bedarf ein- bis sechsmal pro Jahr, bevorzugt zu einem Zeitpunkt geringen Wasserbedarfs, durchgeführt. Die dabei verwendeten Reiniger vermögen die meisten Verunreinigungen abzulösen, die die Membranen trotz Rückspülungen und Desinfektionen verblocken. Die Permeabilität als Mass für die Sauberkeit der Membran kann kontinuierlich erfasst werden über die Filtratleistung und den transmembranären Druckverlust. Wenn die Permeabilität einen gewissen Schwellenwert unterschreitet, kann durch den Betreiber eine chemische Reinigung eingeleitet werden. Dazu wird der Rezirkulationskreislauf mit einer auf 40 °C erwärmten Lösung während einer bis zwei Stunden gespült. Die Lösung ist entweder stark alkalisch (1 % Natronlauge) oder stark sauer (1 % Zitronensäure). Die Abwässer aus der chemischen Reinigung und den nachfolgenden Spülungen werden vor der Abgabe an eine Kläranlage neutralisiert. Die gesamte chemische Reinigung dauert ca. drei bis vier Stunden. Der Betreiber kann selbst eine Reinigungslösung ansetzen oder die Dosierung einer vorbereiteten Lösung auslösen, worauf alles weitere automatisch abläuft. Dauer und Temperatur der Reinigung können programmiert werden.

2.3 Die Überprüfung der Membranintegrität

Beim Hersteller werden die Membranmodule vor ihrer Auslieferung einzeln auf ihre Integrität hin geprüft. Bei der

Inbetriebnahme einer grosstechnischen Anlage können aber einzelne Hohlfasern durch Druckstösse beschädigt werden. Ausserdem stellt die Membran nicht die einzige Schranke zwischen Roh- und Reinwasser dar, weshalb die gesamte Anlage bezüglich der Dichtheit dieser Schranke überprüft wird. Diese Überprüfung erfolgt jeweils nach der Inbetriebnahme und danach einmal jährlich im Rahmen der Hauptwartung. Mit diesem Test sollen in erster Linie defekte Hohlfasern detektiert werden, aber auch Lecks bei Dichtungen oder Ventilen. Zu diesem Zweck wird der Rezirkulationskreislauf – die Konzentratseite also – mit Luft unter einen Druck von maximal 2 bar gesetzt. Die intakten, benetzten Ultrafiltrationsmembranen sind für Luft nicht durchlässig. Der Durchtritt von Luft auf die Filtratseite und ein damit verbundener Druckabfall auf der Konzentratseite kann also nur durch eine defekte Hohlfaser oder eine andere undichte Stelle erfolgen [2]. Dieser Test kann neuerdings auch automatisch durchgeführt werden. An den beschriebenen Anlagen erfolgte er jedoch noch manuell.

2.4 Besonderheiten der einzelnen Anlagen

Die Nennleistung der einzelnen Anlagen (Tab. 2) liegt im Bereich von 10 bis 125 l/sek, womit der jeweilige Wasserbedarf von ca. 2000 bis 25 000 Personen (bei einem Pro-Kopf-Verbrauch gemäss SVGW von 404 l pro Tag inkl. Industrie) gedeckt werden kann. Diese Nennleistung wird unterschiedlich stark aus-

Anlage	Leistung l/sek	Modulanordnung	Raumbedarf $L \times B \times H$ in cm	Druck Zulauf bar	Druck Ablauf bar
Thyon	19	1 Batterie mit 3-mal 7 Modulen	300 × 250 × 250	6	0,2
Torgon	11	1 Batterie mit 2-mal 7 Modulen	400 × 100 × 240	4,3	0,2
Vionnaz	17	1 Batterie mit 3-mal 7 Modulen	300 × 250 × 250	0,5	0,3
Lens	125	5 Batterien mit 4-mal 6 Modulen	590 × 740 × 250	0,2	0,2
Muotathal	30	1 Batterie mit 2-mal 18 Modulen	300 × 460 × 270	8	6

Tab. 2 Nennleistung, Modulanordnung, Raumbedarf und Druckverhältnisse der Anlagen



Abb. 2 UF-Anlage Lens



Abb. 3 UF-Anlage Thyon

genutzt, entsprechend der Verfügbarkeit von Rohwasser, Reinwasser aus anderen Quellen und deren jeweiligen Kosten. Die Anlage von Lens (Abb. 2) besteht aus fünf Batterien, die völlig unabhängig voneinander betrieben werden können. Sie kann zweistufig gefahren werden: das Rückspülwasser aus den Batterien 2 bis 5 kann auf der Batterie 1 wiederum zu Trinkwasserqualität aufbereitet werden.

Für den Raumbedarf (Tab. 2) wurde jeweils nur das eigentliche Filterelement ohne Vorfilter, Neutralisations- und Chemikalienbehälter berücksichtigt. Die kleinste Anlage in Torgon wurde in den sehr beschränkten Raum eines bestehenden Pumpwerks eingepasst. Auch die Anlage von Thyon (Abb. 3) fand in einem bestehenden Gebäude Platz, das davor von Sandfiltern mit nur einem Drit-



Abb. 4 UF-Anlage Vionnaz

tel der aktuellen Kapazität besetzt war. Für alle anderen Anlagen wurden neue Gebäude erstellt. Im Fall von Muotathal konnte das Gebäudevolumen im Vergleich zum Vorprojekt mit Sandfiltern um mehr als ein Drittel vermindert werden. Die Anlage von Vionnaz (Abb. 4) steht in einer vorfabrizierten Doppelgarage, wodurch die Baukosten tief gehalten werden konnten.

In Muotathal übernimmt jeweils eine grosse Pumpe die Rezirkulation in 18 Modulen, die in zwei Ebenen angeordnet sind. (Abb. 5). Diese beiden Rezirkulationseinheiten werden nacheinander separat rückgespült, weil die Steigleitung zum Reservoir keinen ausreichenden Durchfluss für eine gleichzeitige Rückspülung liefern kann. In allen anderen Anlagen versorgt eine Rezirkulationspumpe sechs oder sieben UF-Module.

3. Betriebserfahrungen

3.1 Filtratqualität

Auf den Anlagen von Torgon und Vionnaz wurden in den ersten Wochen nach der Inbetriebnahme Werte von über 10 KBE/ml im Filtrat gemessen. Diese Gesamtkeimzahlen konnten auf eine Undichtigkeit des Filters zurückgeführt werden, die nach dem Integritätstest lokalisiert und behoben werden konnte. Seither, und auf allen anderen Anlagen, liegen die Werte für die Gesamtkeimzahl bei maximal 10 KBE/ml. E. coli oder Enterokokken waren in keiner der 18 Proben nachweisbar.

Auch bei Werten im Rohwasser von über 50 FNU blieb die Trübung im Filtrat aller Anlagen immer unter 0,01 FNU. Das Rohwasser in der Anlage von Thyon stammt aus dem Stausee der Grande Dixence und ist mit ca. 15 FNU das ganze Jahr über stark getrübt.

Die Mineralisation des Rohwassers wurde in keiner der Anlagen durch die Filtration beeinflusst. Die Oxidierbarkeit mit KMnO_4 als Mass für den Gehalt an gelösten organischen Stoffen wurde im Mittel um 20 bis 25% vermindert. Typische Analysenwerte sind beispielhaft in Tabelle 3 dargestellt.

Diese Resultate zeigen, dass die Ultrafiltration als Aufbereitungsverfahren besonders dann interessant wird, wenn das Rohwasser häufig durch Trübungsspitzen oder durch eine langfristig erhöhte Grundtrübung, wie zu Zeiten der Schneeschmelze, belastet ist und die



Abb. 5 UF-Anlage Muotathal

Parameter	Rohwasser	Filtrat
Gesamtkeimzahl KBE/ml	110	< 10
E. coli KBE/100 ml	1	0
Enterokokken KBE/100 ml	1	0
Oxidierbarkeit KMnO ₄ mg/l	1,6	1,6
Härte °F	14,8	14,7
Trübung FNU	4,7	0,008

Tab. 3 Einfluss der Ultrafiltration auf physikochemische und bakteriologische Parameter am Beispiel der Anlage von Lens

Möglichkeit des Verwurfs durch Rohwassermangel oder ungenügende Reservoirkapazitäten nicht gegeben ist. In vielen Fällen und besonders bei Karst- oder Kluftwässern sind Trübungsspitzen von hohen Keimzahlen begleitet [6]. Sie können in einer UF-Anlage, ebenso wie die Trübung, sehr wirksam vermindert werden, was bei Sandfilteranlagen häufig nicht möglich ist. Hingegen muss für die Elimination gelöster Verunreinigungen (Nitrat, DOC, Pestizide usw.) auf komplementäre Verfahren wie z. B. eine Pulveraktivkohle-Dosierung zurückgegriffen werden.

3.2 Einfluss der Rohwasserqualität: Membranfouling und -permeabilität

In der Membrantechnik bedient man sich der Permeabilität zur Charakterisierung der Durchlässigkeit eines Filters. Sie wird als Durchfluss angegeben, der bei einem bestimmten Druck einen Quadratmeter Filterfläche passiert. Der Wert wird ausserdem für eine Wassertemperatur von 20°C normalisiert, weil er durch die Viskosität des Wassers stark beeinflusst wird.

In der Idealvorstellung sollte ein Rohwasser die Durchlässigkeit eines Filters nicht beeinflussen, die somit auf einem hohen Niveau über eine lange Zeit erhalten bleibt. Dies ist der Fall bei der Anlage von Thyon (Abb. 6), die seit der Inbetriebnahme ohne chemische Reinigung und mit einer hohen Permeabilität

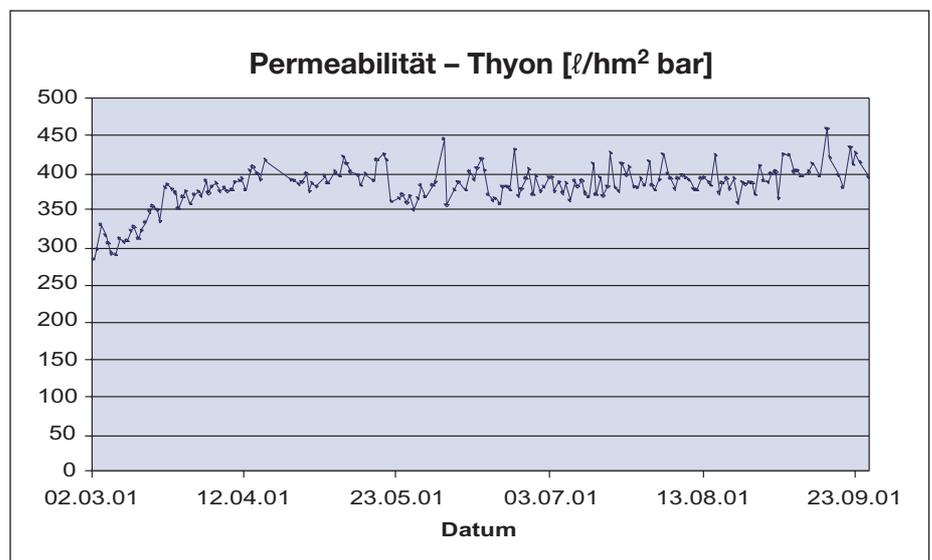


Abb. 6 Verlauf der Membranpermeabilität in Thyon

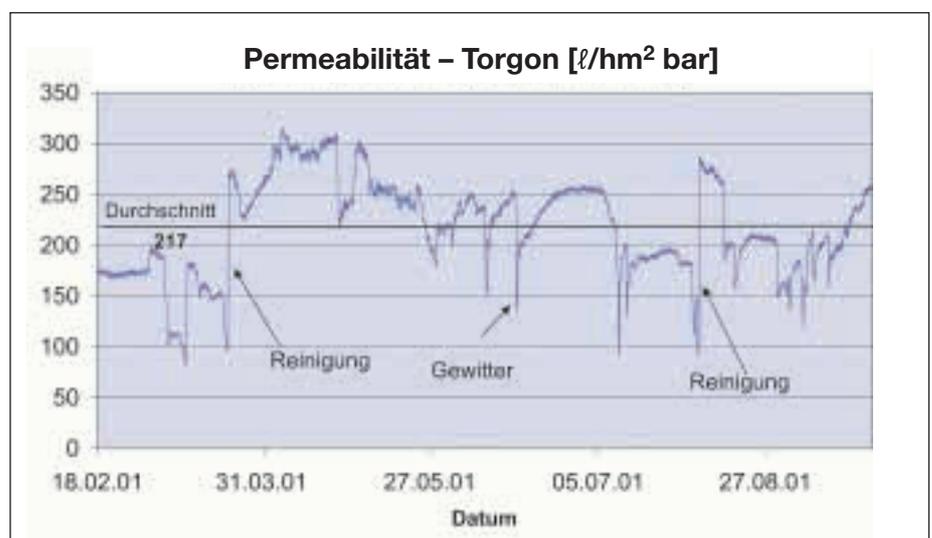


Abb. 7 Verlauf der Membranpermeabilität in Torgon

funktioniert. Das Rohwasser von Thyon ist jedoch sehr weich (3,7 °F) und wenig belastet mit organischen Stoffen (Oxidierbarkeit KMnO_4 : 1,5 mg/ℓ). Die hohe Trübung (15 FNU), die hauptsächlich mineralischen Ursprungs ist, mag sogar das ihre zur Erhaltung der Permeabilität beitragen, konnte jedoch mit der Sandfilteranlage nicht auf einen für Trinkwasser zulässigen Wert gesenkt werden. Abweichend von dieser Idealvorstellung arbeiten die meisten Membranfilteranlagen aber mit einer variierenden Permeabilität. Dies ist das Resultat einer stark schwankenden Qualität des Rohwassers und beeinträchtigt weder die Qualität des Filtrats noch den Betrieb der Anlage.

So ist die Situation bei einem Rohwasser aus einem Karstgebiet, wie es in den anderen vier Anlagen aufbereitet wird, deutlich anders als in Thyon: nach Trübungsspitzen, z. B. bei Niederschlägen oder während der Schneeschmelze, kann die Permeabilität kurzfristig absinken (Abb. 7). Zwei oder drei Tage danach ist in der Regel ein Wiederanstieg zu beobachten, der ohne besondere Massnahmen des Anlagenbetreibers erfolgt. Auch wenn die Permeabilität kurzfristig absinkt, produziert die Anlage immer die gleiche Menge Filtrat, da der Druck im Zulauf automatisch der geringeren Durchlässigkeit des Filters angepasst wird.

Mehrere Faktoren sind für den Wiederanstieg der Permeabilität verantwortlich: ein Rückgang der Trübung im Rohwasser, die Wirkung der Rückspülungen und der Membranendesinfektionen sowie möglicherweise gewisse Rücklösungsphänomene von Stoffen, die sich vorübergehend auf der Membran festgesetzt haben.

Neben der Rohwasserqualität ist die Auslastung der Anlage sowie die Häufigkeit und Wirksamkeit von Reinigungsmassnahmen wichtig für die Erhaltung der Permeabilität. Aus Tabelle 4 ist ersichtlich, dass die Anlage von Vionnaz deutlich stärker ausgelastet ist als jene von Lens, weshalb trotz häufigerer Reinigungen die Permeabilität im Mittel tiefer liegt. In Thyon und Lens ist zu Zeiten der touristischen Hochsaison im Winter die Auslastung deutlich höher als im Sommer.

3.3 Membranintegrität

In über 220 installierten und geprüften UF-Modulen wurden bisher vier defekte Hohlfasern gefunden. Die entsprechen-

Anlage	Betriebsdauer Monate	Mittelwert Permeabilität ℓ/hm ² bar	Mittlere Ausnutzung der Nennleistung %
Thyon	17	352	7/85*
Torgon	14	223	79
Vionnaz	13	170	84
Lens	7	210	30/70*
Muotathal	4	240	72

* Angaben für Sommer/Winter

Tab. 4 Permeabilitätswerte und Auslastung der verschiedenen Anlagen

den Module wurden ausgebaut, die defekte Hohlfaser wiederum mit Hilfe von Druckluft isoliert und von beiden Seiten mit einem Epoxidharzkleber verstopft. Die Reparatur dauerte ca. eine Stunde. Danach war die Anlage wieder betriebsbereit. Eine mangelhafte Abdichtung zwischen Rohwasser und Reinwasser wurde in den meisten Fällen aber nicht durch eine defekte Hohlfaser in einem Membranmodul verursacht. Häufiger als defekte Hohlfasern waren nach der Inbetriebnahme einer neuen Anlage undichte Stellen, die durch defekte oder schlecht platzierte Dichtungen hervorgerufen worden waren.

3.4 Wartungsbedarf

Die Anlagen sind für einen vollautomatischen Betrieb ausgelegt. Ein Fernüberwachungssystem via Telefonverbindung ermöglicht die ständige Kontrolle der Anlagenfunktionen und eine erste Diagnose bei Störungen.

Die Anlagen werden in der Regel ca. einmal wöchentlich gewartet, wobei häufig nur ein Kontrollgang erforderlich ist, um kleinere Störungen zu entdecken, die das Fernüberwachungssystem nicht erfassen kann. Kleinere Wartungsarbeiten bestehen in der Kalibrierung von pH- und Redoxsonden, dem Fetten beweglicher Teile, dem Nachfüllen von Chemikalien oder dem Ersetzen von Dichtungen.

Einmal jährlich werden die Anlagen eingehend geprüft, wobei auch die Membranintegrität kontrolliert wird. Ein manueller Integritätstest dauert ca. eine halbe Stunde.

Andere Unterhaltsarbeiten werden nur bei Bedarf durchgeführt, so das Auslösen einer wiederum automatisch ablauf-

enden chemischen Reinigung. Bisher musste keine der Anlagen mehr als sechsmal im Jahr gereinigt werden, eine Anlage musste selbst nach 17 Betriebsmonaten bisher nicht chemisch gereinigt werden (Tab. 7). Es ist jedoch denkbar, dass die Membranen mit zunehmendem Alter häufiger gereinigt werden müssen. Eine chemische Reinigung dauert drei bis vier Stunden. In einer der kleineren Anlagen muss so mit einem Wartungsaufwand von ca. 20 Arbeitstagen pro Jahr gerechnet werden.

Art der Störung	Häufigkeit
Stromunterbruch	4-mal
Defekte Sicherung	2-mal
Pumpe, Regulierventil defekt	2-mal
Kompressor defekt	1-mal

Tab. 5 Übersicht der registrierten Störungen mit Betriebsunterbruch während total 1650 Betriebstagen auf den fünf Anlagen

Anlage	Rohwasserausbeute %
Thyon	98
Torgon	95
Vionnaz	93
Lens	92/98*
Muotathal	93

* Angaben für einstufigen/zweistufigen Betrieb

Tab. 6 Rohwasserausbeute

Anlage	Desinfektionen pro Tag	Desinfektionsmittel NaOCl 5 % (l/1000 m ³)	Reinigungen pro Jahr (Schätzung)	Reinigungsmittel NaOH 30 % (l/1000 m ³)
Thyon	0,8	0,58	0	–
Torgon	2,2	0,3	3	0,28
Vionnaz	2,4	0,38	6	0,16
Lens	2,3	1,15	3	0,34
Muotathal	2	0,27	3	0,18

Tab. 7 Chemikalienverbrauch

Anlage	Chemikalien Rappen/m ³	Energie Rappen/m ³	Wartung Rappen/m ³	Membranersatz Rappen/m ³	Total Rappen/m ³
Thyon	0,003	0,8	2,2	2,2	5,2
Torgon	0,1	0,8	3,8	2,5	7,2
Vionnaz	0,1	1,2	2,5	2,4	6,2
Muotathal	0,1	0,6	1,4	2,4	4,5
Mittelwert	0,1	0,85	2,5	2,4	5,8

Tab. 8 Kosten aus dem Betrieb der bestehenden Anlagen, in Rappen pro Kubikmeter produzierten Trinkwassers (Strom zu 12 Rp./kWh)

3.5 Betriebssicherheit

Bisher sind an keiner der Anlagen Störungen aufgetreten, die auf das Membranfilterverfahren an sich zurückzuführen wären, wie etwa ein Verblocken der Membran oder Schäden, die einen Verlust der Integrität zur Folge gehabt hätten. Vielmehr wurden Betriebsunterbrüche durch Faktoren verursacht, wie sie in jeder anderen Wasseraufbereitungsanlage auch möglich sind (Tab. 5).

3.6 Ausbeute

Die Ausbeute einer Anlage ist der Anteil des Rohwassers, der nach Abzug der für Rückspülungen, Desinfektionen und Reinigungen verwendeten Volumina als Trinkwasser ins Netz gespeist wird (Tab. 6). Ihr Wert hängt in erster Linie von der Qualität des Rohwassers ab.

Durch den zweistufigen Betrieb kann auf der Anlage von Lens die Ausbeute auf über 98 % gesteigert werden. Dieser zweistufige Betrieb wird aber nur zugeschaltet, wenn im Winter wenig billi-

ges Rohwasser zur Verfügung steht, weshalb der aktuelle Wert eher tief liegt. Im Fall von Muotathal ist ausserdem die Periode der Inbetriebnahme mit eingerechnet, während der die Ausbeute bedingt durch verschiedene Versuche noch tiefer liegt als im späteren Normalbetrieb.

3.7 Chemikalienverbrauch

Der spezifische Bedarf an Chemikalien ist für alle Anlagen sehr gering (Tab. 7). Die Chemikalien werden auch nicht dem Filtrat zudosiert, sondern nur bei Membrandesinfektionen oder -wäschen eingesetzt, wenn der Filter kein Trinkwasser produziert. Die Dosiermenge ist deshalb einzig durch das Totvolumen des Filters bestimmt, welches bei den beschriebenen Anlagen zwischen 0,5 und 2,2 m³ pro Batterie liegt. Alle Anlagen werden mit Javelwasser (NaOCl) desinfiziert und mit Natronlauge (NaOH) gereinigt. Weder der Einsatz von tensidhaltigen Spezialreinigern noch von sauren Reinigungsmitteln war bisher erforderlich.

3.8 Betriebskosten

Weil Lens von der Leistung her in eine andere Kategorie fällt, wurde die Betriebskostenabschätzung nur für die kleineren Anlagen durchgeführt (Tab. 8). Die Betriebskosten beziehen sich auf die bei Nennleistung produzierte Wassermenge ohne die Kapitalkosten.

Für den Membranersatz können noch keine genauen Zahlen angegeben werden. Sie liegen bei 2,4 Rappen für einen Ersatz nach sieben Jahren. Vermutlich werden die Module in Thyon länger im Betrieb bleiben können, die Faktoren, die zum Verschleiss führen, sind aber bisher nicht untersucht worden.

Die Berechnung der Energiekosten basiert auf der bekannten Leistung der installierten Elektrogeräte und deren Betriebszeit. Sie fallen danach mit 11 bis 19 % an den gesamten Betriebskosten an. Ein Betrieb unter Druck wie in Muotathal kann die Betriebskosten um 0,6 Rappen oder 12 % senken. Der reine Frontalbetrieb bringt im Gegensatz zum derzeit praktizierten minimalen Cross-Flow-Betrieb noch Einsparungen von maximal 3 %.

Wenn für den Wartungsaufwand Personalkosten (inkl. Spesen) von 75 Franken pro Stunde eingesetzt werden, resultiert mit geschätzten 20 Arbeitstagen ein Wartungsaufwand von 12000 Franken pro Jahr, was sich auf 1,4 bis 3,8 Rappen pro Kubikmeter beläuft.

Die gesamten Betriebskosten liegen also mit 4,5 bis 7,2 Rappen (inkl. Membranersatz) pro Kubikmeter im Mittel in dem von Lipp und Baldauf [5] angegebenen Bereich und sind somit gleich wie die von klassischen Anlagen mit Flockung und Schnellsandfiltration [7]. Wenn einzelne Pumpen durch Druckreguliertventile ersetzt (Muotathal) werden können, der Chemikalienbedarf dank der Rohwassereigenschaften sehr niedrig ist (Thyon) oder meistens im Dead-End-Betrieb gefahren werden kann (alle Anlagen), liegen die Betriebskosten sogar um bis zu 38 % tiefer.

4. Ausblick

Neben der Anwendung zur Aufbereitung von Oberflächenwasser in einer grossen Anlage hat die Ultrafiltrationstechnik in der Schweiz bei kleineren Wasserversorgungen mit Quellwasser aus Karstgebieten Fuss gefasst. Genauere Angaben zu den Betriebskosten werden

erst in vier bis fünf Jahren vorliegen. Aufgrund der bisherigen, positiven Erfahrungen darf mit einer weiteren Verbreitung dieser Technik gerechnet werden.

Als Filterverfahren mit einer definierten, absoluten Barriere für Partikel ab einer sehr geringen Grösse kann die Ultrafiltration die Verfahrensschritte Klärung und Desinfektion in einer einzigen Prozessstufe vereinigen, was bisher nicht möglich war. Dies eröffnet kleinen Wasserversorgern die Perspektive einer kostengünstigen Aufbereitung bei minimalem Personalaufwand. In manchen Fällen kann auf eine Netzschutzbehandlung verzichtet werden. Dem Wasser müssen in diesem Fall keine chemischen Hilfsmittel zugegeben werden.

Literaturverzeichnis

- [1] *Anselme, C., Jacobs, E.P.* (1996): Ultrafiltration. In: Mallevalle, J., Odendaal, P.E., Wiesner, M.R.: Water treatment membrane processes, 10.1–10.88, New York: McGraw-Hill.
- [2] *Cheryan, M.* (1998): Ultrafiltration and microfiltration handbook. Lancaster: Technomic publishing Inc.
- [3] *Günther, F.W., Eder, B., Krause, S., Herb, S.* (2001): Einsatz der Ultrafiltration in der Trinkwasseraufbereitung von trübstoffhaltigen und mikrobiologisch belasteten Grund- und Quellwässern. Mitteilungen Institut für Wasserwesen 76, München: Oldenbourg Industrieverlag.
- [4] *Herb, S., Schindler, P.* (2001): Derzeitige Situation in Bayern – ein Zustandsbericht. Vortrag am Seminar «Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung in kleinen Wasserwerken Bayerns», München, 23. 4. 2001.
- [5] *Lipp, P., Baldauf, G.* (2000): Membranfiltrationstechnik. gwa 80: 37–44.
- [6] *Pianta, R., Boller, M., Janex, M.L., Chappaz, A., Birou, B., Ponce, R., Walther, J.L.* (1998): Micro- and ultrafiltration of karstic spring water. Desalination 117: 61–71.
- [7] *Pianta, R., Boller, M., Urfer, D., Chappaz, A., Gmünder, A.* (2000): Costs of conventional vs. membrane treatment for karstic spring water. Desalination 131: 245–255.
- [8] *Schudel, P., Lange, J., Leibundgut, C.* (2000): Karstquellen im Einzugsgebiet des Weigistbachs. gwa 80: 807–812.
- [9] *Wiesner, M.R., Aptel, P.* (1996): Mass transport and permeate flux and fouling in pressure-driven processes. In: Mallevalle, J., Odendaal, P.E., Wiesner, M.R.: Water treatment membrane processes, 4.1–4.30, New York: McGraw-Hill.

KEYWORDS

Ultrafiltration – Membrantechnik –
Trinkwasser – Karstquellen

A D R E S S E D E S A U T O R S

Joachim Klahre, Dr.
Membratec
Technopôle, 3960 Sierre
Tel. 027/456 86 33, Fax 027/456 86 34
E-Mail: joachim.klahre@membratec.ch

Co-Autor:
Myriam Robert, Ing.
E-Mail: myriam.robert@membratec.ch