

Anwendungsorientierte Erkenntnisse zum Einsatz des Hybridverfahrens Flockung / Ultrafiltration bei der Trinkwasseraufbereitung aus Flusswasser

Produkt 3.2.3c

Datum: 31. März 2013

TP 3.2.3 – Wasserversorgung

TP-Leiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Uhl
Professur Wasserversorgung
Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft
Technische Universität Dresden

Bearbeiter: Dr.-Ing. Irene Slavik
Professur Wasserversorgung
Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft
Technische Universität Dresden

Kontakt: Dr.-Ing. Irene Slavik
Professur Wasserversorgung
Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft
Technische Universität Dresden
01062 Dresden
Tel.: 0351-463 34687
Fax: 0351-463 42546
E-Mail: irene.slavik@tu-dresden.de

REGKLAM

Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen: 01 LR 0802

Koordination: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR)
Weberplatz 1, 01217 Dresden
Projektleiter: Prof. Dr. Dr. h. c. Bernhard Müller

www.regklam.de

Inhaltsverzeichnis

1.	Problemstellung und Zielsetzung.....	3
2.	Material und Methoden	4
2.1	ROHWASSER.....	4
2.2	AUFBAU UND BETRIEB DER ULTRAFILTRATIONSANLAGE	4
2.3	VERSUCHSPROGRAMM.....	6
2.4	VERSUCHSAUSWERTUNG.....	7
3.	Ergebnisse und Diskussion	9
3.1	EINFLUSS DER FLOCKUNGSMITTELDOSIS AUF DIE AUFBEREITUNGSLEISTUNG	9
3.2	EINFLUSS DER TRÜBUNG AUF DIE AUFBEREITUNGSLEISTUNG.....	11
3.3	EINFLUSS DES pH-WERTES AUF DIE AUFBEREITUNGSLEISTUNG	14
3.4	EINFLUSS DER RÜCKSPÜLUNG AUF DIE AUFBEREITUNGSLEISTUNG.....	15
4.	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	18

1. Problemstellung und Zielsetzung

Etwa seit Beginn der 1990er Jahre ist in europäischen Oberflächengewässern ein Anstieg an natürlichen organischen Wasserinhaltsstoffen (NOM) zu verzeichnen. Diese steigenden Gehalte organischer Substanzen werden unter anderem auf klimatische Veränderungen zurückgeführt. So wird von einer verstärkten Biomassebildung aufgrund verlängerter Vegetationsperioden und sich verringernder Anzahl an Frosttagen als Folge der globalen Erderwärmung ausgegangen. Aufgrund der ebenfalls prognostizierten Zunahmen hydrologischer Extremsituationen, wie z. B. Starkregenereignisse nach Hitze- und Trockenperioden, kann es durch Abspülungen und Ausschwemmungen zu verstärkten Einträgen dieser organischen Stoffe in Oberflächengewässer kommen.

Als Folge veränderter Rohwasserbeschaffenheit ergeben sich weitreichende Konsequenzen für die Trinkwasseraufbereitung und -verteilung. So können steigende Gehalte und Veränderungen in der Zusammensetzung natürlicher organischer Wasserinhaltsstoffe die Flockung und Filtration erheblich beeinträchtigen. Zunahmen der organischen Belastung erfordern deutliche Steigerungen bei der Flockungsmitteldosierung, um auch weiterhin eine Überführung gelöster, fein suspendierter und kolloidal vorliegender Wasserinhaltsstoffe in eine abscheidbare Form zu gewährleisten. Ansteigende Flockungsmittelzugabemengen haben wiederum zur Folge, dass sich Filterlaufzeiten und somit Spülintervalle verkürzen, resultierend in Zunahmen der benötigten Spülwasser- und anfallenden Schlammengen. Darüber hinaus kann die Aufbereitung durch eine verschlechterte Flockenbildung und eine höhere Scheranfälligkeit der Flocken als Folge steigender Konzentrationen gelöster organischer Wasserinhaltsstoffe beeinträchtigt werden. Nimmt die Aufbereitungsleistung ab, so erhöhen sich der Bedarf an Desinfektionsmitteln, die Bildungspotenziale für unerwünschte Desinfektionsnebenprodukte und die Wiederverkeimungsneigung im Wasserverteilungsnetz.

Aufgrund dieser Sachverhalte sehen sich Wasserversorger verstärkt mit einem Anstieg der Betriebs- und Entsorgungskosten sowie mit einer sowohl kurzzeitig auftretenden als auch längerfristigen Verschlechterung der Trinkwasserqualität konfrontiert. Um auf klimabedingte Schwankungen in der Rohwasserqualität zeitnah und in ausreichendem Maße reagieren zu können ist eine Anpassung der Wasseraufbereitung unumgänglich. Dafür gilt es, Anpassungsstrategien zu entwickeln, die es Wasserversorgungsunternehmen ermöglichen, die Auswirkungen der erwarteten klimatisch bedingten Veränderungen zu kompensieren und die Trinkwasserversorgung ohne Qualitätsminderung bei minimalem Kostenaufwand abzusichern.

Neben der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen für herkömmliche Aufbereitungsverfahren gilt es daher, auch Einsatzmöglichkeiten neuartiger Aufbereitungsverfahren zu erfassen und zu bewerten. Daher wurde im Rahmen des REGKLAM-Teilprojekts 3.2.3 „Wasserversorgung“ das Produkt 3.2.3c entwickelt. Dieses beinhaltet die Bereitstellung anwendungsorientierter Erkenntnisse zum Einsatz des Hybridverfahrens Flockung / Ultrafiltration bei der Trinkwasseraufbereitung aus Flusswasser. Dazu gehören die Erfassung und Bewertung der Möglichkeiten für eine Anpassung an eine veränderliche Rohwasserqualität sowie der optimalen Flockungs- und Betriebsbedingungen.

2. Material und Methoden

2.1 Rohwasser

Die Untersuchungen wurden mit Flusswasser der Elbe durchgeführt, wie es im Wasserwerk Hosterwitz als Rohwasser zur Grundwasserinfiltration genutzt wird. Die für den Untersuchungszeitraum relevanten Charakteristika des Rohwassers sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Eigenschaften des Rohwassers (Flusswasser der Elbe)

Trübung	4,5 bis 40 FNU
Leitfähigkeit	341 bis 517 $\mu\text{S}/\text{cm}$
DOC	4,1 bis 5,5 mg/L
SAK ₂₅₄	14 bis 18 m^{-1}
pH-Wert	6,8 bis 7,9

2.2 Aufbau und Betrieb der Ultrafiltrationsanlage

Für die Untersuchungen wurde eine Ultrafiltrationsanlage (UF-Anlage) im Pilotmaßstab betrieben. Die Membrananlage bestand im Wesentlichen, wie in Bild 1 schematisch dargestellt, aus einem Vorlagebehälter für die Rohwasserzufuhr, einer Dosierpumpe für das Flockungsmittel, einer Zulaufpumpe (P01), einem Permeat- und Rückspülbehälter, einer Rückspülpumpe (P03) und drei Dosierpumpen für die Reinigungschemikalien. Darüber hinaus verfügte die Anlage über eine Kontrolleinheit zur Überwachung von Druck, Durchfluss, pH-Wert und Temperatur und ein Data Logging-System zur Datenerfassung und -speicherung. Die Membrananlage wurde vollständig automatisiert im dead-end-Modus bei abwechselnder Filtrationsrichtung (bottom-up und top-down) betrieben.

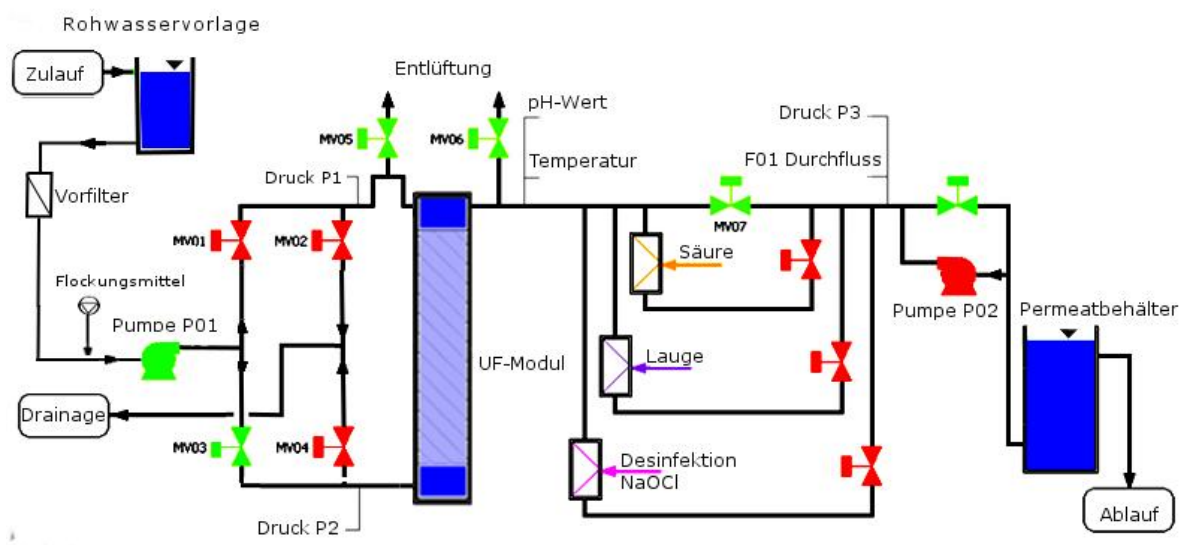


Bild 1: Fließschema der Ultrafiltrationsanlage.

Als Rohwasser wurde Flusswasser der Elbe verwendet, das mittels frequenz geregelter Pumpe aus einem Vorlagebehälter in das UF-Modul gepumpt wurde. Zur Vermeidung von Verblockungen der Kapillaren im UF-Modul kam ein Vorfilter (Filtersieb, Maschenweite 200 µm) im Zulauf der Pumpe P01 für den Rückhalt von Grobpartikeln zum Einsatz. Die Kenngrößen des Membranmoduls sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Durch den inside-out Betrieb wurden die zurückgehaltenen Wasserinhaltsstoffe an der Innenseite der Kapillaren abgelagert. Das Filtrat wurde in einem Permeatbehälter zwischengespeichert und für die Rückspülung der Membranen verwendet. Die Rückspülung der Membranen erfolgte durch Umkehrung der Fließrichtung, also von außen nach innen, mittels der Rückspülpumpe P02. Das angefallene Spülwasser wurde über die Drainage und durch das Öffnen der Ventile MV02 bzw. MV04 abgeleitet. Die Dosierung der Reinigungschemikalien erfolgte über entsprechende Dosiereinrichtungen.

Tabelle 2: Kenngrößen des UF-Moduls der Pilotanlage.

Membranmodul	Typ	Multibore®-Hohlfasermodul
	Lage	senkrecht eingebaut
Membran	Typ	integral-asymmetrisch
	Lage	aktive Schicht innen liegend
	Material	Polyethersulfon (PES)
	Fläche	0,2 m ²
	Porenweite	ca. 20 nm
	Trenngrenze	100 000 Dalton
Faser	Typ	Multibore®-Hohlfaser
	Innendurchmesser	0,9 mm Innendurchmesser
Betriebsweise		dead-end
Rohwasserbeaufschlagung		inside-out Filtration, bottom-up- und top-down-Modus

Als Flockungsmittel kam Aluminiumsulfat ($Al_2(SO_4)_3$) zum Einsatz, das mittels Mikrozahnradpumpe im Zulauf der Pumpe P01 zudosiert wurde. Im Falle einer pH-Wert-Einstellung wurde diese mit Salzsäure (HCl) durchgeführt.

Während der Versuche erfolgte eine kontinuierliche Messung von Druck, Durchfluss, pH-Wert und Temperatur. Darüber hinaus wurden Proben aus Zu- und Ablauf für die Bestimmung von Trübung und gelösten organischen Wasserinhaltsstoffen (DOC, SAK₂₅₄) genommen. Die für den Betrieb der Versuchsanlage eingestellten Bedingungen sowie Daten zur Spülung der Membran sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Im Mittel ergaben sich zu Beginn eines Filtrationszyklus bei einer transmembranen Druckdifferenz von 0,27 bar Permeabilitäten von ca. 425 L/(m²·h·bar), normiert auf 20°C. Die Filtrationszeit betrug jeweils 8 min, gefolgt von einem Spüldurchgang. Bei der Spülung wurden zuerst die grobe Verunreinigung durch einen Forwardflush aus der Deckschicht gelöst und anschließend durch das Öffnen der Ventile MV02 bzw. MV04 über die Drainage entfernt. Die Strömungsrichtung des Forwardflushs war gleich der Filtrationsrichtung, wobei der Feedstrom für 60 s aufrechterhalten und eine Filtration durch das Schließen des MV07 verhindert wurde. Anschließend erfolgt eine 60 s andauernde hydraulische Rückspülung entgegen der Filtrationsrichtung. Der Volumenstrom betrug dabei 40 L/h, was einen Flux

von 200 L/(m²·h·bar) entsprach. Diese Spülung zielte auf eine Auflockerung und den Austrag der auf der Membran entstandenen und hydraulisch reversiblen Deckschicht ab. Ein Filtrationszyklus bestand aus einem 8 minütigen Filtrationslauf im bottom-up-Modus mit anschließender Vorwärtsspülung (1 min) und Rückspülung (1 min) und einem Filtrationslauf im top-down-Modus, ebenfalls gefolgt von einer Vorwärts- und Rückspülung. Damit betrug die Dauer für einen Filtrationszyklus 20 Minuten.

Tabelle 3: Betriebsparameter der UF-Anlage.

Rohwasserbeschickung	Flächenbelastung	80 L/m ² h
	Volumenstrom	16 L/h
Dauer Filtration		8 min
Betriebsdruck	Filtration	0,2 bis 1,8 bar
	Rückspülung	max. 2,5 bar
Spülung Forward Flush	Spüldauer	60s
	Spülwasserfluss	16 L/h
Rückspülung ohne Chemikalien	Spüldauer	60 s
	Spülfluss	40 L/h
Chemische Reinigung	Eingesetzte Chemikalien	H ₂ SO ₄ , NaOH, NaOCl
	Einspülmenge	3 L H ₂ SO ₄ & NaOH, 1,5 L NaOCl
	Einwirkzeit	30 min (normal)

Nach Erreichen der Grenzpermeabilität (Plateauphase der Permeabilitätsänderung, ca. 65 L/(h m² bar)) bzw. nach 24 Filtrationszyklen sowie vor jedem neuen Versuchslauf fand eine chemische Reinigung der Membran mit Natronlauge (NaOH), Schwefelsäure (H₂SO₄) und Natriumhypochlorit (NaOCl) statt. Diese Chemikalien wurden nacheinander für jeweils 60 s in die Membran eingespült und nach einer Einwirkzeit von jeweils 30 min während einer 2-minütigen Rückspülung wieder ausgespült.

2.3 Versuchsprogramm

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über die einzelnen Versuchsreihen mit den dazugehörigen Versuchsbedingungen. In den Versuchen V1 bis V5 wurde der Einfluss der Flockungsmittelzugabe bzw. der Flockungsmitteldosis auf den Permeatfluss der Membrananlage bei einer niedrigen Trübung des Rohwassers untersucht. Die Versuche V6 und V7 zielten auf einen Vergleich der Aufbereitungsleistung bei unterschiedlichen Trübungswerten ab. Sie wurden daher analog zu den Versuchen V3 und V5, jedoch bei einer deutlich höheren Trübung, durchgeführt. Der Einfluss des pH-Wertes auf die Aufbereitungsleistung wurde durch die Versuche V6 bis V9 untersucht. Diese wurden bei hohen Trübungen mit Flockungsmitteldosen von 4 und 8 mg Al/L durchgeführt, wobei der pH-Wert bei 7,7 und bei 5,5 lag. In Versuch V10 wurde die Filtrationszeit um die Hälfte verkürzt. Durch Vergleich von Versuch V1 mit Versuch V10 konnte folglich der Einfluss der Rückspülhäufigkeit auf die Aufbereitungsleistung erfasst werden. Die Auswirkungen einer Verkürzung der Einwirkzeit der Reinigungschemikalien konnte anhand der Versuche V11 und V12 im Vergleich zu Versuch V10 untersucht werden.

Tabelle 4: Versuchsreihen mit dazugehörigen Versuchsbedingungen.

	Filtrationszeit	Einwirkzeit Chemikalien	FM-dosis	pH-Wert Flockung	Trübung	DOC	SAK
	min	min	mg/L		FNU	mg/L	1/m
Versuch V1	8	30	0	7,8	8 – 10		
Versuch V2	8	30	3	7,9	5	4,5	14,2
Versuch V3	8	30	4	7,0	10		
Versuch V4	8	30	5	7,9	5	4,6	14,0
Versuch V5	8	30	8	7,0	10	5,4	17,1
Versuch V6	8	30	4	7,7	33 – 37	5,1	18,0
Versuch V7	8	30	8	7,7	33 – 38	4,9	16,8
Versuch V8	8	30	4	5,5	37 – 41	5,1	16,8
Versuch V9	8	30	8	5,5	34 – 41	5,2	17,8
Versuch V10	4	30	0	7,8	8	5,5	
Versuch V11	4	20	0	7,8	19	4,6	
Versuch V12	4	13	0	7,7	13 – 19	4,1	

2.4 Versuchsauswertung

Für die Zustandsbeschreibung der Membran wurden die Kenngrößen Transmembrandruck (TMP), Flux (J) und Permeabilität (P) verwendet. Der Transmembrandruck ist der über die Membran wirkende Differenzdruck, welcher sich aus der Differenz der mittleren Drücke auf der Zulauf- und Filtratseite nach Gleichung (1) berechnet:

$$TMP = \frac{1}{2}(p_1 + p_2) - (p_3 + d_h \cdot 0,098) \quad (1)$$

Dabei ergibt sich der mittlere Druck auf der Feedseite aus dem Mittelwert der Drücke p_1 und p_2 der Manometer P1 und P2 (Bild 1). Der mittlere Druck auf der Permeatseite ergibt sich aus dem Druck p_3 von Manometer P3 (Bild 1) unter Berücksichtigung des hydrostatischen Drucks der Wassersäule (Differenzhöhe d_h in m des permeatseitigen Druckaufnehmers bis zur Modulmitte).

Die Flächenbelastung bzw. der Flux (J) ist der auf die Fläche der Membran bezogene Volumenstrom. Der Flux ergibt sich aus dem Permeatvolumen Q_{Permeat} pro Zeit und der Membranfläche A_{Membran} nach Gleichung (2):

$$J = \frac{Q_{\text{Permeat}}}{A_{\text{Membran}}} \quad (2)$$

Zur langfristigen Beschreibung des Zustandes der Membran wird die Permeabilität, die hydraulische Durchlässigkeit, verwendet. Sie ergibt sich aus dem Flux bezogen auf einen TMP von 1 bar nach Gleichung (3):

$$P = \frac{Q_{\text{Permeat}}}{A_{\text{Membran}} \cdot TMP} \quad (3)$$

Da die Versuche bei unterschiedlichen Rohwassertemperaturen durchgeführt wurden, welche sich aufgrund der unterschiedlichen Viskosität auf die Permeabilität auswirkt, fand für die Auswertung der Versuchsergebnisse eine Normierung der Permeabilität auf eine

Temperatur von 20 °C statt. Diese Normierung fand unter Verwendung des Temperaturkorrekturfaktors T_K wie folgt statt:

$$P_{20\text{ °C}} = \frac{P}{T_{K,20\text{ °C}}} \quad \text{mit} \quad T_{K,20\text{ °C}}(\vartheta) = \frac{\eta_{20\text{ °C}}}{\eta(\vartheta)} \quad (4)$$

Hierbei sind ϑ die gemessene Temperatur in °C und η die dynamische Viskosität des Wassers in Pa s, welche sich aus Gleichung (5) berechnet:

$$\eta = (17,91 - 0,60 \cdot \vartheta + 0,013 \cdot \vartheta^2 - 0,00013 \cdot \vartheta^3) \cdot 10^{-4} \quad (5)$$

Für die Auswertung der Versuchsreihen (jeweils 24 Filtrationszyklen) wurde die Änderung der Permeabilität ΔP über die Filtrationszeit Δt betrachtet. Die Bezugspunkte für die Permeabilität waren die Anfangspermeabilität und die Grenzpermeabilität, der Punkt ab dem kaum noch eine Änderung der Permeabilität zu erkennen war. Die Anfangspermeabilität der Membran lag im Mittel bei 425 L/(h m² bar), die Grenzpermeabilität betrug im Mittel 65 L/(h m² bar). Für die Berechnungen der Produktivität und der Ausbeute wurde das Erreichen der Grenzpermeabilität als Bezugspunkt angesetzt. Die Produktivität wurde unter Berücksichtigung der mit Permeat durchgeführten Spülvorgänge nach Gleichung (6) berechnet:

$$\text{Produktivität } t = \frac{Q_{\text{Permeat}} \cdot t_{\text{Filtration}} - V_{\text{Spülwasser}}}{t_{\text{Filtration}} + t_{\text{Ausfallzeit}}} \quad (6)$$

Die durch den Verbrauch an Spülwasser zu erzielende Ausbeute Φ [%] ergibt sich aus dem Nettovolumenstrom des Permeats [m³/h] und dem geförderten Rohwasservolumenstrom [m³/h] nach Gleichung (7):

$$\Phi = \frac{Q_{\text{Permeat}}}{Q_{\text{Rohwasser}}} \cdot 100 \% \quad (7)$$

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Einfluss der Flockungsmitteldosis auf die Aufbereitungsleistung

Um den Einfluss einer Flockungsmitteldosierung auf die Aufbereitungsleistung des Hybridverfahrens Flockung / Ultrafiltration erfassen und bewerten zu können, wurden zunächst die Änderungen der Permeabilität und des Transmembrandrucks (TMP) bei konstant gehaltenem Flux für die Versuche V1 und V5 ausgewertet. Die Versuche wurden dabei entweder über 24 Filtrationszyklen durchgeführt oder endeten beim Erreichen der Grenzpermeabilität.

Bei Betrachtung des TMP hat sich gezeigt, dass die Zugabe von Flockungsmittel (FM), mit Ausnahme von Versuch V4, zu keinem verstärkten Anstieg des TMP führt. Bei Zugabe von 3 und 4 mg Al/L kam es sogar zu einem geringeren Anstieg des TMP im Vergleich zur Referenz, der direkten Filtration von Elbewasser ohne FM-Zugabe. Selbst bei der höchsten FM-Dosis von 8 mg Al/L entsprach die Änderung des TMP der der Referenz. Es kam folglich zu keinem verstärkten Zusetzen der Kapillaren durch die gebildeten Flocken, sondern teilweise zu einer Verringerung des Filtrationswiderstands aufgrund der lockerenen Flockenstruktur, während nicht geflockte Partikel die Kapillaren stärker zusetzten.

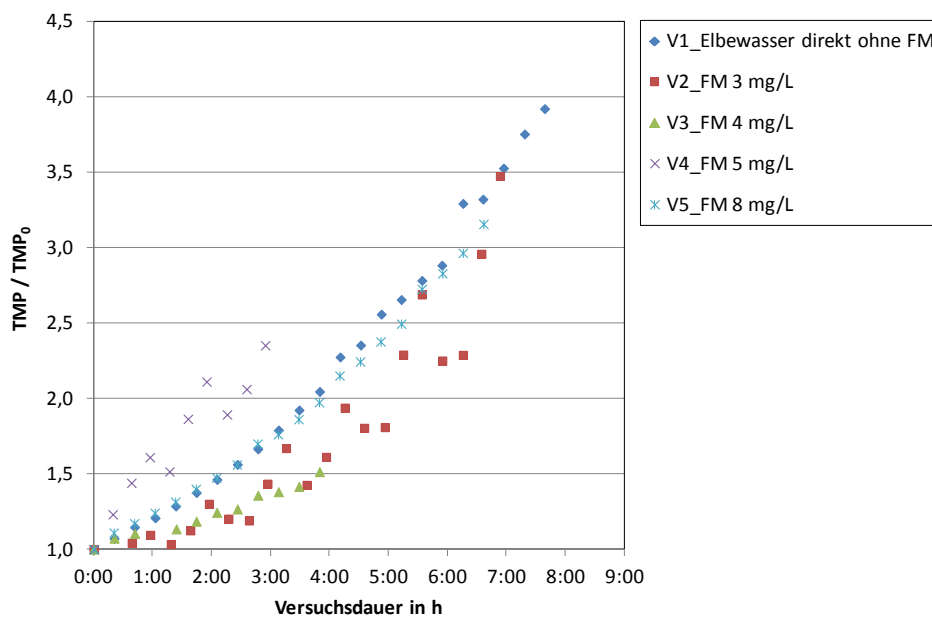


Bild 2: Einfluss der FM-Dosis auf die Änderung des TMP (V1 bis V5).

Bild 3 zeigt die Veränderung der Permeabilität für die Versuche V1 bis V5. Mit Versuch V1 (ohne FM-Zugabe) als Referenz konnte gezeigt werden, dass bei einer Zudosierung von FM, mit Ausnahme von Versuch V4, die Permeabilität deutlich langsamer abnimmt. Das bedeutet, dass unter Zugabe von FM die Filtrationszeit deutlich verlängert werden kann. Bei einer FM-Dosis von 4 mg Al/L kam es zur geringsten Abnahme der Permeabilität. Die im Vergleich zur Referenz stärkere Abnahme der Permeabilität in Versuch V4 kann aufgrund nicht möglicher Wiederholungsversuche nicht abschließend erklärt werden.

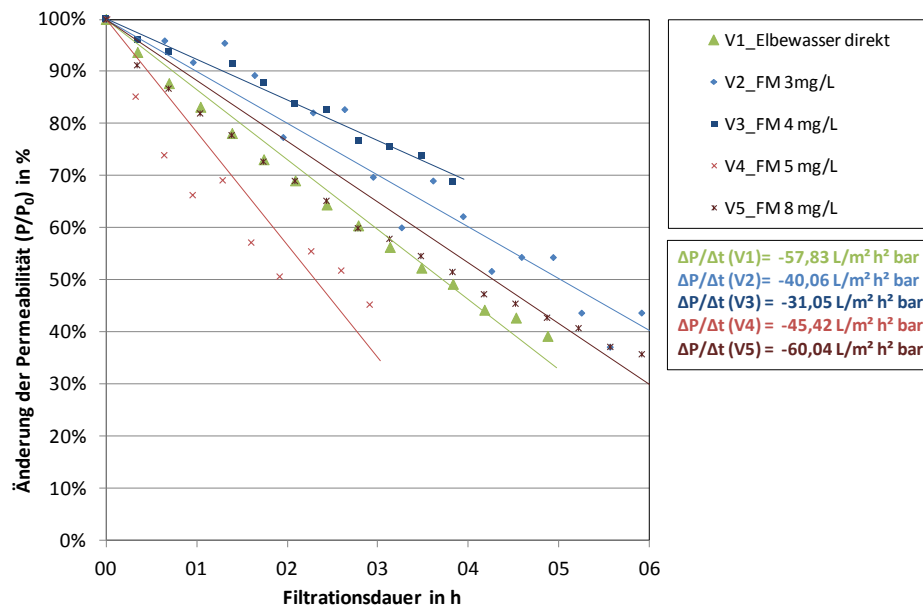


Bild 3: Einfluss der FM-Dosis auf die Änderung der Permeabilität (V1 bis V5).

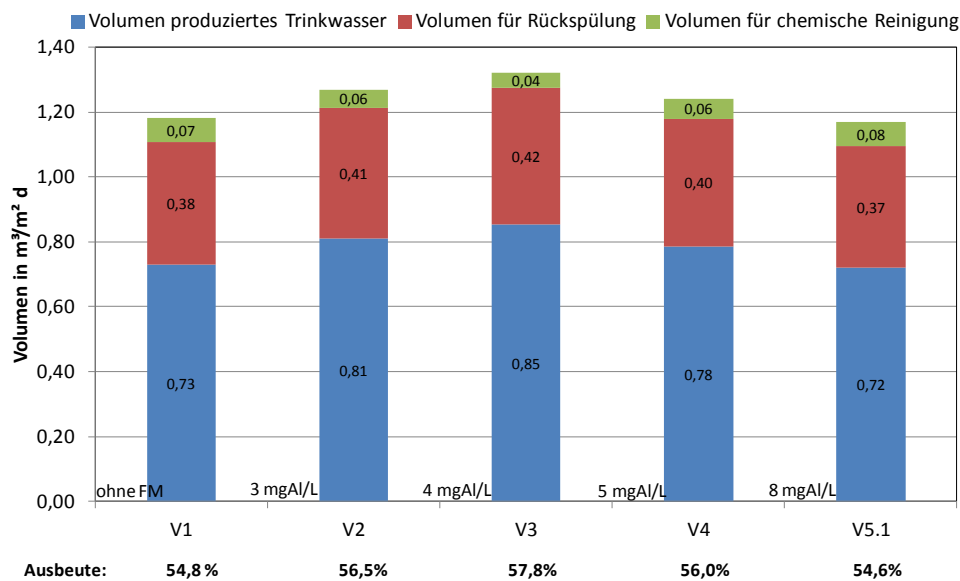


Bild 4: Einfluss der FM-Dosis auf Flux (Volumen produzierten Trinkwassers pro m² Membranfläche und Tag) und für Rückspülung und chemische Reinigung benötigte Volumina (V1 bis V5).

Die aus der Permeabilität resultierenden Produktivitäten sowie die für die Spülungen und die chemische Reinigung benötigten Volumina sind für die Versuche V1 bis V5 in Bild 4 dargestellt. Aus dieser Darstellung geht ebenfalls hervor, dass durch Zugabe von FM die Aufbereitungsleistung gesteigert werden kann. So kam es in den Versuchen mit FM-Dosierung von 3 bis zu 5 mg Al/L zu einer Zunahme der Produktivität gegenüber dem Versuch ohne FM-Zugabe. Die größte Steigerung der Produktivität (um 16,4 % von

0,73 m³/(m²·d) auf 0,85 m³/(m²·d)) ergab sich bei einer FM-Dosis von 4 mg Al/L. Bei der höchsten FM-Dosis (8 mg Al/L) entsprach die Produktivität in etwa der der Referenz. Diese Sachverhalte spiegeln auch die Werte für die Ausbeute wieder. Durch die FM-Zugabe konnte die Ausbeute zunächst erhöht werden, mit einem Maximum bei einer FM-Dosis von 4 mg Al/L. Bei weiterer Erhöhung der FM-Dosis kam es auch hier zu einer leichten Abnahme der Ausbeute.

Die Verbesserung der Aufbereitungsleistung durch FM-Dosierung beruht vermutlich darauf, dass es durch die Flockenbildung zu einer aufgelockerten Deckschichtstruktur kommt, wodurch sich der Filtrationswiderstand verringert. Bei hoher FM-Dosis kann die größere Menge an gebildeten Flocken dagegen zu einer Behinderung der Filtration führen, in annähernd gleichem Ausmaß wie sie auch durch die Ablagerung ungeflockter Partikel auftritt.

3.2 Einfluss der Trübung auf die Aufbereitungsleistung

Um den Einfluss einer sich ändernden Rohwasserqualität durch ansteigende Trübung erfassen zu können, wurden Versuchsreihen mit hoher und niedriger Trübung bei FM-Dosen von 4 und 8 mg Al/L durchgeführt. Dabei zeigte sich, wie in Bild 5 und Bild 6 dargestellt, dass eine höhere Trübung nicht zu einer Verschlechterung der Aufbereitungsleistung führen muss, wenn ihr mit einer Erhöhung der FM-Dosis begegnet wird. So konnte bei einer Trübung von 35 FNU mit einer FM-Dosis von 8 mg Al/L eine ähnlich gute Aufrechterhaltung der Permeabilität sowie ein ebenso geringer Anstieg des TMP erzielt werden wie im Versuch V3, der bei niedriger Trübung (10 FNU) mit einer FM-Dosis von 4 mg Al/L durchgeführt wurde. Eine zu geringe Dosierung an FM bei hoher Trübung (Versuch V6) resultierte hingegen in einer deutlich stärkeren Abnahme der Permeabilität sowie einem höheren Anstieg des TMP. Diese Abnahme der Aufbereitungsleistung wurde vermutlich durch das Zusetzen der Kapillaren mit nicht geflockten Partikeln hervorgerufen.

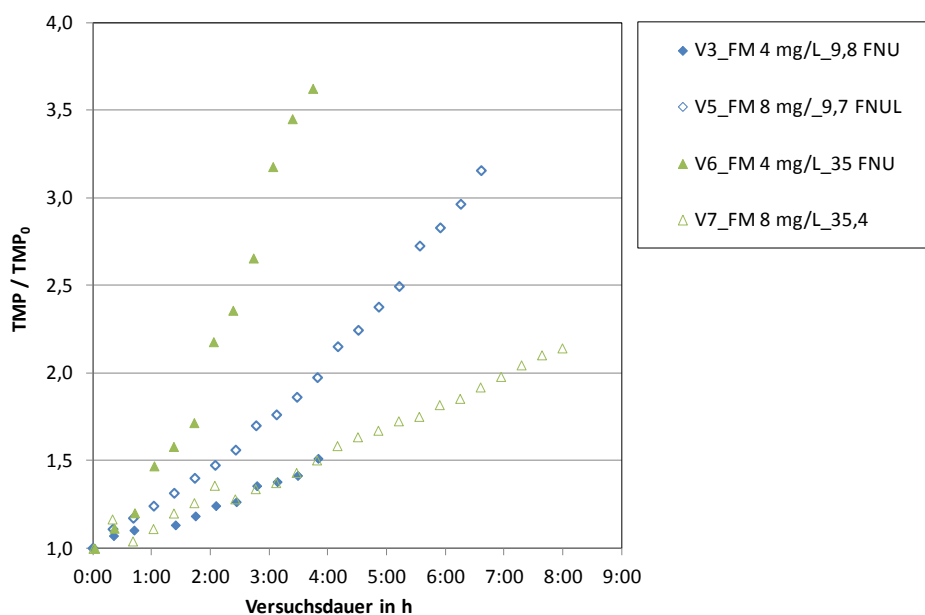


Bild 5: Einfluss von Trübung und FM-Dosis auf die Änderung des TMP (V3, V5 bis V7).

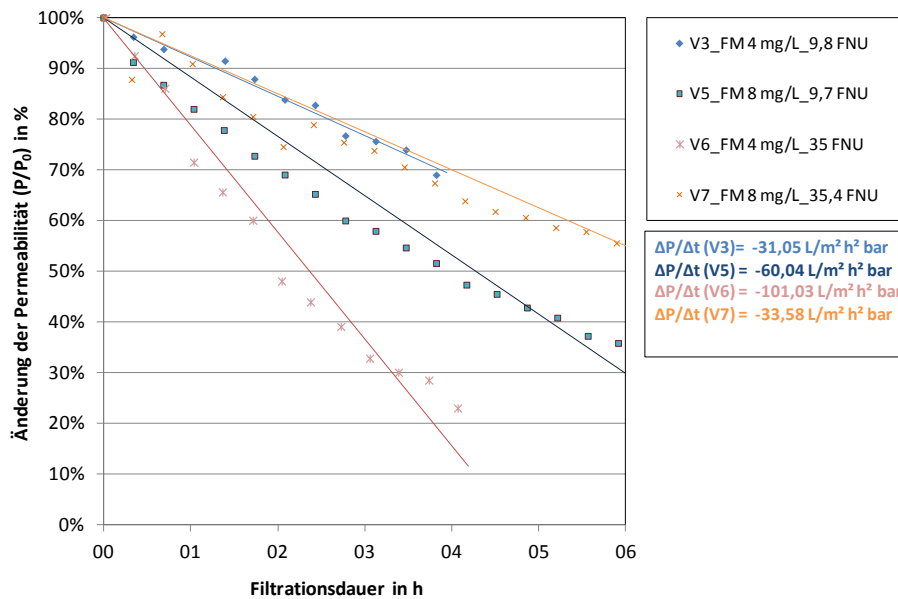


Bild 6: Einfluss von Trübung und FM-Dosis auf die Änderung der Permeabilität (V3, V5 bis V7).

Dass einem Anstieg der Trübung mit einer Erhöhung der FM-Dosis begegnet werden sollte, zeigen auch die Vergleiche der Produktivität und der Spülwassermengen sowie der Ausbeute (Bild 7). Die höchste Produktivität und Ausbeute wurden bei niedriger Trübung mit einer FM-Dosis von 4 mg Al/L und bei hoher Trübung mit einer FM-Dosis von 8 mg Al/L erzielt, wobei sich beide Fälle kaum voneinander unterschieden. Das bedeutet, dass Verschlechterungen der Rohwasserqualität hinsichtlich Trübung durch eine Erhöhung der FM-Zugabemengen kompensiert werden können, da sich diese nicht ungünstig auf die Aufbereitungsleistung auswirken.

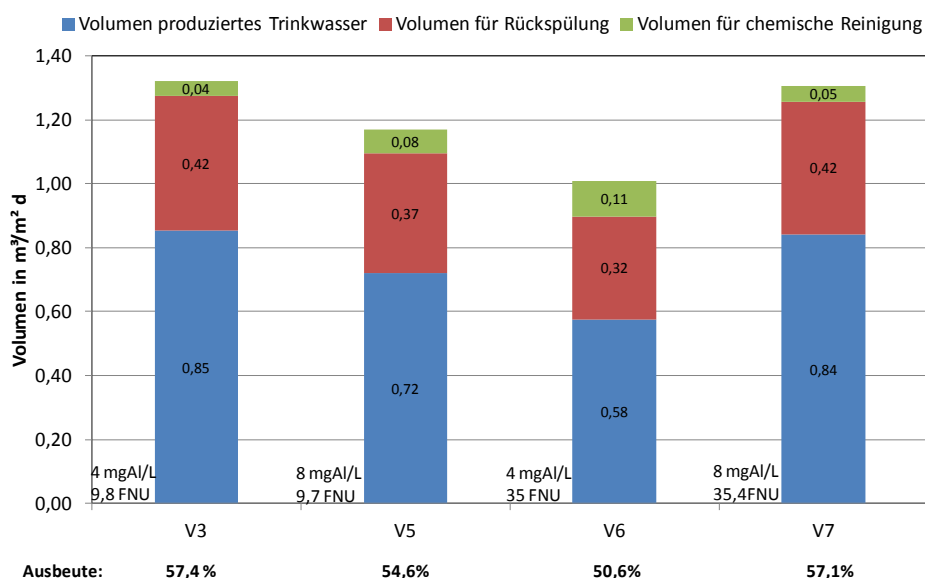


Bild 7: Einfluss von Trübung und FM-Dosis auf Flux (Volumen produzierten Trinkwassers pro m² Membranfläche und Tag) und für Rückspülung und chemische Reinigung benötigte Volumina (V3, V5 bis V7).

Die Untersuchungen haben außerdem gezeigt, dass mittels Flockung hauptsächlich die eine Trübung verursachenden partikulären Wasserinhaltsstoffe entfernt wurden. Gelöste organische Wasserinhaltsstoffe wurden durch die Flockung nur sehr geringfügig mit entfernt, was aus den in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** aufgelisteten DOC-Messwerten hervorgeht.

Tabelle 5: Messwerte von DOC und Trübung in Feed und Filtrat verschiedener Versuchsreihen.

	DOC		Trübung	
	Feed	Filtrat	Feed	Filtrat
	mg/L	mg/L	FNU	FNU
Versuch V2	4,5	4,2	4,7 bis 4,8	< 0,1
Versuch V3			9,8	< 0,1
Versuch V4	4,6	4,2	4,5 bis 4,7	< 0,1
Versuch V5	5,4	5,0	9,8	< 0,1
Versuch V6	5,1	4,9	33,3 bis 36,5	< 0,1
Versuch V7	4,9	4,8	33,3 bis 37,5	< 0,1
Versuch V8	5,1	4,8	36,5 bis 40,8	< 0,1
Versuch V9	5,2	5,1	34,2 bis 40,8	< 0,1

Das Hybridverfahren Flockung / Ultrafiltration ist daher nicht geeignet, neben den partikulären auch gelöste organische Wasserinhaltsstoffe in ausreichendem Maß zu entfernen. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass sich die optimalen Bedingungen für die Entfernung von Partikeln und gelösten organischen Stoffen mittels Flockung unterscheiden. So liegt das pH-Wert-Optimum für die Entfernung von partikulären Wasserinhaltsstoffen im neutralen bis leicht basischen Bereich (pH 7 bis 8), wohingegen für die Entfernung von gelösten Verbindungen leicht saure pH-Werte (pH 5 bis 6) optimal sind. Darüber hinaus entspricht die Prozessführung der Flockung des Hybridverfahrens nicht den für eine Adsorption (Wirkmechanismus für Entfernung von gelösten Stoffen mittels Flockung) organischer Wasserinhaltsstoffe an den Metallhydroxidflocken erforderlichen Bedingungen. Durch die sehr kurzen Reaktions- und Kontaktzeiten kommt es weder zu einer ausreichenden Flockenbildung noch zur Einstellung des Adsorptionsgleichgewichts, wodurch die Entfernung gelöster Wasserinhaltsstoffe nicht begünstigt wird. Um auch gelöste organische Stoffe mit entfernen zu können, bedarf es daher nicht nur einer Anpassung des pH-Wertes, sondern auch einer veränderten Prozessführung, die ausreichende Reaktions- und Kontaktzeiten für die Ausbildung von Makroflocken und für die Einstellung des Adsorptionsgleichgewichts ermöglicht. Diese Anpassungen würden sich jedoch wieder ungünstig auf die Aufbereitungs- und Entfernungsleistung hinsichtlich partikulärer Belastungsstoffe auswirken, weswegen davon abgesehen werden sollte.

Dass es mittels Ultrafiltration zu einer vollständigen Entfernung der partikulären Inhaltsstoffe kam, kann ebenfalls Die Untersuchungen haben außerdem gezeigt, dass mittels Flockung hauptsächlich die eine Trübung verursachenden partikulären Wasserinhaltsstoffe entfernt wurden. Gelöste organische Wasserinhaltsstoffe wurden durch die Flockung

nur sehr geringfügig mit entfernt, was aus den in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** aufgelisteten DOC-Messwerten hervorgeht.

Tabelle 5 entnommen werden, in der für ausgewählte Versuche auch die Trübungswerte im Rohwasser (Zulauf bzw. Feed der UF) und im Filtrat aufgelistet sind.

3.3 Einfluss des pH-Wertes auf die Aufbereitungsleistung

Dass Randbedingungen wie der pH-Wert einen großen Einfluss auf die Aufbereitungsleistung von Verfahrenskombinationen aus Flockung und Filtration haben, konnte durch vergleichende Untersuchungen bei unterschiedlichen pH-Werten und hoher Trübung gezeigt werden. Wie in Bild 8 veranschaulicht, ist bei hoher partikulärer Belastung nicht nur eine ausreichend hohe Flockungsmitteldosis für eine hohe Permeabilität erforderlich, sondern auch ein leicht basischer pH-Wert von pH 7,7. Dieser pH-Wert liegt in dem für die Entfernung partikulärer Wasserinhaltsstoffe optimalen Bereich von pH 7 bis 8.

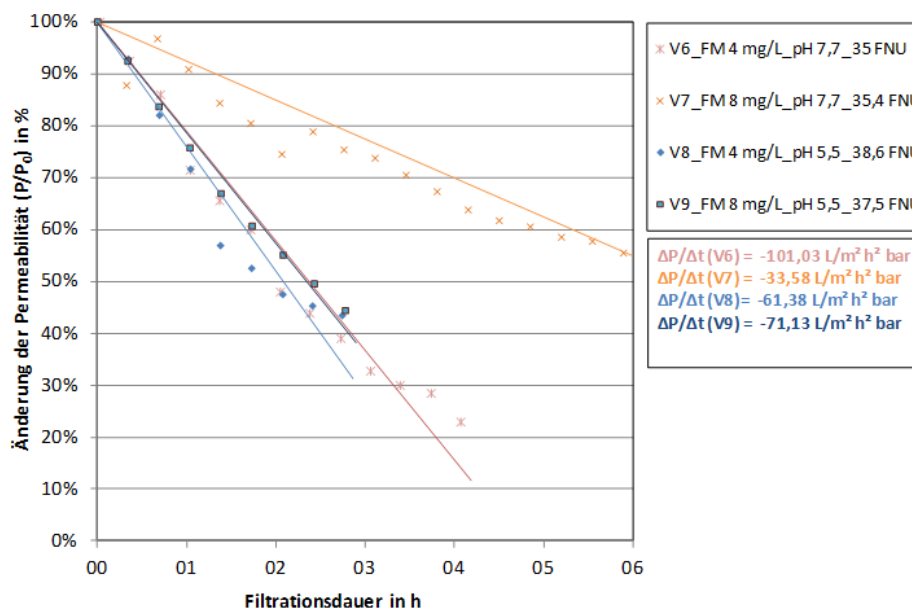


Bild 8: Einfluss des pH-Wertes auf die Änderung der Permeabilität bei hoher Trübung (V6 bis V9).

Dies geht auch aus der Gegenüberstellung der Volumina für das produzierte Trinkwasser und den für Rückspülung und chemische Reinigung benötigten Volumina hervor, die in Bild 9 dargestellt sind. Die höchste Ausbeute und das höchste Volumen an produziertem Trinkwasser wurden bei einer hohen Trübung bei einem pH-Wert von 7,7 und einer FM-Dosis von 8 mg Al/L erreicht.

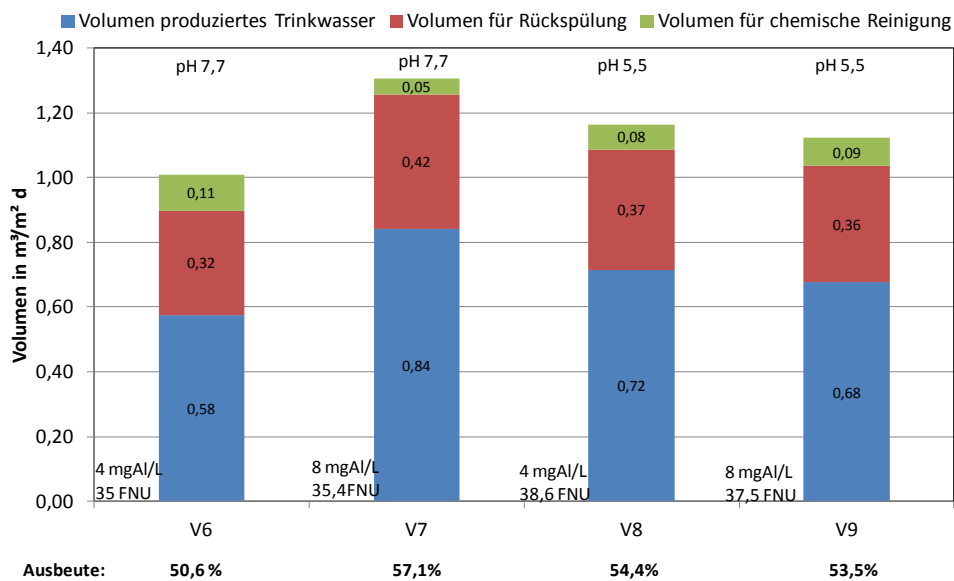


Bild 9: Einfluss des pH-Wertes auf Flux (Volumen produziertes Trinkwassers pro m² Membranfläche und Tag) und für Rückspülung und chemische Reinigung benötigte Volumina bei hoher Trübung (V6 bis V9).

3.4 Einfluss der Rückspülung auf die Aufbereitungsleistung

Durch die Versuche V1 bis V9 konnte gezeigt werden, dass sich Veränderungen in der Rohwasserqualität und/oder veränderte Flockungsbedingungen auf die zu erzielende Filtrationsdauer und folglich auf die Produktivität und Ausbeute des untersuchten Hybridverfahrens auswirken. Für einen wirtschaftlichen Betrieb dieses Aufbereitungsverfahrens ist aber nicht nur eine Anpassung der Filtrationsdauer, sondern auch der Rückspülhäufigkeit und der Rückspülintensität erforderlich. Um den Einfluss der Rückspülhäufigkeit und der Rückspülintensität auf die Aufbereitungsleistung erfassen und bewerten zu können, wurde in der Versuchsreihe V10 eine Verkürzung der Filtrationszeit und damit eine Erhöhung der Rückspülintervalle vorgenommen, während in den Versuchen V11 und V12 zusätzlich die Einwirkzeit der bei der chemischen Reinigung eingesetzten Chemikalien verkürzt wurde. Diese Untersuchungen wurden ohne Zugabe von Flockungsmitteln bei niedrigen Trübungen durchgeführt.

Bild 10 zeigt die Abnahme der Permeabilität in den Versuchsreihen V1 und V10, die sich nur in der Dauer der Filtrationszyklen unterschieden haben. Durch ein häufigeres Rückspülen (Versuch V10) konnte die Abnahme der Permeabilität deutlich verringert werden und betrug knapp 20 L/(m² h bar)/h, während bei doppelter Filtrationszeit die Abnahme fast 60 L/(m² h bar)/h betrug. Allerdings resultierte die bessere Permeabilität bei kürzerer Filtrationszeit nicht in einer höheren Produktivität oder Ausbeute, da deutlich größere Volumina an Permeat für das häufigere Rückspülen wieder verbraucht wurden und damit nicht der Trinkwasserproduktion zur Verfügung standen (Bild 11).

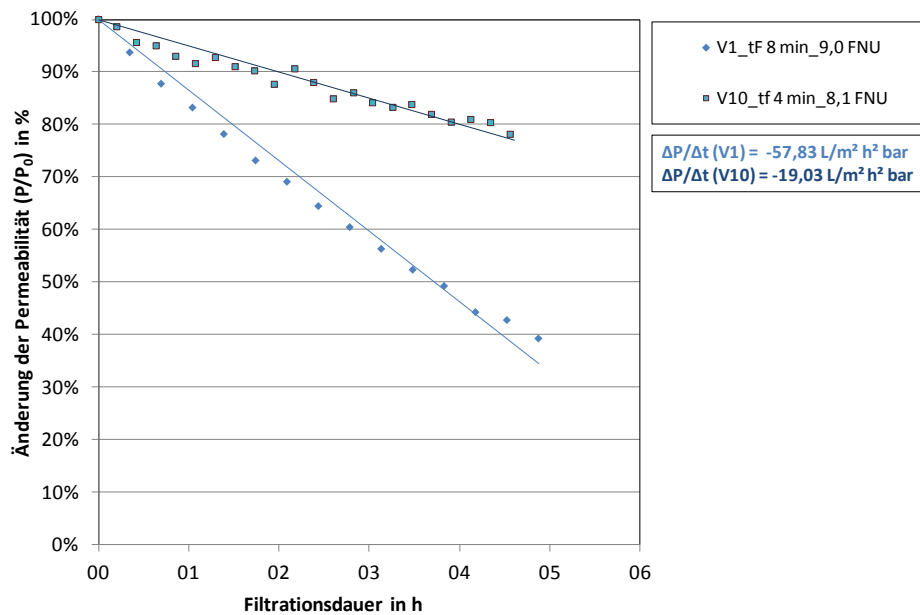


Bild 10: Einfluss der Filtrationsdauer auf die Änderung der Permeabilität bei niedriger Trübung (V1 und V10).

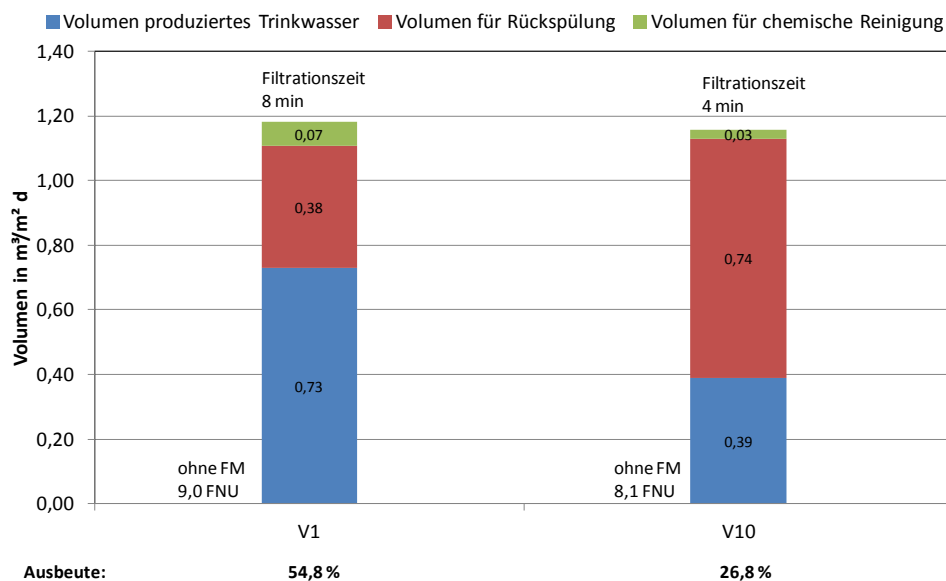


Bild 11: Einfluss der Filtrationsdauer auf Flux (Volumen produzierten Trinkwassers pro m² Membranfläche und Tag) und für Rückspülung und chemische Reinigung benötigte Volumina bei niedriger Trübung (V1 und V10).

Die Abnahme der Permeabilität bei Versuchen mit unterschiedlicher Einwirkzeit der bei der chemischen Reinigung eingesetzten Chemikalien ist in Bild 12 veranschaulicht. Eine Verkürzung der Einwirkzeit führte demnach zu einer stärkeren Abnahme der Permeabilität. Daraus folgt, dass die Einwirkzeit von 30 Minuten durchaus gerechtfertigt ist, um eine ausreichende Entfernung der Ablagerungen und folglich einen wirtschaftlichen Be-

trieb dieser Aufbereitungsstufe zu gewährleisten. Dass sich die intensivere chemische Reinigung nicht nur günstig auf die Permeabilität auswirkt, sondern auch zu einer höheren Produktivität und Ausbeute führt, ist in Bild 13 dargestellt. Bei langer Einwirkzeit (30 Minuten) der Chemikalien ist eine um 11 % höhere Produktivität und eine um 2 % höhere Ausbeute möglich.

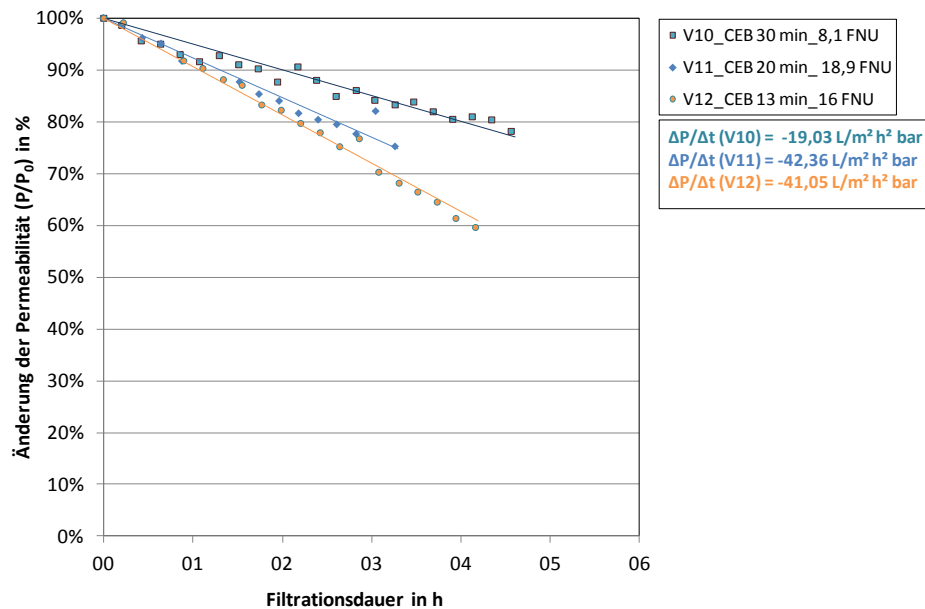


Bild 12: Einfluss der Einwirkzeit bei chemischer Reinigung auf die Änderung der Permeabilität (V10 bis V12).

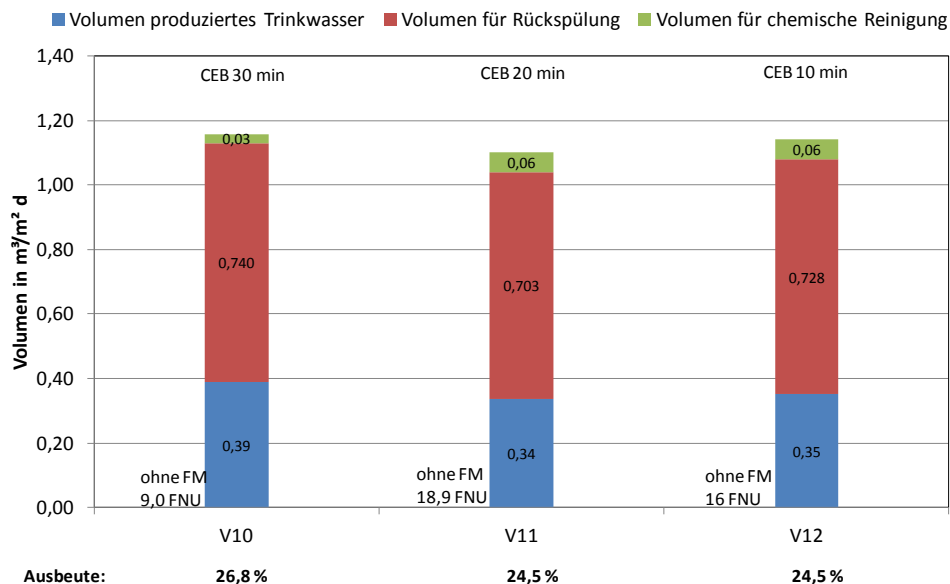


Bild 13: Einfluss der Einwirkzeit bei chemischer Reinigung auf Flux (Volumen produziertes Trinkwassers pro m² Membranfläche und Tag) und für Rückspülung und chemische Reinigung benötigte Volumina (V10 bis V12).

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In den Untersuchungen zur Aufbereitung von Uferfiltrat mittels des Hybridverfahrens Flockung / Ultrafiltration konnte gezeigt werden, dass die vorgeschaltete Flockung zu einer Verbesserung der Aufbereitungsleistung der Membranfiltration beiträgt. Für einen optimalen Betrieb ist die Flockungsmitteldosis der partikulären Belastung des Rohwassers anzupassen und die Flockung in dem für die Entfernung von Partikeln optimalen pH-Wert-Bereich von pH 7 bis 8 zu betreiben. Mittels Ultrafiltration ist eine vollständige Entfernung partikulärer Wasserinhaltsstoffe möglich.

Die Ergebnisse verdeutlichen weiterhin, dass für einen optimalen Betrieb nicht nur die Flockungsbedingungen, sondern die gesamte Betriebsführung an Veränderungen in der Rohwasserqualität anzupassen sind. So sollten Rückspülungen erst bei Erreichen der Grenzpermeabilität erfolgen und die Einwirkzeit der für die chemische Reinigung verwendeten Chemikalien ausreichend lang sein.

Da eine Anpassung der Trinkwasseraufbereitung an Veränderungen der Rohwasserqualität durch Steuerung der Betriebsweise über Messung der Grenzpermeabilität und des Transmembrandrucks sowie der Trübung und entsprechender Regelung (Flockungsmitteldosis, Filtrationszeit) möglich ist, verfügt das Hybridverfahren Flockung / Ultrafiltration bei der Entfernung partikulärer Wasserinhaltsstoffe einen großen Vorteil gegenüber herkömmlichen Aufbereitungsverfahren. Weiterhin ist mit keinem Anstieg der Energiekosten bei sich verschlechternder Rohwasserqualität zu rechnen, da hohe Trübungswerte und die damit einhergehenden höheren Flockungsmitteldosen zu keiner Verschlechterung der Aufbereitungsleistung hinsichtlich Permeabilität und Transmembrandruck sowie Produktivität und Ausbeute führten. Folglich ist das Hybridverfahren Flockung / Ultrafiltration besonders geeignet, flexibel auf eine sich ändernde Rohwasserqualität zu reagieren und eine hohe Trinkwasserqualität hinsichtlich partikulärer Belastung dauerhaft ohne zusätzliche Kosten zu sichern.

Durch die Untersuchungen wurde außerdem nachgewiesen, dass eine gleichzeitige Entfernung von gelösten und partikulären Wasserinhaltsstoffen mittels Hybridverfahren Flockung / Ultrafiltration nur schwer möglich ist. Für die Entfernung gelöster organischer Wasserinhaltsstoffe sind daher weitere Aufbereitungsstufen erforderlich. Dafür kommen beispielsweise eine Ozonung oder UV-Bestrahlung gefolgt von einer biologischen Aktivkohlefiltration oder eine auf die Entfernung gelöster Stoffe ausgelegte Flockung und Sandfiltration in Frage. Für letztere kann die Auslegung gezielt unter Verwendung des in Produkt 3.2.3b vorgestellten Modells zur Berechnung der DOC-Restkonzentration erfolgen.