

FITWAS

Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung zur Sicherung der Trinkwasserversorgung

Abschlussbericht Teil 1 - Kurzbericht

Umweltbundesamt
BMBF-Förderkennzeichen 02WV1565E
Laufzeit: 01.02.2021 bis 30.09.2024

April 25

Autorinnen/Autoren

Umweltbundesamt, Fachgebiet II 3.3
Andrea Steuer
Daniel Mahringer
Aki S. Ruhl

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WV1565E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbericht zur Darstellung der Projektergebnisse

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Hintergrund des Verbundprojektes FITWAS ist der in Spitzenlastzeiten gestiegene Trinkwasserbedarf, der sich regional besonders herausfordernd darstellt. Daher suchen deutsche Wasserversorgungsunternehmen vermehrt nach zusätzlichen Rohwasserressourcen für die Trinkwasseraufbereitung. Der in FITWAS verfolgte Weg ist die Wiederverwendung von Filterspülwasser, das in Deutschland bei der Aufbereitung von Grundwasser zu Trinkwasser mit Anteilen zwischen 1 und 4% anfällt.

Ziel des FITWAS-Projektes war es, geeignete Verfahren zu ermitteln bzw. neue Verfahren (z.B. mit Einsatz keramischer Membranen) zu entwickeln, mit denen Filterspülwässer aufbereitet und als Rohwasser in die Wasseraufbereitung zurückgeführt werden können. Damit soll langfristig die Verfügbarkeit von Trinkwasser erhöht werden.

Die Membranfiltration wird seit etwa 20 Jahren zur Aufbereitung von Oberflächenwasser eingesetzt. Es wurden bereits mehrere Pilotstudien zur Aufbereitung von Filterspülwässern mittels polymerbasierter Ultrafiltration durchgeführt, welche jedoch vorwiegend die Trinkwassererzeugung aus Oberflächenwasser oder Quellwasser betreffen. Bisher hat sich die Rückgewinnung des Filterspülwassers aus Kostengründen und teilweise aufgrund von Betriebsproblemen nicht etabliert. Keramische Membransysteme wurden wegen fehlender Betriebserfahrungen und hoher Investitionskosten bisher nicht pilotiert.

Zur Wiederverwendung der Filterspülwässer wurden in FITWAS verschiedene Membranfiltrationskonzepte untersucht: (i) getauchte Membranen im Unterdruckbetrieb sowie (ii) Membranen im Druckbetrieb, ausgehend von Laborversuchen bis hin zu Pilotversuchen in drei Wasserwerken. Ein wichtiger Aspekt war dabei die Aufbereitungsleistung keramischer Membranen im Vergleich zu polymeren Membranen.

2. Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn des Projektes wurden an einer SIMA-tec Membrantestanlage für Flachmembranen bei hohem (bis ca. 80 bar) und niedrigem Druck (bis 10 bar) im Cross-Flow Betriebsparameter mit verschiedenen Filterspülwässern (FSW) (aus der 1. und 2. Stufe der Grundwasseraufbereitung) getestet und die erreichbare Filtratqualität aufgenommen. Da in den Membran-Pilotanlagen Hohlfasermembranen eingesetzt werden sollten, wurde ein zusätzliches Modul für Hohlfasermembranen verwendet.

Die FSW wurden ausführlich charakterisiert (Vergleich der FSW beider Filterstufen bzgl. Wasserinhaltsstoffen, zeitliche Auflösung der Spülung, Sedimentationsverhalten) und anschließend mit und ohne Sedimentation über Membranen filtriert, um günstige Betriebsbedingungen zu identifizieren. Gerade die Aufbereitung mittels Hohlfasermembran brachte unerwartete Verzögerungen und Probleme mit sich, da die Membrantestanlage über keine Rückspülmöglichkeit verfügt und die partikelhaltigen FSW die Membran stark belasteten. Um die Laborbedingungen näher an die Pilotbedingungen der anderen Partner heranzubringen, wurden Versuche an den Laboranlagen der DVGW-Forschungsstelle durchgeführt.

Bezüglich der Filtratqualität wurden Schwerpunkte auf Schwermetalle (SM) und Viren gelegt. In Absprache mit den anderen Projektpartner*innen wurden besonders relevante Schwermetalle ausgewählt (As, Cd, Cu, Ni, Pb) und zunächst Vorversuche mit As(III) und As(V) durchgeführt, um günstige Versuchsbedingungen zu bestimmen und den Einfluss der Redoxspezierung auf die Entfernbarkeit zu evaluieren. Anschließend wurden Pilotversuche durchgeführt, in denen ein SM-Gemisch in den Zulauf

der Pilotanlage zur Aufbereitung von Grundwasser dosiert und die Entfernung untersucht wurde. Das resultierende FSW wurde aufgefangen und mit der Membantestanlage aufbereitet. Zusätzlich wurde mit SM belasteter FSW-Schlamm in verschiedenen Versuchen auf die Freisetzung von SM untersucht.

Der Verbleib von Viren während der Grundwasseraufbereitung und FSW-Aufbereitung wurde anhand von zwei Indikatororganismen (Bakteriophagen) analog zu den SM untersucht. Zusätzlich wurde das Rückhaltevermögen mehrerer Membranen an der DVGW-Forschungsstelle untersucht.

3. Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

3.1 Filterspülwasser und Membranfiltrierbarkeit

Das FSW der 1. Filterstufe (Eisenentfernung) der Pilotanlage zur Grundwasseraufbereitung enthielt deutlich mehr Partikel als das FSW der 2. Filterstufe (Manganentfernung), sodass der Transmembrandruck (TMP) im Normalbetrieb schneller ansteigt. Die Partikel der 2. Filterstufe waren jedoch von höherer Dichte und konnten die Betriebsstabilität der Membranaufbereitung gefährden, sodass eine Voredimentation vorteilhaft war. Die Sedimentation zeigte keinen Nachteil beim Betrieb von Flachmembranen im Cross-Flow und kann bei langer Betriebszeit für einen stabilen Transmembrandruck sorgen.

3.2 Schwermetalle

Die SM wurden in der Pilotanlage größtenteils zurückgehalten und fanden sich in der Festphase des FSW wieder. Die Adsorbierbarkeit war von Redoxspezies des jeweiligen SM und der Art des Adsorbens abhängig. Bei der Rückspülung und der Membranaufbereitung des FSW fand keine nennenswerte Remobilisierung der an der Festphase adsorbierten SM statt, sodass eine Rückführung der Flüssigphase in den Rohwasserstrom zu keiner Erhöhung der SM-Konzentration führte. Lediglich bei einer pH-Verschiebung in den sauren Bereich kam es zur Auflösung der Feststoffe, bei der die SM in die Flüssigphase übergingen. In der Praxis kann dieser Zustand während oder kurz nach der Membranreinigung vorkommen. Die saure Reinigungslösung muss demnach gesondert entsorgt werden.

3.3 Viren

Die Indikatororganismen MS2 und Φ X174 verblieben während der Grundwasseraufbereitung in der Flüssigphase und es kam zu keiner nennenswerten Entfernung. Die Konzentration im FSW und die Konzentration im Zulauf waren in derselben Größenordnung. Bei der Aufbereitung von MS2-haltigem FSW konnten keine Phagen im Filtrat nachgewiesen werden, was einer MS2-Entfernung von fast 4 \log_{10} -Stufen entsprach. Φ X174 wurden hingegen in allen Filtratproben nachgewiesen, die Entfernung betrug bis zu 3 \log_{10} -Stufen.

In dotierten Versuchen am Standort der DVGW-Forschungsstelle wurde der Rückhalt von Bakteriophagen an drei Membrantypen in Abhängigkeit der Zulaufmatrix untersucht. In Leitungswasser konnte ein Rückhalt von bis zu 7 \log_{10} -Stufen für beide Bakteriophagen erzielt werden, eine direkte Korrelation zur Porengröße der Membranen war nicht gegeben. Der Rückhalt in FSW war für beide Bakteriophagen niedriger (max. 6 \log_{10} -Stufen), jedoch war auch die Wiederfindung im Zulauf geringer, sodass Wechselwirkungen mit den FSW-Partikeln angenommen werden. Außerdem scheinen die Wasserinhaltsstoffe einen Einfluss auf die Membranoberfläche und somit den Rückhalt von Bakteriophagen zu haben.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Wiederverwendung von Filterspülwässern

aus der Grundwasseraufbereitung

FITWAS

Wiederverwendung von Filterspülwässern
aus der Grundwasseraufbereitung zur Sicherung
der Trinkwasserversorgung

Abschlussbericht Teil 2 - Eingehende Darstellung

Umweltbundesamt
BMBF Förderkennzeichen 02WV1565E
Laufzeit: 01.02.2021 bis 30.09.2024

April 25

Autorinnen/Autoren

Umweltbundesamt
Andrea Steuer
Daniel Mahringer
Aki S. Ruhl.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WV1565E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorinnen und Autoren.

Zur besseren Lesbarkeit wird nicht zwischen weiblichen und männlichen Berufsbezeichnungen unterschieden; es sind immer beide Geschlechter gleichberechtigt angesprochen.

Danksagung

Die dargestellten Ergebnisse wurden im BMBF-geförderten Verbundvorhaben FITWAS „Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung zur Sicherung der Trinkwasserversorgung“ erarbeitet. Für die Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „Wassertechnologien: Wiederverwendung“ bedanken sich die Autoren im Namen des gesamten Projektverbundes. Die gute Betreuung durch den Projektträger Karlsruhe, namentlich die konstruktive und engagierte fachliche Betreuung durch Herrn Dr. Delay und administrative Betreuung durch Frau Köhler sei besonders herausgestellt.

Die Autoren bedanken sich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Studierenden, die zum Gelingen des Verbundprojektes FITWAS beigetragen haben. Für die Übernahme der Eigenmittel des Teilprojektes der DVGW-Forschungsstelle TUHH danken wir dem DVGW. Besonderer Dank gilt der DVGW-Expertenbegleitrunde für die fachliche Unterstützung und die wertvollen Hinweise im Verlauf der Projektarbeiten. Den Partnern des Transferprojekts TransWavE danken wir für die angenehme Zusammenarbeit und ausgezeichnete Organisation der Vernetzungs- und Transferaktivitäten.

Inhalt

I.	Hintergrund und Ziel des Projektes.....	4
II.	Eingehende Darstellung des Projektes	4
II.1	Ergebnisse AP 1: Innovative Verfahrens- und Betriebsstrategien zur Filterspülwasser-Rückgewinnung.....	4
II.1.1	AP 1.2: Voruntersuchungen zu Variation der Eigenschaften der Filterspülwässer	4
II.1.2	AP 1.4: Laborversuche mit Polymermembranen (Unterdruck-/Druckfiltration)	7
II.2	AP 2: Praxisversuche zur Aufbereitung von Filterspülwässern	10
II.2.1	AP 2.4: Praxisversuche am UBA-Versuchswasserwerk	10
II.3	Ergebnisse AP 3: Qualität des rückgewonnenen Wassers und Wiederverwendbarkeit.....	14
II.3.1	AP 3.1: Rechtliche Situation und Rahmenbedingungen für die Wiederverwendung von Filtrat	14
II.3.2	AP 3.2: Mikrobiologische Qualität des rückgewonnenen Wassers	15
II.3.3	AP 3.3: Qualität des rückgewonnenen Wassers - Chemikalieneintrag	15
II.3.4	AP 3.4: Logistische/prozesstechnische Voraussetzungen für die Wiederverwendung von Filtrat .	15
II.4	Ergebnisse AP 4: Qualität des Filterschlammes und Verwertbarkeit.....	17
II.4.1	AP 4.1: Rechtliche Situation und Wirtschaftlichkeit der Filterschlamm-Verwertung	17
II.4.2	AP 4.3: Qualität des Filterschlammes in Bezug auf mikrobiologische Eigenschaften	17
II.5	Ergebnisverwertung	18
II.5.1	AP 5.1: Ergebnisverwertung für die Fachöffentlichkeit.....	18
II.5.2	AP 5.2: Ergebnisverwertung in Form von Publikationen/Patenten	18
II.6	Ergebnisse AP 6: Projektkoordination, Datenaustausch, Projekttreffen, Berichte	19
II.6.1	AP 6.1: Projektkoordination, Partnerabsprachen, Projekttreffen, Berichte	19
III.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	20
IV.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	20
V.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	21
VI.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	22
VII.	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	23
VII.1	Begutachtete Publikationen	23
VII.2	Nicht begutachtete Publikationen	23
VII.3	Vorträge auf wissenschaftlichen Tagungen.....	23
VII.4	Poster-Publikationen auf wissenschaftlichen Tagungen	23
VII.5	Geplante Veröffentlichungen	23
VIII.	Anhang.....	24
VIII.1	Abkürzungsverzeichnis	24
VIII.2	Literaturverzeichnis	25
VIII.3	Abbildungsverzeichnis	25

VIII.4 Tabellenverzeichnis 25

I. Hintergrund und Ziel des Projektes

Filterspülwasser entsteht an allen Wasserwerken, die Grundwasser zu Trinkwasser aufbereiten, und wird in vielen Fällen ungenutzt entsorgt. Somit geht kostbares Wasser und möglicherweise verwertbarer eisenhaltiger und manganhaltiger Schlamm verloren. Im Rahmen des FITWAS-Projektes wurden innovative und umsetzbare Optionen zur Erhöhung der Trinkwasserverfügbarkeit durch Aufbereitung dieser Spülwässer geprüft, um den Primärwassereinsatz in Wasserwerken zu reduzieren. Hierzu wurden verschiedene Werkstoffe und Betriebsstrategien von Ultrafiltrationsmembranen (UF-Membranen) in Abhängigkeit der Filterspülwasserzusammensetzung untersucht. Als Ergebnis des Projekts sollten ausgehend von unterschiedlichen Filterspülwassercharakteristika Empfehlungen für die Auswahl von Membranwerkstoffen und Betriebsweisen für die Ultrafiltration gegeben werden. Des Weiteren wurden rechtliche Fragen zur großtechnischen Umsetzung geklärt und daraus resultierende Ansprüche an die Filtratqualität formuliert. Vor dem Hintergrund der Rückführung des aus der Membranfiltration gewonnenen Filtrats in den Rohwasserstrom sollte der Verbleib von Kontaminationen (insbesondere Viren und Schwermetalle (SM)) während der Aufbereitung untersucht werden. Eine Verschlechterung der Trinkwasserqualität durch eine Rückführung der aufbereiteten Spülwässer ist unbedingt zu vermeiden.

II. Eingehende Darstellung des Projektes

II.1 Ergebnisse AP 1: Innovative Verfahrens- und Betriebsstrategien zur Filterspülwasser-Rückgewinnung

II.1.1 AP 1.2: Voruntersuchungen zu Variation der Eigenschaften der Filterspülwässer

Am Versuchsstandort des Umweltbundesamtes (UBA) in Berlin-Marienfelde wurde das Spülwasser einer halbtechnischen Pilotanlage zur biologischen Enteisung und Entmanganung (Abbildung 1) betrachtet. Diese Pilotanlage besteht aus zwei Säulen, die jeweils im Aufstrom mit Grundwasser beschickt und mit Sauerstoff versetzt werden. Die Sauerstoffdosierung der ersten Säule ist so eingestellt, dass hauptsächlich das im Grundwasser enthaltene zweiwertige Eisen (Fe(II)) oxidiert und im Filterbett ausgefällt wird, während das Mangan erst in der zweiten Säule oxidiert und ausfällt. Die erste Säule (Eisensäule) wird jeden zweiten Tag gespült, die zweite Säule (Mangansäule) jeden fünften Tag. Die Spülung dauert jeweils drei Minuten.

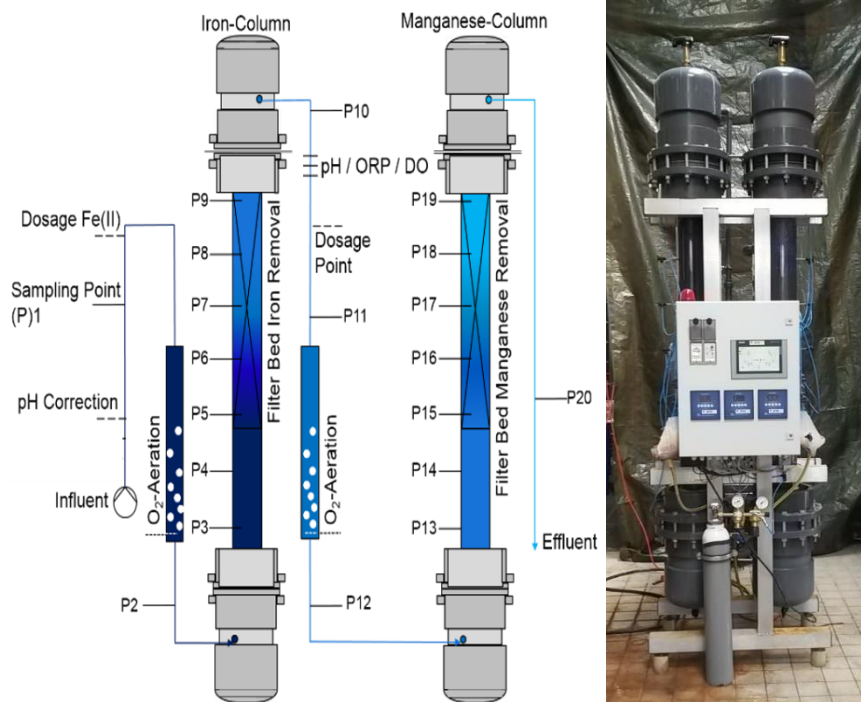


Abbildung 1: Verfahrensfliessbild (links) und Foto (rechts) der Pilotanlage.

Die Filterspülwässer (FSW) der Säulen wurden zeitgestaffelt untersucht. Alle 30 Sekunden ab Start der Spülung wurde ein Liter Probe aufgefangen und gängige Parameter in insgesamt sechs Proben aufgenommen. Einige Parameter wie pH-Wert, Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt änderten sich kaum im Verlauf der Spülung. Andere Parameter wie das Schlammvolumen und der Trockensubstanzgehalt (bestimmt als abfiltrierbare Substanzen (AFS)) unterlagen im Verlauf einer Spülung deutlichen Schwankungen. Exemplarisch ist in Abbildung 2 der Verlauf der AFS während der Spülung der Eisen- und Manganensäulen an verschiedenen Beprobungstagen über die Dauer der Spülung aufgetragen.

In der Regel wird Spülwasser gesammelt aufgefangen. Tabelle 1 bildet daher Mittelwerte aller Messungen für das aufgefangene FSW ab. Für die meisten veränderlichen Parameter (z.B. AFS, gelöstes Eisen (Fe(gel.)), Gesamteisen (Fe(ges.)), Schlammvolumen) lagen die Durchschnittswerte im Fe-FSW höher als im Mn-FSW. Dies ist auf die Beschaffenheit des Grundwassers und den Aufbereitungsprozess zurückzuführen. Organische Summenparameter unterschieden sich zwischen den zwei Wässern wenig. Der Gehalt an gelöstem Mangan war ebenfalls ähnlich und relativ hoch, ähnlich zu Grundwasserkonzentrationen. Dies war für die Membranaufbereitung zu beachten, da hohe Mangankonzentrationen Membranscaling herbeiführen können¹.

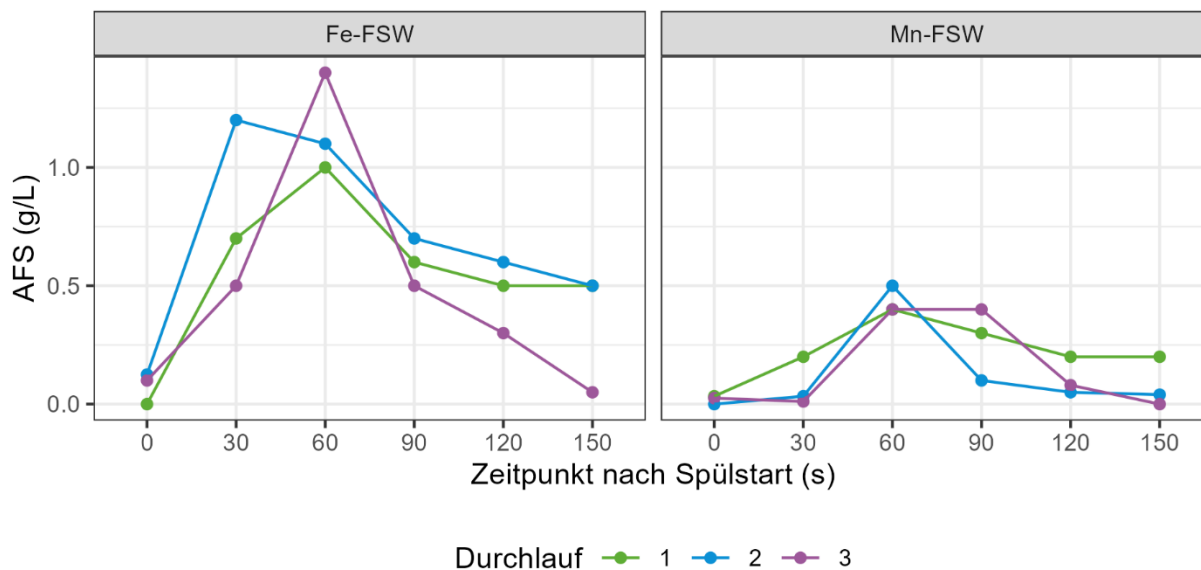


Abbildung 2: Verlauf der AFS-Konzentration über die Spüldauer der (I) Eisen- und (II) Mangansäule.

An jedem Beprobungstag ist ein Verlauf der Konzentration während der Spülung zu erkennen, der Verlauf zeigt für die meisten Tage ähnliche Trends.

FSW besteht am Anfang der Spülung aus unbehandeltem Grundwasser und enthält daher keine AFS. Für alle Versuche wurde daher FSW nach einer Minute aufgefangen und vorrangig die Parameter AFS, Fe und Mn betrachtet, weil sie für die Membranaufbereitung besonders relevant sind.

Tabelle 1: Charakterisierung der FSW aus der biologischen Enteisung und Entmanganung (Pilotanlage). Berechnungen ergeben sich aus allen aufgenommenen Messdaten exklusive Ausreißer

Parameter	Einheit	Fe-FSW				Mn-FSW			
		n	Ø	min	max	n	Ø	min	max
AFS	g/L	30	0,45	0	1,7	24	0,15	0	0,5
DOC	mg/L	30	2,88	1,13	4,02	24	3,7	2,6	11,5
Fe (gel.)	µg/L	36	287,1	< 50	1975,6	24	39,4	< 50	380
Fe (ges)	mg/L	18	179,4	6,3	760,6	6	5,3	0,5	18,6
Leitfähigkeit	µS/cm	36	1304,3	1286	1367	24	1307,7	1283	1370
Mn (gel.)	µg/L	36	353	275,1	612,8	24	325,8	208,5	664,2
O ₂ (gel.)	mg/L	6	160	39,8	250,3	6	283	5	754,4
pH	-	36	7,2	7,1	7,4	24	7,2	7,12	7,7
Schlammvolumen	mL/L	36	17	0,05	96	24	3,4	0,05	19
TOC	mg/L	12	15	2,8	32,3	12	15	2,9	27,6

II.1.2 AP 1.4: Laborversuche mit Polymermembranen (Unterdruck-/Druckfiltration)

Membranversuche am UBA wurden an einer Membrantestanlage der Firma SIMA-tec durchgeführt. Die Anlage ist für Druckfiltration mit Membranen im hohen Druckbereich (bis 80 bar) ausgelegt, kann jedoch auch im niedrigen Druckbereich betrieben werden. Die Membranen werden im „cross-flow“ betrieben. Zusätzlich zur ursprünglich im Lieferumfang der Anlage enthaltenen Flachmembranzelle wurde im Laufe des Projekts eine Hohlfasermembranzelle beschafft. Getestet wurden Membranen aus Polyethersulfon (PES).

II.1.2.1 Versuche mit Flachmembranen

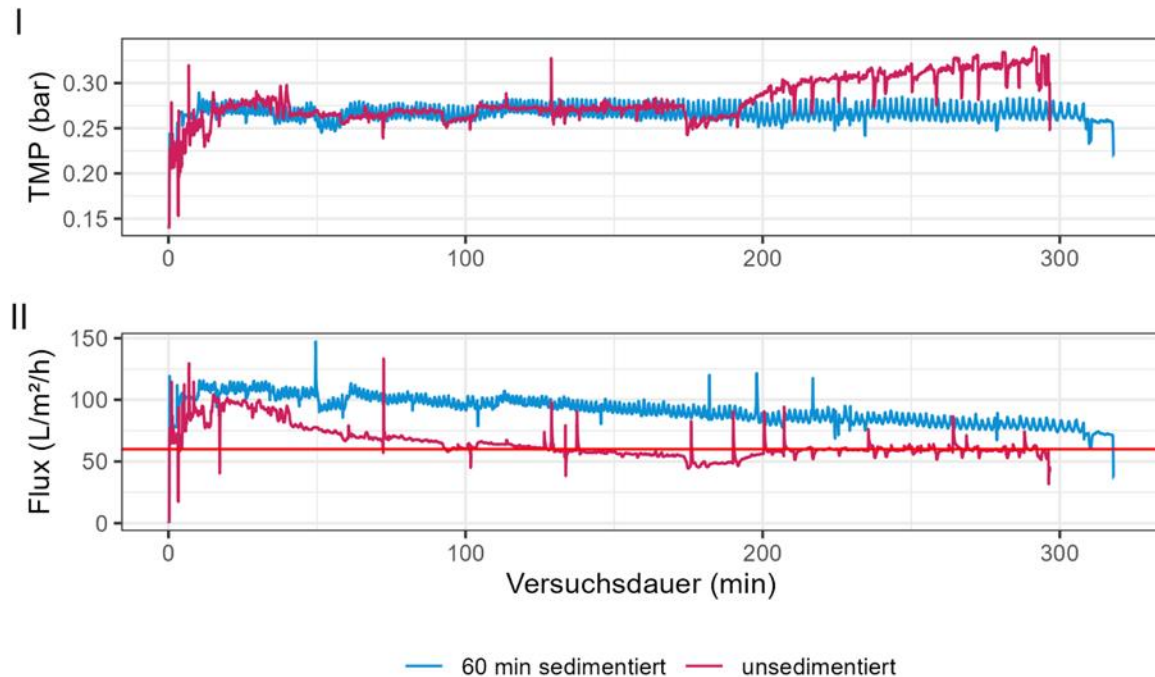


Abbildung 3: Verlauf des (I) Transmembrandrucks (TMP) und des (II) Fluxes während der Aufbereitung von durchmischem und sedimentiertem FSW. Der Ziel-Flux von 60 L/m²/h ist als rote Linie eingezeichnet (II).

In Versuchen zur Aufbereitung von FSW wurden zunächst verschiedene Filtrat- und Feedströme an einer Ultrafiltrationsmembran (Microdyn-NADIR® UP 150P) getestet. Schon bei Feedströmen von 10 L/h konnten hohe anfängliche Fluxe von über 100 L/m²/h (LMH) erzielt werden. Während der Aufbereitung von durchmischem FSW sank dieser Wert schneller auf den eingestellten Flux von 60 LMH ab (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** II). Während der Versuche mit durchmischem FSW konnte ein Rückstand am Boden des Vorlagebehälters beobachtet werden, was darauf hinwies, dass die im FSW befindlichen Feststoffe im Verlauf des Versuchs sedimentierten. Eine Sedimentationszeit von 1 h war ausreichend, um ein weiteres Absetzen während des Versuches zu verhindern.

Bei höheren Feedströmen stieg auch der Flux deutlich an. Um eine Vergleichbarkeit zur Keramikmembran (AP 1.3) herzustellen, wurde ein Zielflux von 200 LMH für die folgenden Versuche angesetzt. Bei Feedströmen von 25 L/h konnte dieser Zielwert über mehrere Stunden bei geringem Anstieg des Transmembrandrucks (TMP) von etwa 0,1 bar über 3 h gehalten werden.

Die Membrantestanlage ist für hohe Drücke ausgelegt und verfügt über keine Rückspülmöglichkeit. Eine händische Rückspülung führte zu keinem sichtbaren Reinigungserfolg, so dass die Membran zwischen den Versuchen ausgebaut und abgespült wurde. Bei Bedarf wurde eine chemische Reinigung mit Schwefel- und Phosphorsäure durchgeführt. So konnten Eisenablagerungen gut bereinigt werden.

II.1.2.2 Versuche mit Hohlfasermembranen

Während der Versuche mit der Hohlfasermembran konnte eine Erhöhung des TMP auch nach Spülung beobachtet werden (Abbildung 4). Allerdings konnten die Versuche nicht zu Ende gebracht werden, da die Membran während der Durchführung wiederholt riss. Das Reißen trat unabhängig von der Sedimentationszeit (und damit einhergehenden Partikelkonzentrationen im FSW) in verschiedenen Durchläufen auf. Mögliche Ursachen waren die fehlende Rückspülung und Sedimentation der Partikel in den Kapillaren, was lokal zu einer Erhöhung des Druckes geführt haben könnte. Diese Ursachen waren durch die Konfiguration der Anlage bedingt und konnten während der Projektlaufzeit nicht behoben werden.

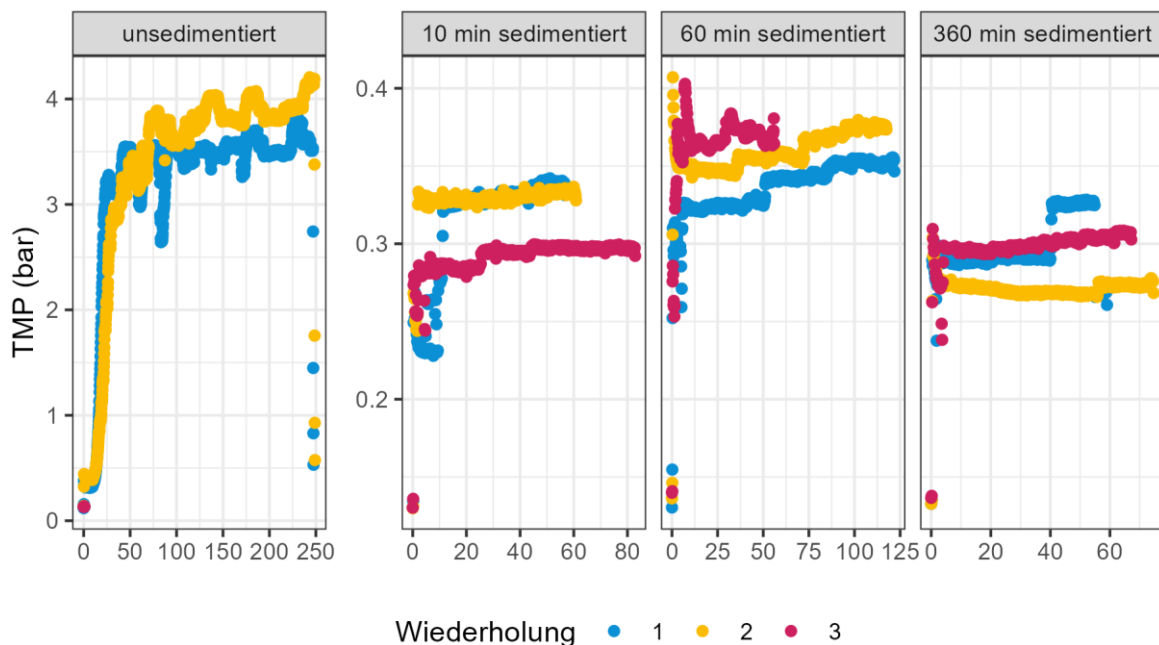


Abbildung 4: Verlauf des TMP bei der Aufbereitung von eisenhaltigem FSW mittels Hohlfasermembran in Abhängigkeit von der Sedimentationszeit.

Um dennoch aussagekräftige Versuche mit Polymermembranen durchführen zu können, wurden Versuche mit dem FSW vom Standort Berlin-Marienfelde an einer Versuchsanlage an die TUHH ausgelagert. Dies wurde mittels PES-Hohlfasermembran im „dead-end“-Betrieb aufbereitet. Dazu wurden sechs Filterzyklen von je einer Stunde bei 100 LMH durchgeführt, mit kurzen Rückspülintervallen nach jedem Filterzyklus. Im Anschluss wurde die Membran gereinigt und der Versuch wiederholt.

Es sind deutlich Unterschiede im Membranbetrieb zwischen den beiden Wässern zu beobachten (Abbildung 5). Bei der Behandlung des Fe-FSW stieg der TMP zunächst langsam an, am Ende des vierten Durchlaufs wurde der Anstieg steiler. Der sechste Durchlauf wurde wegen Erreichen des eingestellten Maximaldrucks (4 bar) automatisch abgebrochen. Trotz Reinigung der Membran stieg der Druck im zweiten Durchlauf von Beginn an stark an und der Versuch wurde nach drei Durchläufen wegen Erreichen des Maximaldrucks abgebrochen (Abbildung 5).

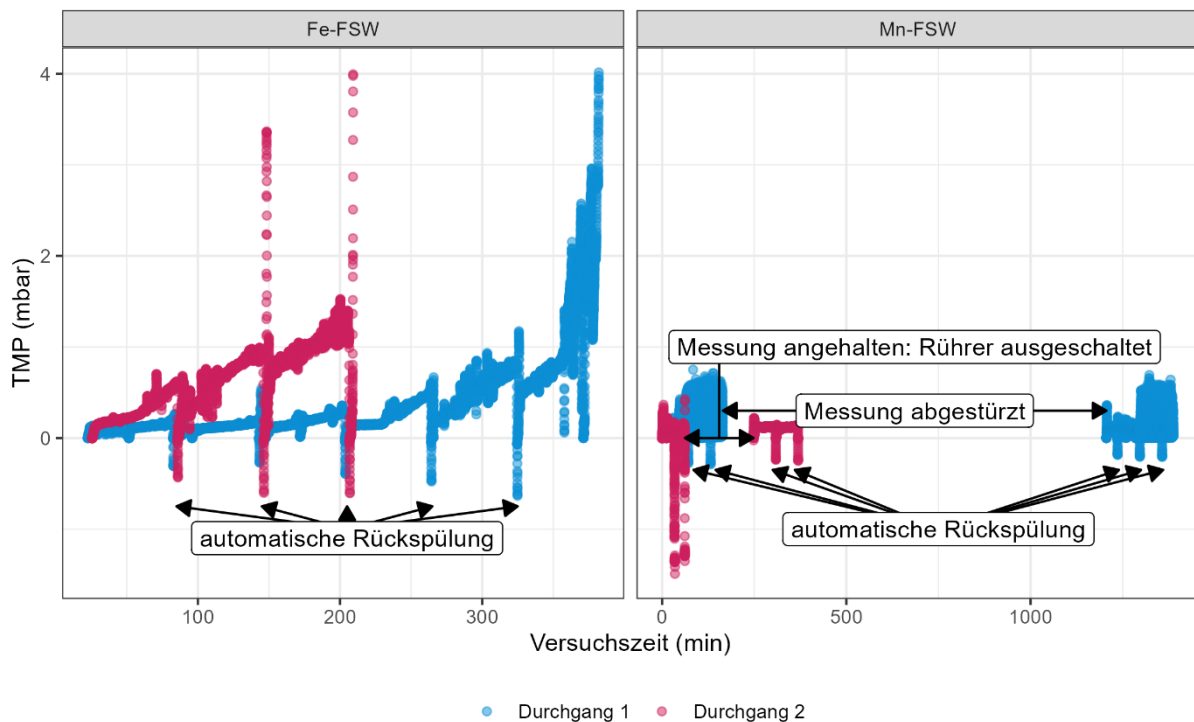


Abbildung 5: TMP-Verlauf bei der Aufbereitung von FSW aus der 1. Filterstufe (links) und der 2. Filterstufe (rechts) mittels Hohlfasermembran.

Bei der Behandlung des Mn-FSW konnte lange kein stabiler Betrieb hergestellt werden. Die dichten Manganpartikel setzen sich in den Schläuchen und an den Detektoren ab, was zu einem fluktuierenden Wasserfluss führt. Erst nachdem die Durchmischung des Vorlagebehälters eingestellt wurde, sodass sich die Partikel absetzen konnten, wurde ein stabiler Betrieb erreicht. Durch die geringere Feststoffkonzentration blieb der TMP im Vergleich zu Versuchen mit Fe-FSW niedrig (Abbildung 5).

Für den Realbetrieb ist demnach zu prüfen, ob die Partikeleigenschaften einen gleichmäßigen Betrieb der Membrananlage beeinflussen und eine Vorfiltration oder Sedimentation Betriebsstabilität herbeiführen können.

II.1.2.3 Rückhalt von Bakteriophagen durch Polymermembranen

Es wurden vergleichende Laborversuche mit keramischen und polymeren Membranen zur Entfernung von Φ X174 und MS2 als Modellorganismen für humanpathogene Viren parallel durch DVGW-TUHH und UBA am Standort DVGW-TUHH durchgeführt. Es wurde der Einfluss der Wassermatrix untersucht, indem Versuche in Leitungswasser und FSW vom HWW-Standort Süderelbmarsch durchgeführt wurden.

Zwei verschiedene Polymer-Membranen wurden getestet, eine im Druck- und eine getaucht im Unterdruckbetrieb, sowie eine getauchte Keramikmembran im Unterdruckbetrieb (Tabelle 2). Basierend auf der Größe der verwendeten Bakteriophagen (26 – 32 nm), wurden deutliche Unterschiede im Phagenrückhalt zwischen den Membranen mit unterschiedlicher Porenweite erwartet. Diese Unterschiede konnten nicht bestätigt werden. In Trinkwasser war der Rückhalt von Φ X174 für alle Membrane ähnlich, der Rückhalt von MS2 war durch die Druckmembran etwas geringer als bei den anderen Membranen. In FSW war der Rückhalt generell niedriger, was auf eine schlechtere Wiederfindung der Phagen im Feed zurückzuführen war. Auch hier zeigte sich, dass die Porenweite kein hinreichender Parameter zur Voraussage des Rückhaltes darstellt. Mögliche andere Mechanismen sind Adsorption an Feststoffe,

Koagulation mehrerer Viruspartikel und elektrostatische sowie hydrophobe Wechselwirkungen zwischen den Phagen und der Membranoberfläche.

Tabelle 2: Vergleich der verwendeten Polymermembranen für die Untersuchung des Phagenrückhaltes

	Polymer (Druck)	Polymer (getaucht)	Keramik (getaucht)
Material	PES	PVDF	SiC
Nominelle Porengröße	20 nm	40 nm	100 nm
ΦX174 -Rückhalt in Trinkwasser(log ₁₀ -Stufen)	3,5 – 7	3,5 – 7	3 – 7
ΦX174 -Rückhalt in FSW (log ₁₀ -Stufen)	2 – 6	3,5 – 6	2,5 – 5,5
MS2-Rückhalt in Trinkwasser (log ₁₀ -Stufen)	2 – 7	3,5 – 7	3 – 7
MS2-Rückhalt in FSW (log ₁₀ -Stufen)	2,5 – 3,5	2,5 – 5,5	3,5 – 6

II.2 AP 2: Praxisversuche zur Aufbereitung von Filterspülwässern

II.2.1 AP 2.4: Praxisversuche am UBA-Versuchswasserwerk

II.2.1.1 Entfernung und Remobilisierung von Schwermetallen

Die Entfernung von SM-Gemischen wurden in der Pilotanlage zur Grundwasseraufbereitung betrachtet. Von Interesse war hierbei zum einen die Entfernung der SM in der Pilotanlage, zum anderen ob die am Filterschlamm adsorbierten SM bei der Membranbehandlung remobilisiert werden können und möglicherweise bei der Rückführung des UF-Filtrats in das Rohwasser eine Gefährdung für die Trinkwasserqualität verursachen können. Aus Vorversuchen ging hervor, dass einige SM besser an Manganoxiden adsorbieren als an Eisenhydroxiden, daher wurde die Dosierung sowohl vor dem ersten Filter (Fe-Säule) als auch vor dem zweiten Filter (Mn-Säule) durchgeführt. Die Konzentrationsverläufe sind in Abbildung 6 dargestellt.

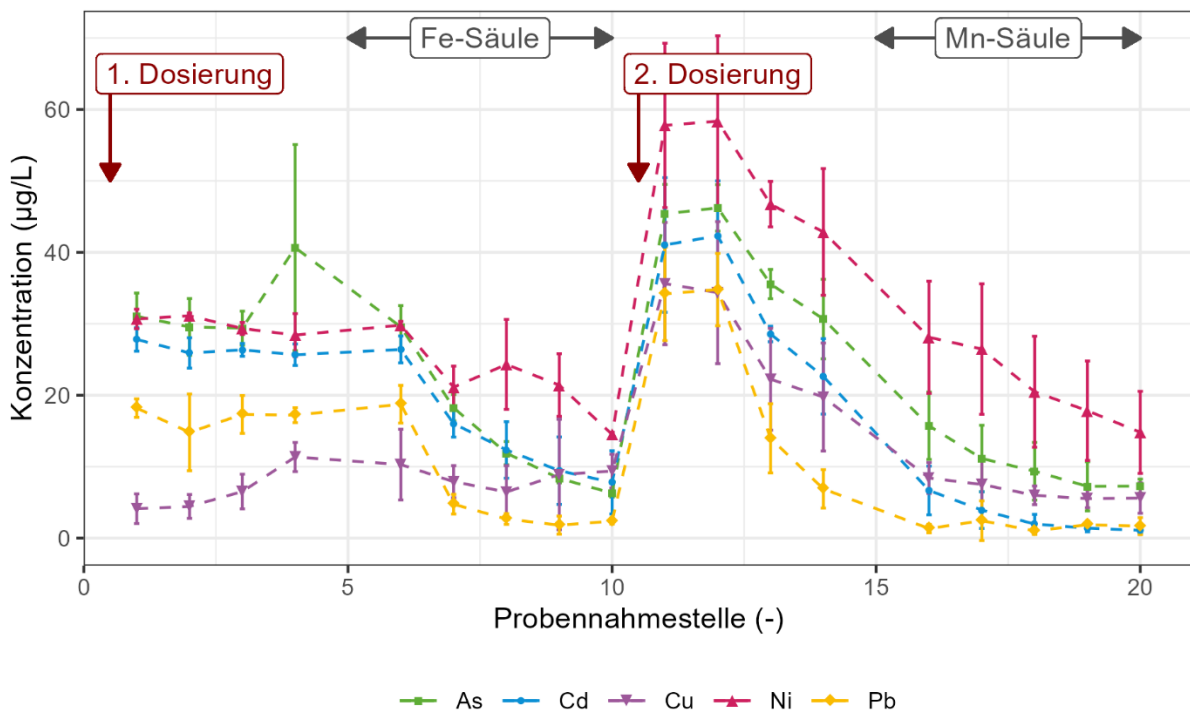


Abbildung 6: Mittlerer Konzentrationsverlauf verschiedener Schwermetalle in der Pilotanlage über 48 h (n = 3, Fehlerbalken = Standardabweichung).

Alle SM außer Kupfer wurden in der ersten Säule zu einem gewissen Anteil entfernt. Die Bleikonzentration im Ablauf war dabei besonders niedrig, während die Nickelkonzentration am wenigsten abnahm. Dennoch lagen alle SM im Ablauf der ersten Säule unterhalb des jeweiligen aktuellen Trinkwassergrenzwertes, mit der Ausnahme von Cadmium. In der zweiten Säule wurden alle dosierten SM zu großen Teilen und bis unter die jeweiligen Grenzwerte entfernt. Im FSW war die Konzentration in der Flüssigphase für alle Schwermetalle geringer als im Zulauf der jeweiligen Säule. Eine Remobilisierung und Aufkonzentrierung in der Flüssigphase konnte somit ausgeschlossen werden, und der Großteil der dosierten SM lag am Feststoff gebunden vor (Tabelle 3).

Tabelle 3: Aufteilung der Schwermetalle auf die Fest- und Flüssigphase des FSW.

	As	Cd	Cu	Ni	Pb
Grenzwert nach Trinkwasserverordnung (µg/L)	10 (4)*	3	2.000	20	10 (5)*
Flüssigphase Fe-FSW (µg/L)	5,1	13,2	6,8	17,4	5,1
Flüssigphase Mn-FSW (µg/L)	15,0	10,1	16,0	28,5	3,0
Festphase Fe-FSW (mg/g)	1,1	0,7	35,0	16,5	23,8
Festphase Mn-FSW (mg/g)	0,4	0,2	34,3	8,7	14,7
Feedkonzentration Membranaufbereitung (µg/L)	7,8	2,3	9,6	17,1	3,5
Filtratkonzentration Membranaufbereitung (µg/L)	7,5	2,2	4,7	15,9	0,7

*: Grenzwert ab 2028 für neue bzw. ab 2036 für bestehende Wasserwerke

Während der Membranaufbereitung konnte keine Remobilisierung der SM beobachtet werden, die Konzentrationen im Filtrat waren gegenüber der Spülwasserkonzentration konstant oder sogar niedriger. Schüttelversuche mit realem Filterspülschlamm in Reinstwasser bei verschiedenen pH-Werten zeigten keine signifikante Remobilisierung im üblichen pH-Bereich (pH 6-8), jedoch einen deutlichen Anstieg der Konzentration einiger Metalle bei niedrigem pH Wert (Abbildung 7). Diese niedrigen pH-Werte können während einer sauren Reinigung der Membranen vorkommen. Eine gründliche Entfernung der Reinigungslösung ist somit notwendig, um einen Eintrag von SM ins Rohwasser bei einer Rückführung des Filtrats zu vermeiden. Gleichzeitig kommt es durch die Mischung des Filtrates mit

Rohwasser eher zu einer Absenkung der SM-Konzentrationen des Rohwassers, sodass keine Verschlechterung der Trinkwasserqualität durch die Rückführung des Filtrats zu erwarten ist.

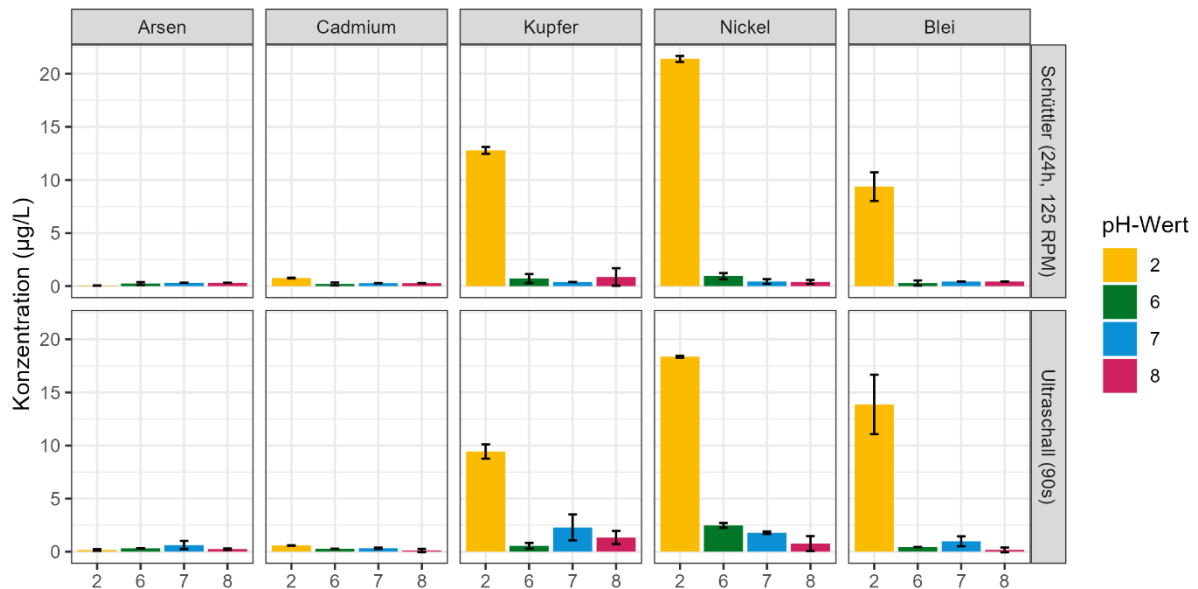


Abbildung 7: Freisetzung von Schwermetallen aus Filterschlamm in Abhängigkeit des pH-Wertes.

Neben dem SM-Gemisch wurde in einer eigenständigen Versuchsreihe die Entfernung von Selen (Se) in zwei Redoxstufen (Se(IV) und Se(VI)) geprüft (Abbildung 8). Se(IV) wurde analog zu den vorherigen SM-Versuchen in den Grundwasserzulauf der Pilotanlage dosiert. Eine Entfernung von über 80 % konnte erzielt werden, wobei die Entfernung im Laufe der Versuchszeit abnahm.

Für die Entfernung von Se(VI) wurden zwei Szenarien betrachtet. Zunächst sollte die reine Adsorption an Fe(III) untersucht werden. Hierzu wurde die Pilotanlage mit Grundwasser beschickt und die Filter vorbeladen. Anschließend wurde eisenfreies Wasser mit Se(VI) versetzt und in der Pilotanlage aufbereitet. In einem zweiten Versuch wurde eisenfreies Wasser mit Se(VI) und Fe(II) versetzt und in der Pilotanlage aufbereitet. Hierbei wurde untersucht, ob Se(VI) durch Fe(II) in Se(IV) überführt und anschließend adsorbiert werden kann.

Über die gesamte Versuchszeit konnte keine Abnahme der Se-Konzentration festgestellt werden, weder mit noch ohne Eisenzugabe. Im Versuch ohne kontinuierliche Eisenzugabe war zu Versuchsbeginn eine leichte Reduktion der Se-Konzentration zu verzeichnen, welche durch die bereits vorhandenen Adsorptionsplätze zu Versuchsbeginn erklärbar ist. Im Laufe des Versuches wurden diese Adsorptionsplätze erschöpft und es kam zu keiner weiteren Se-Adsorption. Das Reduktionspotential von Fe(II) ist somit nicht ausreichend, Se(VI) zu Se(IV) zu überführen.

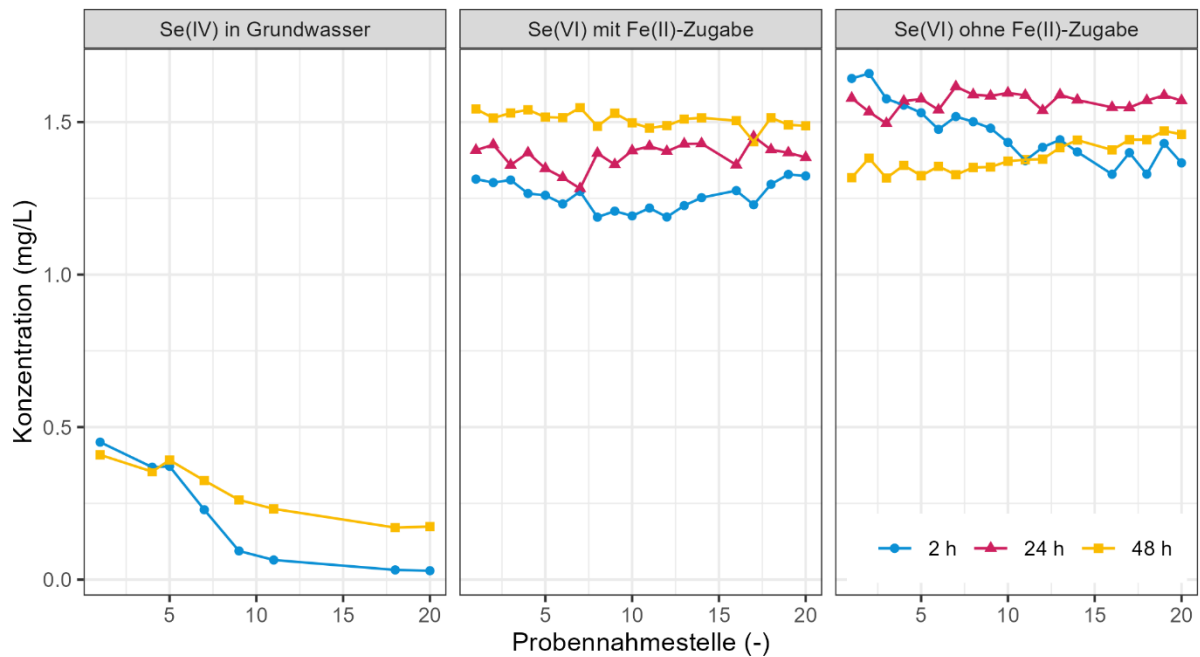


Abbildung 8 Entfernung von Se als Se(VI) und Se(IV) in der Pilotanlage.

II.2.1.2 Zugabe von Bakteriophagen

Neben SM wurden die Entfernung und Remobilisierung von Bakteriophagen (als Modellorganismen für Viren) betrachtet. In zwei Versuchen wurde die Entfernung der MS2-Phagen bei Filtergeschwindigkeiten von 15 m/h und 7,5 m/h untersucht. Zusätzlich wurde die Entfernung von Φ X174-Phagen bei 7,5 m/h betrachtet. Anschließend wurde das FSW in der Membrantestanlage aufbereitet. Durch diese Versuche sollten folgende Fragen geklärt werden:

- Lassen sich Phagen durch Adsorption während der Grundwasseraufbereitung entfernen?
- Begünstigen geringere Filtergeschwindigkeiten den Phagenrückhalt?
- Kommt es zu einer Anreicherung der Phagen im FSW?
- Welche Unterschiede können zwischen verschiedenen Phagen gezeigt werden?

Der Rückhalt von MS2 betrug unabhängig von der Filtergeschwindigkeit weniger als eine \log_{10} -Stufe, der Rückhalt von Φ X174 betrug etwa eine \log_{10} -Stufe. Die Konzentration der Phagen im FSW war in derselben Größenordnung wie die Konzentration des Filterzulaufs. Die in den Filtern gebildeten Eisen- und Mangan-Oxide wiesen eine geringe Affinität zur Adsorption der Phagen auf. Somit kam es zu keiner Anreicherung der Phagen im FSW.

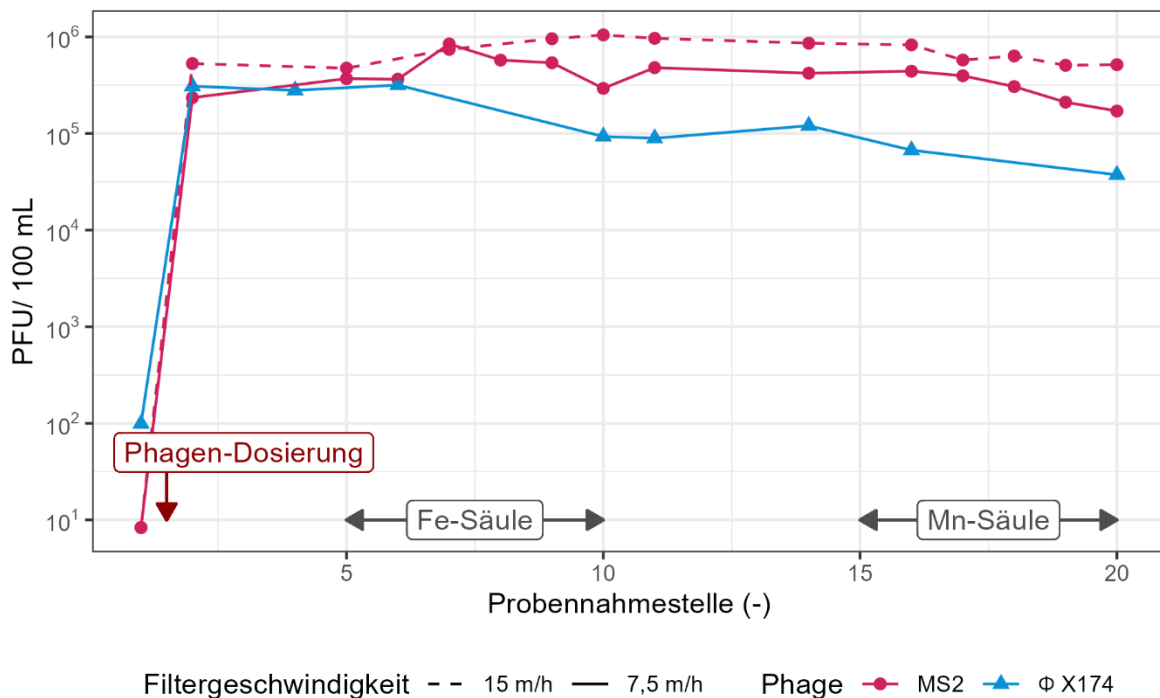


Abbildung 9: Verlauf der Phagen-Konzentrationen (als Plaque formende Einheiten, engl. „plaque forming units“ PFU) innerhalb der Pilotanlage.

Das FSW wurde mittels UF-Flachmembran (PES, MWCO = 150 kDa) aufbereitet. Es konnten keine MS2-Phagen in Filtrat nachgewiesen werden. Dies entspricht einer Entfernung durch die Membran von 2,3 bis 3,8 \log_{10} -Stufen. Φ X174 hingegen wurden in allen Filtratproben in einer Konzentration von $1,4 \cdot 10^2$ bis $3,5 \cdot 10^3$ PFU/100 mL nachgewiesen. Die Entfernung aus dem FSW betrug somit 1,4 bis 3 \log_{10} -Stufen. Eine Rückführung des Filtrats würde vor diesem Hintergrund zu keiner Verschlechterung der Trinkwasserqualität führen.

II.3 Ergebnisse AP 3: Qualität des rückgewonnenen Wassers und Wiederverwendbarkeit

II.3.1 AP 3.1: Rechtliche Situation und Rahmenbedingungen für die Wiederverwendung von Filtrat

Zur weiteren Verwertung soll das aufbereitete Spülwasser dem Rohwasserstrom zugeführt und wie Grundwasser aufbereitet werden. Bei dieser innerbetrieblichen Rückführung wird es nicht in ein Gewässer eingeleitet und unterliegt somit nicht dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG). Diese Form der Rückführung kann durchgeführt werden, soweit keine Verschlechterung der Trinkwasserqualität eintritt und die Anforderung der Trinkwasserverordnung eingehalten werden. Der beim Spülprozess anfallende Schlamm unterliegt abwasserrechtlichen Vorschriften. Eine direkte Einleitung des Schlammes bedarf einer Erlaubnis (§ 57 Abs. 1 WHG), eine indirekte Einleitung einer Genehmigung (§ 58 Abs. 1 WHG). Nach Ende der Entwässerung unterliegt der Schlamm abfallrechtlichen Vorschriften, und damit ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und dessen untergesetzliches Regelwerk einschlägig.

Zum Austausch mit den Gesundheitsämtern wurde im Februar 2024 ein Ergebnisvortrag bei der Fortbildungsveranstaltung für den öffentlichen Gesundheitsdienst, den Wasserhygienetagen am UBA in Bad Elster, gehalten. Zudem wurde ein Fachgespräch beim UBA-Wasserkurs im November 2024 in Ber-

lin durchgeführt. In beiden Veranstaltungen wurden Diskussionen mit Entscheidungsträger*innen geführt. Im DIN-DVGW-Arbeitsausschuss AA 14 (Aufbereitungsverfahren) wurde über die Ergebnisse und insbesondere die Relevanz für die Arbeitsblattreihe W221 zu den Rückständen der Wasseraufbereitung diskutiert. Aus Sicht des Arbeitsausschusses ist eine Überarbeitung der einschlägigen Norm W 221-4 nach dem Projekt notwendig. Insbesondere soll die Überarbeitung eine Desinfektion nach der Membranfiltration vor Rückführung einschließen, falls das FSW in offenen Behältern gelagert wird und somit eine mikrobielle Kontamination nicht ausgeschlossen werden kann.

Zur rechtlichen Einordnung befinden sich das FSW und das Filtrat bis zur Rückführung und Einmischung in den Rohwasserstrom im Geltungsbereich der Trinkwasserverordnung. Damit sind in diesem Abschnitt der Aufbereitung u.a. auch die Materialien in Kontakt mit Trinkwasser sowie die Aufbereitungsmittel und Desinfektionsverfahren nach § 20 einschlägig.

II.3.2 AP 3.2: Mikrobiologische Qualität des rückgewonnenen Wassers

In Abschnitt II.2.1.2 werden die Ergebnisse zum Verbleib von Bakteriophagen während der Grundwasseraufbereitung und anschließender Aufbereitung mittels UF-Flachmembran diskutiert. Außerdem werden Membranversuche mit dotiertem Fe-FSW in Abschnitt II.1.2.3 thematisiert. Bakteriophagen können als konservative Parameter angesehen werden. Auf weitere Versuche mit humanpathogenen Viren wurde daher verzichtet.

II.3.3 AP 3.3: Qualität des rückgewonnenen Wassers - Chemikalieneintrag

Mit den Pilot- und Laborversuchen wurde gezeigt, dass Säuren (Zitronensäure, Salzsäure) und Natriumhypochlorit die verwendeten Membranen in gutem Umfang reinigen können. Basierend auf diesen Ergebnissen und mit dem Ziel, den Chemikalieneinsatz zu minimieren, wurde auf den Einsatz anderer Reinigungschemikalien verzichtet. Die Überprüfung auf den Verbleib von Säuren und Basen kann durch die Kontrolle des pH-Wertes erfolgen, eine weitere Untersuchung mittels HPLC-MS/MS ist nicht notwendig.

II.3.4 AP 3.4: Logistische/prozesstechnische Voraussetzungen für die Wiederverwendung von Filtrat

Der Einfluss der Sedimentationszeit von FSW auf die Membranaufbereitung wurde in eigenen Versuchsreihen untersucht. Dafür wurde zunächst FSW aus beiden Filterstufen der Pilotanlage in Berlin-Marienfelde aufgefangen und für diverse Zeitintervalle sedimentiert. Wie zu erwarten war, nahm der Feststoffgehalt im Wasser mit steigender Sedimentationszeit ab, während gelöste Stoffe konstant blieben. Gelöstes Eisen konnte nicht nachgewiesen werden, festes Eisen in Form von Oxiden und Hydroxiden machte einen Großteil des Feststoffes der 1. Stufe (Fe-FSW) aus. Gelöstes Mangan konnte in allen Proben nachgewiesen werden und ist beim Membranbetrieb zu beachten, da es zum Membranscaling beitragen kann¹. Festes Mangan in Form von Oxiden wurde vorwiegend im Spülwasser der 2. Filterstufe (Mn-FSW) nachgewiesen (Abbildung 10).

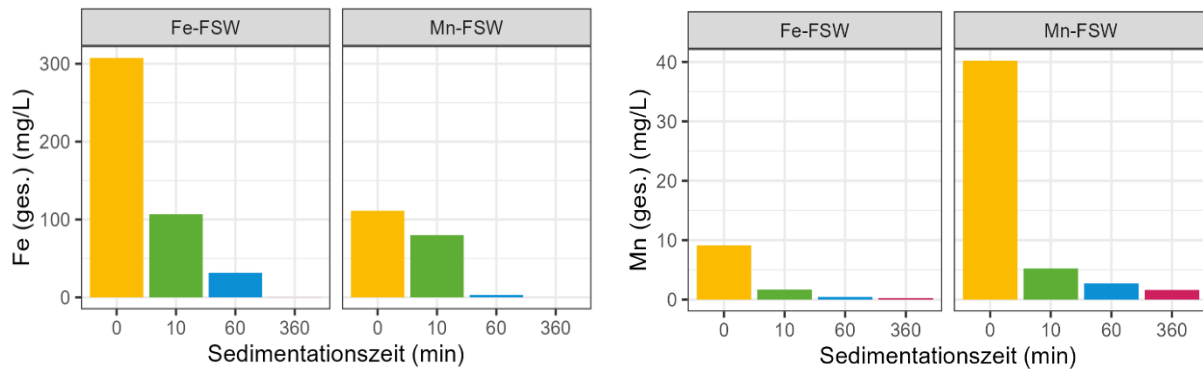


Abbildung 10: Eisen- und Mangankonzentrationen der Filterspülwasser der 1. (Fe-FSW) und 2. Filterstufe (Mn FSW) nach Sedimentation.

Zur Betrachtung des Einflusses der Sedimentationszeit auf die Membranaufbereitung wurde feststoffhaltiges Wasser nach unterschiedlich langer Sedimentationszeit über eine PES-Flachmembran filtriert und die Änderung des TMP bei konstantem Flux (160 LMH) betrachtet. Abbildung 10 zeigt die Zusammensetzung der genutzten Wässer zu Beginn des Versuches, Abbildung 11 zeigt den Verlauf des TMP.

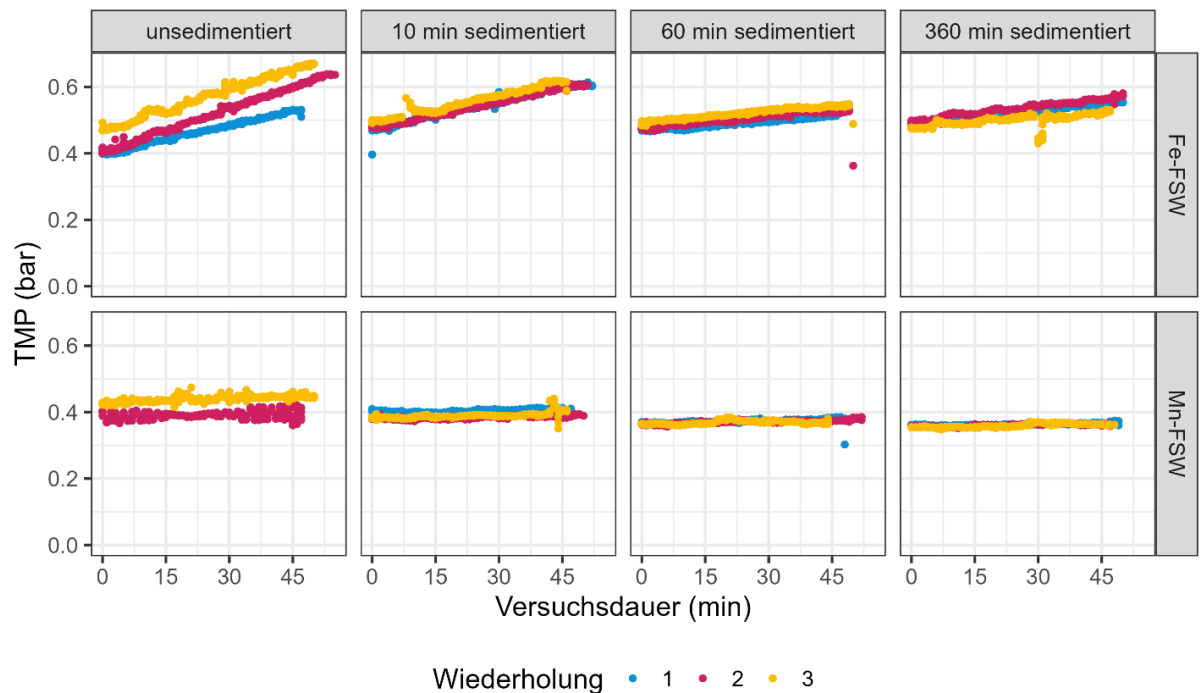


Abbildung 11: Verlauf des TMP in Abhängigkeit der Sedimentationszeit.

Versuche mit Fe-FSW zeigten einen deutlichen Anstieg des TMP über die Versuchszeit mit steigendem Feststoffgehalt. Dieser Zusammenhang wurde beim Mn-FSW nicht so deutlich, da es aufgrund fehlender Durchmischung zu weiterer Sedimentation im Vorlagebehälter kam. Die Mangandioxidpartikel haben eine höhere Dichte als die Eisenhydroxidpartikel und setzen sich schneller ab, weswegen kaum Unterschiede zwischen den Sedimentationszeiten zu sehen sind.

Im Gegensatz zu den hier gezeigten Ergebnissen, konnten bei der Behandlung mit Hohlfasermembranen im „dead-end“-Modus deutliche Unterschiede zwischen den zwei FSW beobachtet werden (Abbildung 5). Dabei zeigte sich, dass die Partikelkonzentration einen geringeren Einfluss auf den stabilen

Betrieb der Membranaufbereitung hatte als die Partikelzusammensetzung. Je nach Filterspülwasserzusammensetzung ist somit zu prüfen, ob eine Vorsedimentation oder Vorfiltration für einen stabilen Betrieb von Vorteil ist.

II.4 Ergebnisse AP 4: Qualität des Filterschlammes und Verwertbarkeit

II.4.1 AP 4.1: Rechtliche Situation und Wirtschaftlichkeit der Filterschlamm-Verwertung

Die rechtliche Bewertung zu Möglichkeiten der Schlammverwertung fand mit Expert*innen des Fachbereichs II des UBA statt. Das schlammhaltige FSW unterliegt solange den abwasserrechtlichen Vorschriften gemäß § 57 Abs. 1 WHG (Direkteinleitung) und § 58 Abs. 1 WHG (Indirekteinleitung) bis der Entwässerungsprozess abgeschlossen ist. Danach unterliegt der entwässerte Schlamm dem KrWG. In § 7 definiert das KrWG den Grundsatz: Verwertung vor Beseitigung vor Deponierung. Somit ist eine Vermarktung des Schlammes prinzipiell möglich. Beispiele für aktuelle Nutzung der Schlämme sind die Bindung von Schwefelwasserstoff in der Kanalisation oder in Biogasanlagen. Auch die Abgabe an Ziegeleien oder die Herstellung von Filtermaterialien sind Möglichkeiten der Verwertung. Weitere Möglichkeiten der Verwertung sind nicht ausgeschlossen und grundsätzlich im Sinne des KrWG. Für die Verwertung von Wasserwerksrückständen aus der Behandlung von eisen- und manganhaltigen Grundwässern gibt es eine Reihe von Möglichkeiten in Abwasseranlagen, gewerblicher Wirtschaft und umwelttechnischen Fragestellungen (W221-3). Für jede ist zu prüfen, ob die Rückstände geeignet sind oder gesondert entsorgt werden müssen. Ohne Belastung ist der Schlamm unter Abfallschlüssel 190901 kein gefährlicher Abfall.

II.4.2 AP 4.3: Qualität des Filterschlammes in Bezug auf mikrobiologische Eigenschaften

Filterschlamm, welcher bei der Behandlung von unbelastetem Grundwasser anfällt, enthält natürlicherweise Bakterien^{2,3}, die jedoch durch Behandlung mit Membranen und/oder Rückführung vor den Filter entfernt werden können und somit kein Problem für die Wiederverwendung darstellen^{4,5}. Zudem sind nur dann SM im Schlamm zu erwarten, wenn eine Belastung des Grundwassers besteht. Daher wurde FSW, das nach Zusatz von Bakteriophagen oder SM aus der Pilotanlage gewonnen wurde, betrachtet.

In den Versuchen zur Entfernung von Bakteriophagen wurde nur eine geringe Entfernung während der Grundwasseraufbereitung festgestellt. Die Konzentration in der Flüssigphase entsprach etwa der Konzentration im Zulauf. Somit ist keine Aufkonzentrierung im Filterschlamm zu erwarten und auf aufwendige Analysen wurde daher verzichtet.

Zur Bestimmung der SM-Konzentrationen in den Feststoffen des FSW wurden Königswasseraufschlüsse durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Aufschlüssen werden als „tatsächliche Beladung“ in Tabelle 4 gelistet. Dem gegenüber wurde die „erwartete Beladung“ mithilfe von Massenbilanzen der Zugaugen und Entfernungen im Eisenfilter und Manganfilter der Pilotanlage berechnet. Dabei wurde angenommen, dass die Feststoffe im FSW ausschließlich aus $\text{Fe}(\text{OH})_3$ und MnO_2 bestanden, welche aus dem entfernten Fe und Mn gebildet wurden. Aus dem Quotienten der „tatsächlichen Beladung“ und der „erwarteten Beladung“ wurde die Wiederfindung berechnet.

In den meisten Fällen ist die Wiederfindung sehr gering (< 10 %), was an einer unzureichenden Extraktion der Schwermetalle aus dem Schlamm liegen könnte. Für die Cu-Wiederfindung in Fe-FSW wurde ein negativer Wert ermittelt, da die Konzentration innerhalb der ersten Säule zunahm und somit keine Entfernung ermittelt wurde, jedoch im Schlamm Cu nachgewiesen werden konnte. Dies lässt annehmen, dass Cu bereits vor der ersten Messtelle mit Fe interagiert hat und nicht in gelöster Form vorlag, jedoch mit dem Feststoff in Kontakt war. Für Blei hingegen wurde eine Wiederfindung über 100% ermittelt, da die im Schlamm nachgewiesene Menge höher war als die berechnete Beladung.

Tabelle 4: Gegenüberstellung empirisch ermittelter Beladungen und aus Entfernungswerten berechneter Beladungen

	As	Cd	Cu	Ni	Pb
Erwartete Beladung Fe-FSW (mg/g)	4,8	3,7	< 0	2,3	3,4
Tatsächliche Beladung Fe-FSW (mg/g)	0,8	0,3	4,3	0,1	5,3
Wiederfindung (%)	16	9	< 0	3	> 100
Erwartete Beladung Mn-FSW (mg/g)	111	120	90	122	99
Tatsächliche Beladung Mn-FSW (mg/g)	0,7	0,4	1,7	0,3	3,8
Wiederfindung (%)	0,7	0,3	2	0,2	4

Die Wiederfindung im Mn-FSW ist durchweg geringer, außer im Fall von Cu, der hier gesondert zu betrachten ist. Aus Vorversuchen ist hervorgegangen, dass sich die Feststoffe des Mn-FSW deutlich schlechter in Säure lösen als die Feststoffe des Fe-FSW. Es ist davon auszugehen, dass der Königswasseraufschluss für die komplette Analyse des Mn-FSW unzureichend war und die Beladung höher war als empirisch bestimmt.

II.5 Ergebnisverwertung

II.5.1 AP 5.1: Ergebnisverwertung für die Fachöffentlichkeit

Projektergebnisse wurden beim DIN-DVGW-Normungsgremium „Aufbereitungsverfahren“ diskutiert. Der Normungsausschuss verantwortet u.a. die Normungsreihe der DVGW-Arbeitsblätter W 221, die den Umgang mit Rückständen und Nebenprodukten aus Wasseraufbereitungsanlagen regelt. In einer außerplanmäßigen Zusammenkunft u.a. mit den Obleuten der DIN-DVGW-Normungsgremien Aufbereitungsverfahren, Desinfektionsverfahren und Aufbereitungsstoffe und -anlagen sowie weiteren Expert*innen wurde beschlossen, dass nach Beendigung des Projektes die Überarbeitung des Arbeitsblatts W 221-4 erfolgen soll. Hierbei wurde im Projekt insbesondere die hygienisch sichere Rückführung von FSW in das Rohwasser von Filteranlagen als überarbeitungsbedürftig identifiziert. Offene Schlammabsetzbecken, die nicht vor mikrobiellen Kontaminationen geschützt sind, sollten in Zukunft im Sinne des Multi-Barrieren-Ansatzes mit einer zusätzlichen Desinfektion versehen sein.

Die Notwendigkeit der Überarbeitung des Arbeitsblatt W 221-4 wurde bei den beiden WaBoLu-Veranstaltungen, die sich an den öffentlichen Gesundheitsdienst richten, bekräftigt.

Im DIN-DVGW-Normungsausschuss „Aufbereitungsstoffe und -anlagen“ wurde in den letzten Jahren vermehrt über die Regelung von Eisenflockungsmitteln im Zuge von Verfügbarkeitsengpässen und ggf. Qualitätsverschlechterungen der Produkte diskutiert. In diesem Zusammenhang wurde im übergeordneten CEN-Gremium „Technical Committee 164“ mithilfe der Projektergebnisse klargestellt, dass die Adsorption von Schwermetallen an Eisenoberflächen von den jeweiligen Schwermetallen selbst abhängen und dass je nach Schwermetall das Potential besteht, dass diese beim Einsatz von Aufbereitungsstoffen ins Trinkwasser übergehen können. Die Qualitäten der Eisenprodukte konnten auf unverändert hohen Niveaus gehalten werden.

II.5.2 AP 5.2: Ergebnisverwertung in Form von Publikationen/Patenten

Erste Ergebnisse wurden auf der 13. IWA-Konferenz für Wasserwiederverwendung („International Conference on Water Reclamation and Reuse“) sowie der Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft („Wasser 2023“) als Posterbeitrag vorgestellt. Zusätzlich erfolgte eine Präsentation neuer Ergebnisse auf der Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft („Wasser 2024“) und eine weitere

Präsentation bei den Wasserhygienetagen des WaBoLu-Vereins im Februar 2024. Im November 2024 fand ein Fachgespräch zur hygienisch sicheren Rückführung beim WaBoLu-Wasserkurs in Berlin statt.

Ergebnisse zur Aufbereitung von Selen enthaltendem Wasser wurden unter dem Titel „Can Selenium Be Removed in a Pilot Plant for Biological Iron and Manganese Removal?“ in der Fachzeitschrift Water veröffentlicht. Manuskripte zur Veröffentlichung der Ergebnisse zum Schwermetall- und Phagenverbleib während der Trinkwasseraufbereitung und Spülwasserrückgewinnung sowie zum Einfluss von Hintergrundmatrix und Membranmaterial auf den Phagenrückhalt sind in Arbeit.

II.6 Ergebnisse AP 6: Projektkoordination, Datenaustausch, Projekttreffen, Berichte

II.6.1 AP 6.1: Projektkoordination, Partnerabsprachen, Projekttreffen, Berichte

Projekttreffen wurden halbjährlich an wechselnden Standorten durchgeführt, sodass die Möglichkeit zum persönlichen Austausch und der Begehung der Projektstandorte realisiert wurde. Zusätzlich wurden regelmäßige Online-Termine zum Austausch organisiert.

III. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt separat.

IV. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Projektbearbeitung und experimentelle Arbeiten, inklusive Planung, Durchführung, Auswertung und Veröffentlichung der Versuche, wurde von einer im Projekt eingestellten wissenschaftlichen Mitarbeiterin durchgeführt. Ebenfalls war die Fachgebietsleitung und ein wissenschaftlicher Mitarbeiter des UBA in die Projektarbeit eingebunden. Diese beiden Stellen sind in ihrer regulären Arbeit am UBA in zahlreiche Fach- und Normungsgremien mit teils leitender Funktion eingebunden, so dass die Projektergebnisse dort zielgerichtet eingebracht und diskutiert werden konnten. Am UBA standen bereits ein halbtechnisches zweistufiges Wasserwerk (Pilotanlage) und eine halbtechnische Membrananlage im Labormaßstab, die im Projekt für die Durchführung der Experimente eingesetzt wurden, zur Verfügung. Die Projektarbeiten am UBA hatten insbesondere die hygienische Sicherheit der Rückführung des aufbereiteten Filterspülwassers im Fokus. Insbesondere das Potential der Trinkwasserverschlechterung durch Schwermetalle und Krankheitserreger wie Viren war hierbei von entscheidender Bedeutung.

V. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das UBA als obere Bundesbehörde ist in seiner Forschungsaktivität unabhängig und verfolgt keine kommerziellen Interessen bei der Verwertung von Projektergebnissen. Das UBA berät die Bundesregierung bei tagesaktuellen wissenschaftlichen Fragestellungen und bei gesetzgeberischen Verfahren. Die Abteilung „Trinkwasser- und Badebeckenwasserhygiene“ berät insbesondere das Bundesgesundheitsministerium bei hygienischen Fragestellungen im Bereich Trinkwasser. Für den Kompetenzaufbau und zur Beantwortung tagesaktueller Fragen zur Hygiene im Trinkwasser ist die Durchführung von Forschung unabdingbar. Zusätzlich dienen die Forschungsprojekte zur Ausbildung wissenschaftlichen Nachwuchses, ebenfalls eine Aufgabe des UBA. Im Projekt FITWAS war eine wissenschaftliche Mitarbeiterin angestellt, die im Rahmen des Projektes ihre Promotion anstrebt. Darüber hinaus wurden eine Bachelor- und zwei Masterarbeiten im Projekt angefertigt und vier studienrelevante Praktika durchgeführt. Die Projektergebnisse wurden bei der Fachtagung der Wasserchemischen Gesellschaft per Poster und Vortrag und bei der internationalen „Conference on Water Reclamation and Reuse“ in Chennai, Indien präsentiert.

Das UBA setzt sich in zahlreichen Gremien für den Verbraucherschutz und eine gute Trinkwasserhygiene ein. Die Projektergebnisse wurden u.a. im DIN-DVGW-Normungsgremium „Aufbereitungsverfahren“ diskutiert. Diesem Gremium arbeitet der Projektkreis Reststoffmanagement zu, der die Arbeitsblattreihe W221 erarbeitet. Aus Sicht des UBA und des Arbeitsausschusses ist eine Überarbeitung der einschlägigen Norm W 221-4 nach dem Projekt notwendig. Insbesondere soll die Überarbeitung eine Desinfektion nach der Membranfiltration vor Rückführung einschließen, falls das FSW in offenen Behältern gelagert wird und eine mikrobielle Kontamination nicht ausgeschlossen werden kann. Aus Sicht des UBA gibt es einen Widerspruch im Regelwerk, weil das W221-4 keine Desinfektion von aufbereitetem Spülwasser, das in offenen Becken gelagert wurde, in das Rohwasser vorsieht, aber das Arbeitsblatt W290 („Trinkwasserdesinfektion“) klar regelt, dass Oberflächenwasser bei der Aufbereitung immer desinfiziert werden muss. Durch die Lagerung von Filterspülwasser in offenen Becken handelt es sich nach Auffassung des UBA um eine Form von Oberflächenwasser, und daher ist das Arbeitsblatt W290 einschlägig. Ultrafiltration stellt nach der Liste der Aufbereitungsstoffe und Desinfektionsverfahren nach § 20 TrinkwV (§-20-Liste) kein Desinfektionsverfahren dar. Beispielsweise bietet sich beim trübstofffreien Ultrafiltrationsfiltrat eine Desinfektion mit UV-Bestrahlung an.

Die Beteiligung des öffentlichen Gesundheitsdienstes wurde über die Durchführung eines Fachgespräches beim UBA-Wasserkurs im November 2024 in Berlin zum Thema Ultrafiltration und Spülwasserrückführung realisiert. Bei den Wasserhygienetagen im Februar 2024 wurden die Projektergebnisse vor dem Adressatenkreis des öffentlichen Gesundheitsdienstes präsentiert.

VI. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem UBA sind keine weiteren Aktivitäten in Bezug auf Rückführung von Filterspülwasser in das Rohwasser bekannt.

VII. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

VII.1 Begutachtete Publikationen

Steuer, A. et al. (2023) Can Selenium Be Removed in a Pilot Plant for Biological Iron and Manganese Removal?, *Water*, 15(17), p. 3147. Available at: <https://doi.org/10.3390/w15173147>.

VII.2 Nicht begutachtete Publikationen

VII.3 Vorträge auf wissenschaftlichen Tagungen

Ist die Entfernung von Selen(VI) in einer Pilotanlage zur Aufbereitung von eisen- und manganhaltigem Grundwasser möglich? (Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft. 6.-8. Mai 2024, Limburg a. d. Lahn)

Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung zur Sicherung der Trinkwasserversorgung (32. Wasserhygienetage 7.-9. Februar 2024, Bad Elster)

Fachgespräch: Einsatz von Ultrafiltration in der Trinkwasserinstallation (und weitere Einsatzbereiche) (WaBoLu-Wasserkurs. 6-8. November 2024, Berlin)

VII.4 Poster-Publikationen auf wissenschaftlichen Tagungen

Reuse of Filter backwash Water using Polymeric Ultrafiltration Membranes (International Conference on Water Reclamation and Reuse. Chennai, 15.-19. Januar 2023, Indien)

Rückgewinnung von Filterspülwasser – Verhalten von Arsen und MS2-Phagen (Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft. 15.-17. Mai 2023, Augsburg)

VII.5 Geplante Veröffentlichungen

Removal of Bacteriophages during Groundwater Treatment and Filterbackwash Reclamation.

Fate of Heavy Metals during Groundwater Treatment (Arbeitstitel)

Fate of Heavy Metal during Filterbackwash Water Reclamation (Arbeitstitel)

VIII. Anhang

VIII.1 Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Substanzen
As	Arsen
Ca	Cadmium
Cu	Kupfer
DOC	<i>dissolved organic carbon</i> (gelöster organischer Kohlenstoff)
DVGW	Deutscher Verein für das Gas- und Wasserfach
Fe	Eisen
FSW	Filterspülwasser
HPLC-MS/MS	<i>high performance liquid chromatography with coupled tandem mass spectrometry</i> (Hochleistungsflüssigchromatografie gekoppelt mit Tandem-Massenspektrometern)
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
Mn	Mangan
MWCO	<i>Molecular weight cut-off</i> (Molekulargewichtsgrenze)
Ni	Nickel
Pb	Blei
PES	Polyethersulfon
PFU	<i>plaque forming units</i> (plaquebildende Einheiten)
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SiC	Siliciumcarbid
SM	Schwermetall
TMP	<i>transmembrane pressure</i> (Transmembrandruck)
TOC	<i>total organic carbon</i> (gesamter organischer Kohlenstoff)
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
TUHH	Technische Universität Hamburg-Harburg
UBA	Umweltbundesamt
UF	Ultrafiltration
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

VIII.2 Literaturverzeichnis

- (1) Choo, K.; Lee, H.; Choi, S. Iron and Manganese Removal and Membrane Fouling during UF in Conjunction with Prechlorination for Drinking Water Treatment. *Journal of Membrane Science* **2005**, 267 (1–2), 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.05.021>.
- (2) Arendze, S.; Sibiya, M. Filter Backwash Water Treatment Options. *Journal of Water Reuse and Desalination* **2013**, 4 (2), 85–91. <https://doi.org/10.2166/wrd.2013.131>.
- (3) Arora, H.; Di Giovanni, G.; Lechevallier, M. SPENT Filter Backwash Water CONTAMINANTS AND TREATMENT STRATEGIES. *Journal AWWA* **2001**, 93 (5), 100–112. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2001.tb09211.x>.
- (4) Mahdavi, M.; Amin, M. M.; Mahvi, A. H.; Pourzamani, H.; Ebrahimi, A. Metals, Heavy Metals and Microorganism Removal from Spent Filter Backwash Water by Hybrid Coagulation-UF Processes. *Journal of Water Reuse and Desalination* **2017**, 8 (2), 225–233. <https://doi.org/10.2166/wrd.2017.148>.
- (5) Reissmann, F. G.; Uhl, W. Ultrafiltration for the Reuse of Spent Filter Backwash Water from Drinking Water Treatment. *Desalination* **2006**, 198 (1), 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.517>.

VIII.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verfahrensfließbild (links) und Foto (rechts) der Pilotanlage.....	5
Abbildung 2: Verlauf der AFS-Konzentration über die Spüldauer der (I) Eisen- und (II) Mangansäule.....	6
Abbildung 3: Verlauf des (I) Transmembrandrucks (TMP) und des (II) Fluxes während der Aufbereitung von durchmischtem und sedimentiertem FSW. Der Ziel-Flux von 60 L/m ² /h ist als rote Linie eingezeichnet (II).	7
Abbildung 4: Verlauf des TMP bei der Aufbereitung von eisenhaltigem FSW mittels Hohlfasermembran in Abhängigkeit von der Sedimentationszeit.	8
Abbildung 5: TMP-Verlauf bei der Aufbereitung von FSW aus der 1. Filterstufe (links) und der 2. Filterstufe (rechts) mittels Hohlfasermembran.	9
Abbildung 6: Mittlerer Konzentrationsverlauf verschiedener Schwermetalle in der Pilotanlage über 48 h (n = 3, Fehlerbalken = Standardabweichung).	11
Abbildung 7: Freisetzung von Schwermetallen aus Filterschlamm in Abhängigkeit des pH-Wertes.	12
Abbildung 8 Entfernung von Se als Se(VI) und Se(IV) in der Pilotanlage.	13
Abbildung 9: Verlauf der Phagen-Konzentrationen (als Plaque formende Einheiten, engl. „plaque forming units“ PFU) innerhalb der Pilotanlage.	14
Abbildung 10: Eisen- und Mangankonzentrationen der Filterspülwasser der 1. (Fe-FSW) und 2. Filterstufe (Mn FSW) nach Sedimentation..	16
Abbildung 11: Verlauf des TMP in Abhängigkeit der Sedimentationszeit.	16

VIII.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakterisierung der FSW aus der biologischen Enteisenung und Entmanganung (Pilotanlage). Berechnungen ergeben sich aus allen aufgenommenen Messdaten exklusive Ausreißer	6
Tabelle 2: Vergleich der verwendeten Polymermembranen für die Untersuchung des Phagenrückhaltes	10
Tabelle 3: Aufteilung der Schwermetalle auf die Fest- und Flüssigphase des FSW.	11
Tabelle 4: Gegenüberstellung empirisch ermittelter Beladungen und aus Entfernungswerten berechneter Beladungen	18