

PFC-Entfernung bei der Grundwassersanierung

—

Regeneration und Wiederbeladung eines Ionenaustauschers

Auftraggeber: Landratsamt Sigmaringen

Auftragnehmer: TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser

erstellt von: Dr.-Ing. Marcel Riegel
Dr. Frank Sacher

Karlsruhe, Januar 2018

Inhaltsverzeichnis

1	VERANLASSUNG	3
2	REGENERATION PFC-BELADENER IONENAUSTAUSCHER	3
3	VERSUCHE ZUR WIEDERBELADUNG DER REGENERIERTEN ANIONENAUSTAUSCHER.....	10
4	SCHLUSSFOLGERUNGEN	17
5	LITERATUR	18

1 Veranlassung

Ergänzend zu Laborversuchen zur Auswahl geeigneter Sorptionsmaterialien zur PFC-Entfernung aus dem Grundwasser in Herbertingen, deren Ergebnisse in dem Bericht „Modellvorhaben Herbertingen – Laborversuche zur Auswahl geeigneter Sorptionsmaterialien zur PFC-Entfernung aus Wässern aus dem Raum Rastatt / Baden-Baden mit wissenschaftlicher Bewertung“ vom November 2017 vorgestellt wurden, sind vom Landratsamt Sigmaringen zusätzliche Experimente beauftragt worden, mit denen die Regeneration eines mit PFC beladenen Ionenaustauschers sowie die PFC-Beladung bei einem erneuten Einsatz dieses regenerierten Adsorbers untersucht wurden. Die Versuchsergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

2 Regeneration PFC-beladener Ionenaustauscher

Aus verschiedenen Veröffentlichungen [1 – 3] sowie aus eigenen Untersuchungen des TZW [4, 5] ist bekannt, dass sich mit PFC beladene Anionenaustauscher mit standardmäßig eingesetzten Regenerationsmitteln wie Natronlauge, Salzsäure oder Natriumchlorid-Lösung nicht ausreichend regenerieren lassen. Speziell länger-kettige PFC wie PFOS (Perfluor-octansulfonat) oder PFOA (Perfluor-octanoat) verbleiben bei einer Regeneration mit diesen Regenerationsmitteln nahezu vollständig auf dem Ionenaustauscher. Kürzer-kettige PFC wie bspw. PFBA (Perfluor-butanoat) hingegen können mit diesen Standardregenerationsmitteln besser eluiert werden.

Wie weitere Versuche gezeigt haben, werden durch den kombinierten Einsatz eines Regenerationsmittels und eines organischen Lösungsmittels bei der Regeneration die PFC deutlich besser von den Ionenaustauschern eluiert [2, 6]. Zudem ist bekannt, dass die Konzentration des organischen Lösungsmittels einen Einfluss auf die Effektivität der Regeneration hat [5, 6].

In einer ersten Versuchsreihe wurde daher untersucht, inwieweit durch eine Konzentrations-erhöhung des organischen Lösungsmittels eine weitergehende Steigerung der regenerierten PFC-Mengen erreicht werden kann. Als organisches Lösungsmittel wurde Ethanol verwendet, da es eine vergleichsweise geringe Toxizität aufweist.

Für die Versuche wurde der stark basische Anionenaustauscher Lewatit K6362 verwendet, der durch einen Säulenversuch im Labormaßstab mit Grundwasser aus Herberlingen beaufschlagt und somit mit verschiedenen PFC beladen wurde. Von diesem Ionenaustauscher wurden jeweils eine Masse von 0,9 g mit 20 mL Regenerationslösung für 16 Stunden in Kontakt gebracht und anschließend die PFC in der flüssigen Phase analytisch bestimmt. Die Regenerationslösungen bestanden aus jeweils 5 % Natriumchlorid (NaCl) in Wasser sowie unterschiedlichen Konzentrationen an Ethanol als organisches Lösemittel, welche zwischen 40 % und 80 % variiert wurden.

Bei der Analytik der Lösungen hinsichtlich der vorhandenen Organofluorverbindungen wurden die Konzentrationen der 20 in Tabelle 1 aufgeführten per- und polyfluorierten Verbindungen (PFC), mit jeweils einer Bestimmungsgrenze von 0,001 µg/L ermittelt. Ferner wurde teilweise der Gruppenparameter AOF (adsorbierbares organisches Fluor) bestimmt, der den Gesamtgehalt an organischen Fluorverbindungen in einer Probe charakterisiert.

Die in den Regeneraten nachgewiesenen Summen aller Konzentrationen an PFC sowie der AOF sind in Abbildung 1 aufgeführt. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass bei einer Steigerung der Konzentration an Ethanol von 40 % auf 60 % und bei einer weiteren Steigerung auf 80 % vermehrt PFC von dem Ionenaustauscher eluiert werden. Beim kombinierten Einsatz von 80 % Ethanol und 5 % NaCl wurde in der Lösung eine Summenkonzentration an PFC von 860 µg/L ermittelt. Bezogen auf die Versuchsbedingungen (0,9 g Ionenaustauscher, 20 mL Lösung) werden von 1 g Ionenaustauscher somit insgesamt 19 µg PFC eluiert.

Tabelle 1: Umfang der PFC-Einzelstoffanalytik

Untersuchter Parameterumfang	
Perfluorbutanoat (PFBA)	Perfluorpentansulfonat (PFPeS)
Perfluorpentanoat (PFPA)	Perfluorhexansulfonat (PFHxS)
Perfluorhexanoat (PFHxA)	Perfluorheptansulfonat (PFHpS)
Perfluorheptanoat (PFHpA)	Perfluoroctansulfonat (PFOS)
Perfluoroctanoat (PFOA)	Perfluordecansulfonat (PFDS)
Perfluornonanoat (PFNA)	Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)
Perfluordecanoat (PFDA)	7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)
Perfluorundecanoat (PFUnA)	2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)
Perfluordodecanoat (PFDoA)	2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat (H4PFOS)

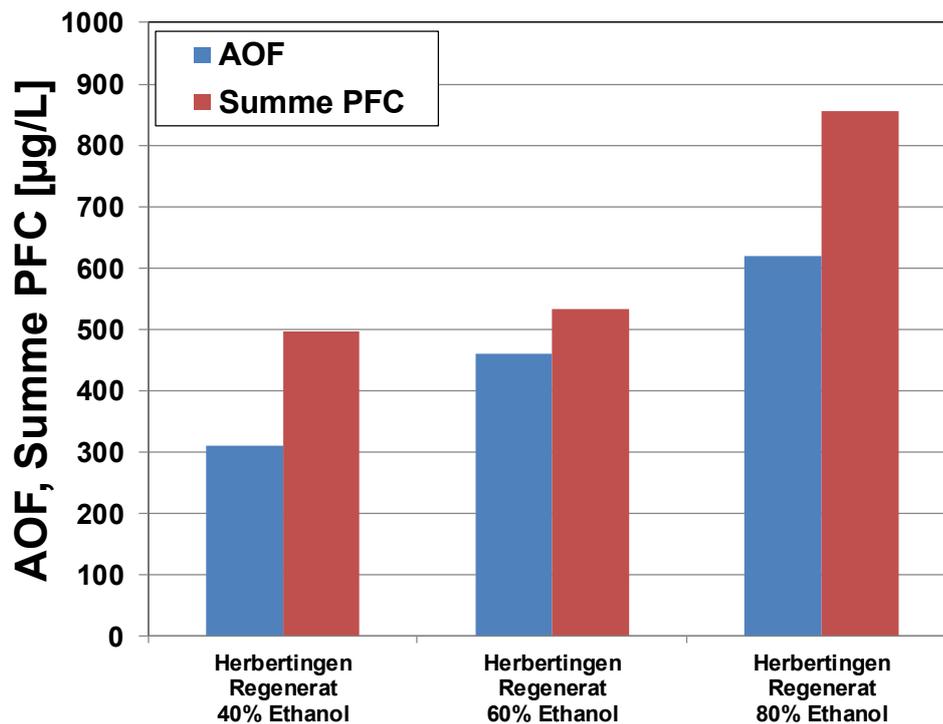


Abbildung 1: PFC im Regenerat bei verschiedenen Ethanolkonzentrationen

Generell können durch den Parameter AOF auch solche Fluorverbindungen nachgewiesen werden, die durch die Einzelstoffanalyse nicht detektiert werden. Beispielsweise liegen in technischen Produkten oft Wirkstoffe, aber teilweise auch fluorierte Zwischen- und Nebenprodukte vor, die durch die Einzelstoffanalytik nicht erfasst werden können. In Abbildung 1 sind die Werte für die aufsummierten PFC-Konzentrationen höher als die entsprechenden Werte für den AOF. Der aus den PFC-Einzelsubstanzen berechnete Anteil an Fluor ist dem Parameter AOF in Abbildung 2 gegenübergestellt. Bei der Verwendung von 40 % Ethanol in der Regenerierlösung werden in dem Regenerat über den Parameter AOF und über die Analysen der Einzelsubstanzen identische Konzentrationen an Fluor von ca. 300 µg/L erhalten. Die durch die Einzelstoffanalytik detektierten Substanzen stellen demnach nahezu alle in der Lösung vorhandenen Organofluorverbindungen dar. Bei der Nutzung von 60 % und 80 % Ethanol werden durch den AOF hingegen größere Fluorgehalte bestimmt als durch die Einzelstoffanalytik. Es ist daher davon auszugehen, dass bei der Regeneration mit höheren Ethanolkonzentrationen auch Organofluorverbindungen von dem Austauscher eluiert werden, die durch die Einzelstoffanalytik nicht erfasst werden.

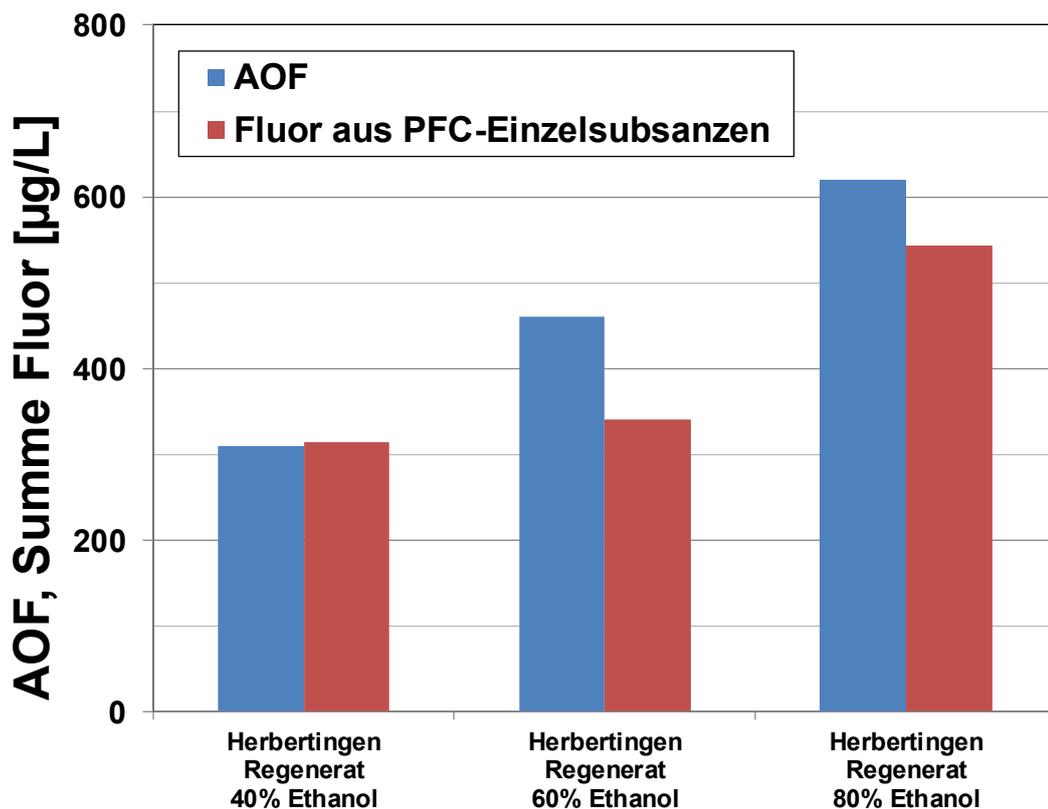


Abbildung 2: Fluorbilanz in den Regeneraten

Bei der Betrachtung der prozentualen Anteile der einzelnen PFC an der Zusammensetzung der Regenerate und des Grundwassers aus Herbertingen (Wasser aus Grundwassermessstelle 2 – GWM 2), wie dies in Abbildung 3 dargestellt ist, wird ersichtlich, dass bei der Verwendung von 80 % Ethanol das Regenerat eine mehr oder weniger identische Zusammensetzung hinsichtlich der PFC-Einzelsubstanzen aufweist wie das Ausgangswasser. Bei der Nutzung von nur 40 % Ethanol liegt im Regenerat prozentual weniger PFOS vor als im Grundwasser Herbertingen, was darauf schließen lässt, dass bei dieser Regeneration noch PFOS auf dem Austauscher verblieben ist.

Aufgrund der Ergebnisse wurden im weiteren Verlauf der Untersuchungen für die Regeneration ein Gemisch aus 80 % Ethanol und 20 % Wasser mit 5 % Natriumchlorid (bezogen auf die gesamte Lösung) verwendet, um eine vollständige Regeneration zu erreichen.

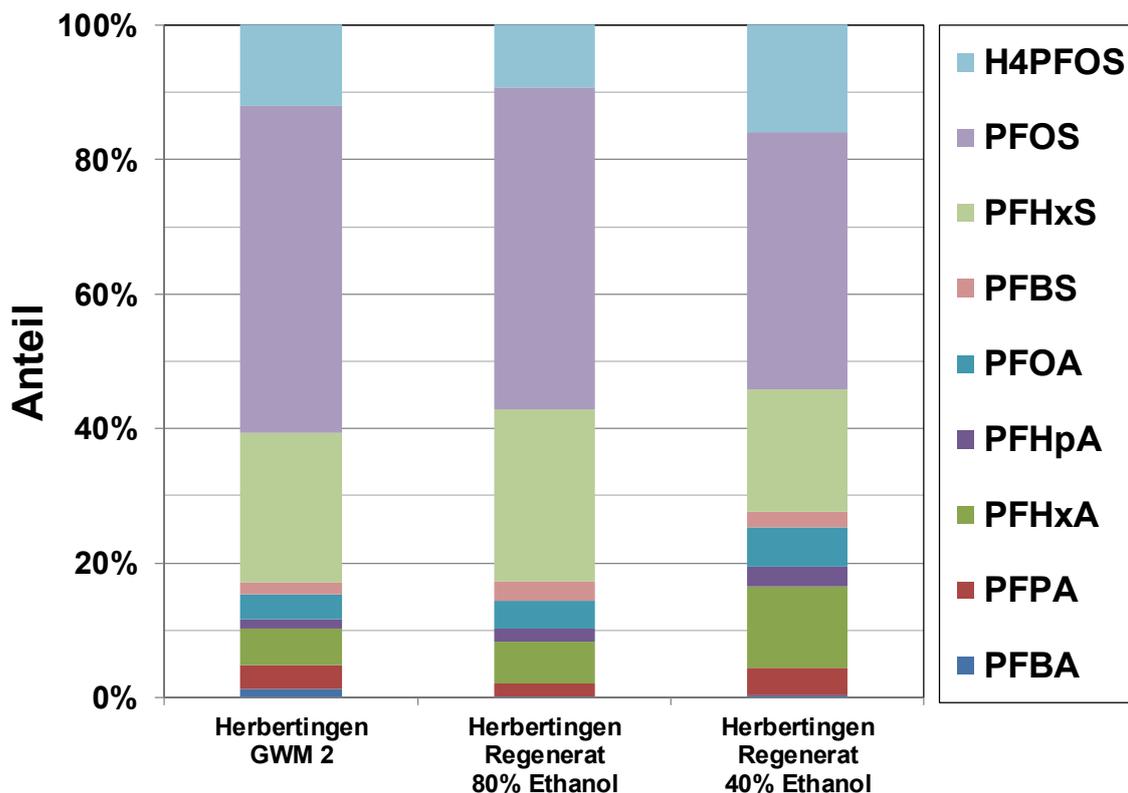


Abbildung 3: Prozentuale PFC-Zusammensetzung der Regenerate und des Grundwassers Herbertingen

Im Anschluss an die beschriebenen Experimente wurden Ionenaustauscherproben vom Typ Lewatit K6362 regeneriert, die im Rahmen von Laborsäulenversuchen mit verschiedenen PFC-haltigen Wässern beladen wurden. Die Versuchsdurchführung erfolgte analog zu der oben beschriebenen Prozedur. Die im Regenerat ermittelten aufsummierten PFC-Konzentrationen sowie die AOF-Gehalte sind in Abbildung 4 gezeigt. Während vom Ionenaustauscher, der mit dem Umkehrosiose-Konzentrat aus Förch beaufschlagt wurde, deutlich weniger PFC eluiert werden, befinden sich in den Regeneraten der Austauschere, die mit PFC-haltigem Grundwasser aus Sandweier bzw. aus Sinzheim beaufschlagt wurden, vergleichbare Gehalte an PFC. Die niedrigen PFC-Gehalte im Regenerat nach der Beaufschlagung des Konzentrat aus Förch sind sowohl durch die kurze Laufzeit des Ionenaustauschers beim Säulenversuch als auch durch die vergleichsweise niedrigen PFC-Konzentrationen in der Ausgangslösung bedingt (siehe hierzu auch Abbildung 1 und Tabelle 4 im TZW-Bericht „Modellvorhaben Herbertingen – Laborversuche zur Auswahl geeigneter Sorptionsmaterialien zur PFC-Entfernung aus Wässern aus dem Raum Rastatt / Baden-Baden mit wissenschaftlicher Bewertung“).

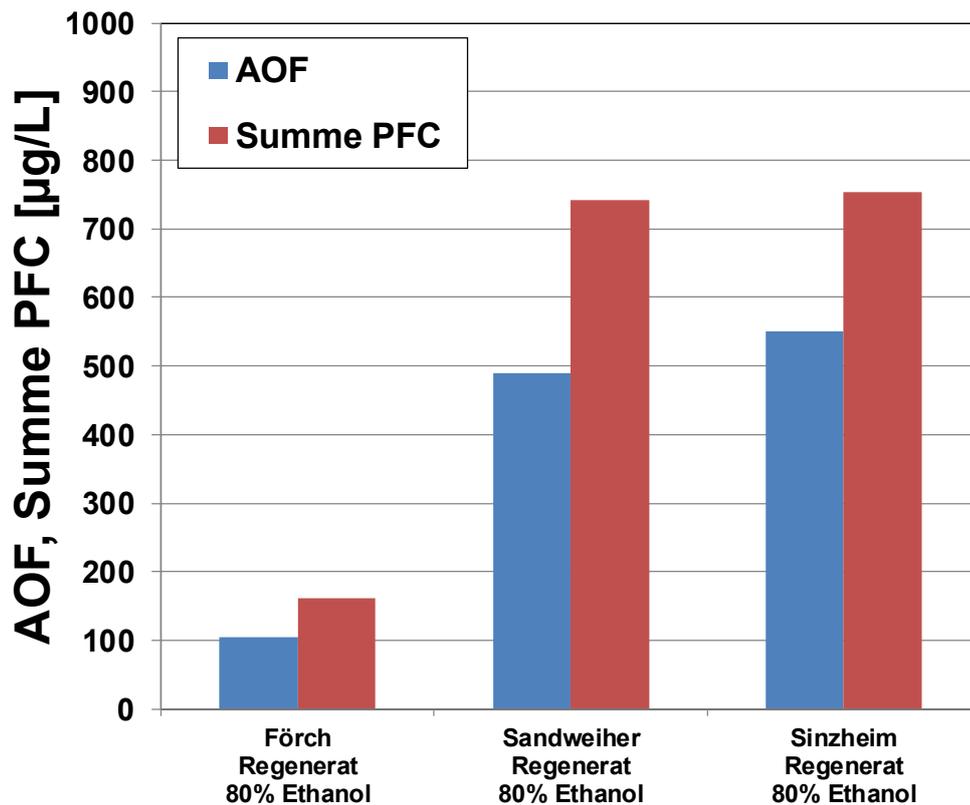


Abbildung 4: PFC-Gehalte im Regenerat nach der Nutzung verschiedener Rohwässer

Der Vergleich der ermittelten Fluorgehalte durch den Gruppenparameter AOF und durch die PFC-Einzelstoffanalytik ist in Abbildung 5 dargestellt. Nach der Regeneration der Ionenaustauscher, die mit Konzentrat aus Förch bzw. mit Grundwasser aus Sandweiher beaufschlagt wurden, wird durch beide Analysemethoden ein vergleichbarer Fluorgehalt ermittelt. Die regenerierten Organofluorsubstanzen stellen somit im Wesentlichen diejenigen dar, die über die Einzelstoffanalytik ermittelt wurden. Im Fall des Einsatzes von Grundwasser aus Sinzheim werden bei der Regeneration noch Substanzen von dem Austauscher eluiert, die über den AOF detektiert werden und nicht durch die Einzelstoffanalytik erfasst werden.

Da das Regenerat der Austauscherprobe, die mit Grundwasser aus Sinzheim beaufschlagt wurde, die vergleichsweise höchsten PFC-Gehalte aufweist, wurde dieser regenerierte Austauscher für die erneute Wiederbeladung mit PFC verwendet.

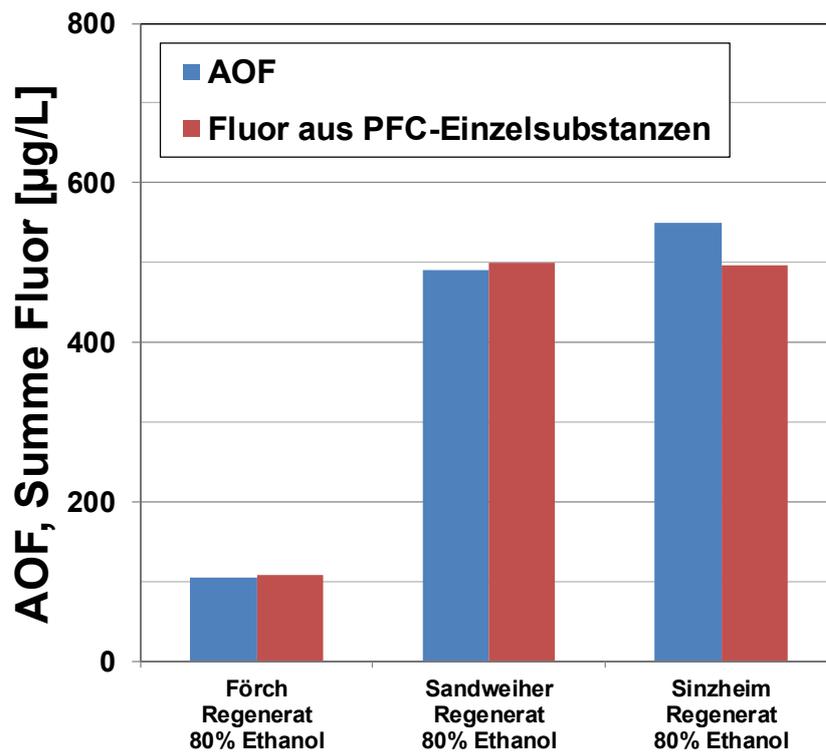


Abbildung 5: Fluorbilanz in den Regeneraten nach der Nutzung verschiedener Rohwässer

3 Versuche zur Wiederbeladung der regenerierten Anionenaustauscher

Für die Untersuchung der Möglichkeit einer erneuten Beladung wurde für den verwendeten Ionenaustauscher Grundwasser aus Sinzheim aus dem Löschwasserbrunnen „Maier“ genutzt. Der Versuch wurde analog zu den Laborsäulenversuchen aus dem TZW-Bericht vom November 2017 durchgeführt. Das Grundwasser wurde direkt (ohne Sandfiltration) über den regenerierten Ionenaustauscher geleitet. Das Volumen des Austauschers betrug ca. 3,5 mL; der Volumenstrom wurde auf 33 mL/h bzw. 10 BV/h eingestellt.

In Abbildung 6 sind die aufsummierten PFC-Konzentrationen im Zu- und Ablauf des Ionenaustauschers gezeigt. Auffällig ist die starke Schwankung der Zulaufsummenkonzentration, die zwischen 2,8 und 6,1 $\mu\text{g/L}$ variieren. Zudem sind diese Summenkonzentrationen deutlich geringer als die Ergebnisse der zu früheren Zeitpunkten durchgeführten Analysen (siehe z. B. Abbildung 1 im TZW-Bericht „Modellvorhaben Herberlingen ...“ vom November 2017). Wie aus Abbildung 7 ersichtlich wird, ist die Zusammensetzung der PFC-Einzelsubstanzen in der Zulauflösung weitestgehend konstant. Unter Umständen resultieren die beobachteten Konzentrationsschwankungen aus Verdünnungen des verwendeten Grundwassers mit Trinkwasser, welches zur Spülung der Laborfilteranlage genutzt wurde.

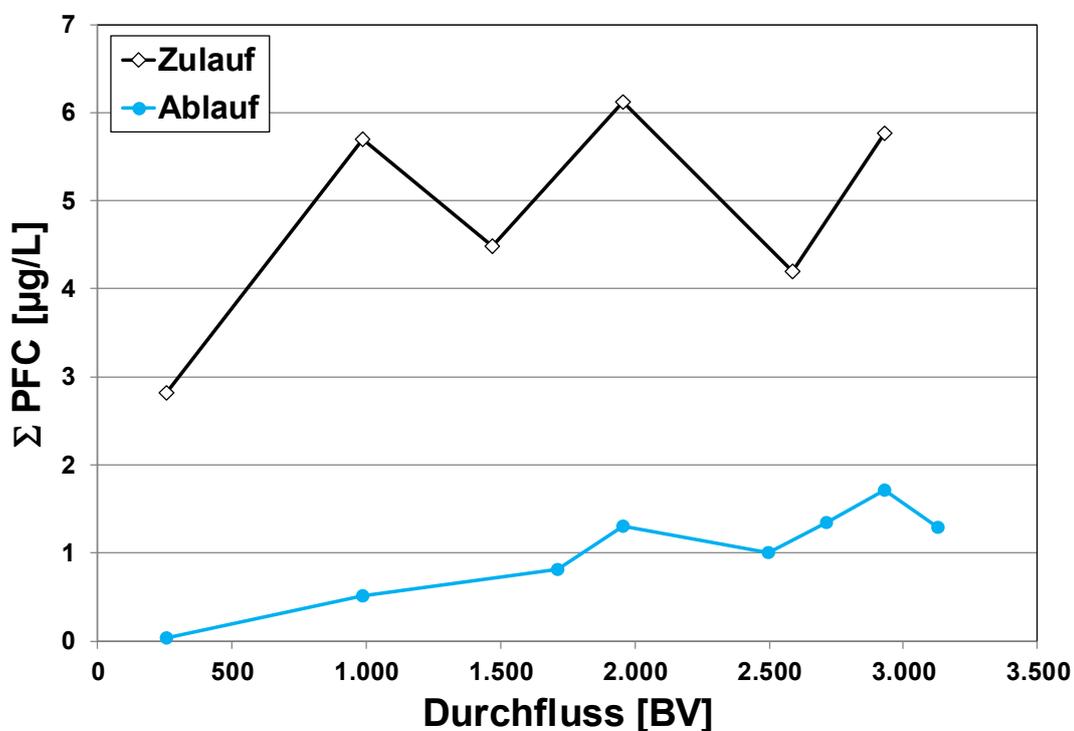


Abbildung 6: Durchbruch der aufsummierten PFC-Konzentrationen bei der 1. Wiederbeladung nach erfolgter Regeneration

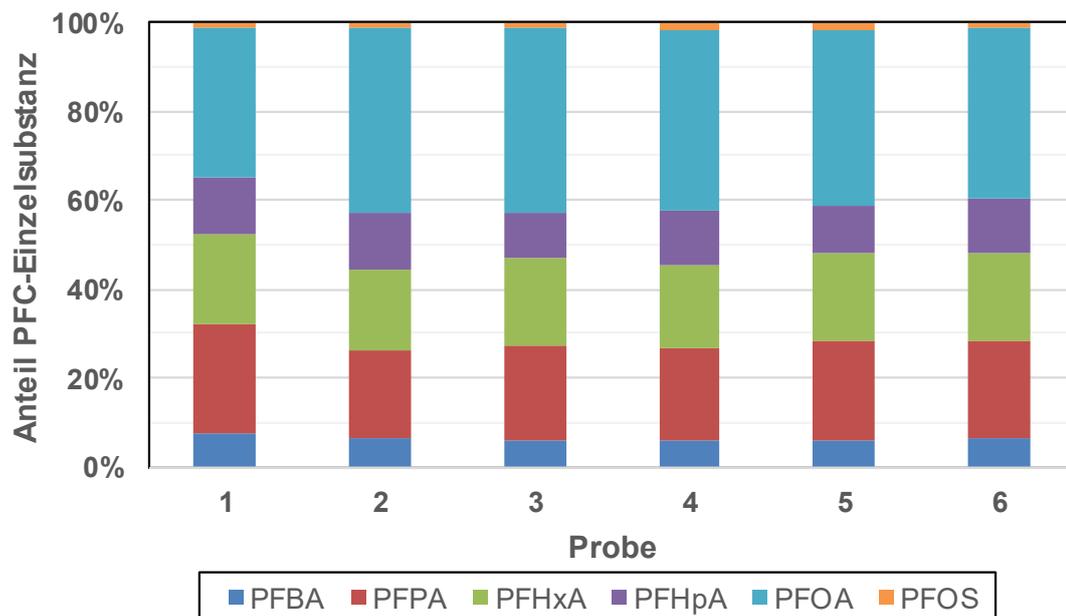


Abbildung 7: PFC-Zusammensetzung im Zulauf des Ionenaustauschers

Anhand der PFC-Summenkonzentration im Ablauf des Ionenaustauschers ist in Abbildung 6 der Durchbruch erkennbar. Während bei der ersten Analyse nach ca. 250 BV (entspricht einem durchgesetzten Wasservolumen von $250 \times 3,5 \text{ mL} = 0,9 \text{ L}$) die PFC-Einzelsubstanzen aufsummiert lediglich in einer Konzentration $< 0,05 \text{ } \mu\text{g/L}$ vorliegen, beträgt die Summenkonzentration im Ablauf des Ionenaustauschers nach ca. 1.000 BV bereits $0,8 \text{ } \mu\text{g/L}$. Im weiteren Versuchsverlauf ist ein Anstieg der PFC-Konzentrationen erkennbar; der Wert von $1 \text{ } \mu\text{g/L}$ wird nach ca. 1.800 BV erreicht. Bis zum Versuchsende bei einem Durchsatz von 3.100 BV weisen die Ablaufkonzentrationen Werte $< 2 \text{ } \mu\text{g/L}$ auf. Ein vollständiger Durchbruch ist zu diesem Zeitpunkt also noch nicht erreicht.

Der Durchbruch der in dem betrachteten Fall im Wesentlichen vorliegenden PFC-Einzelsubstanzen ist in Abbildung 8 dargestellt. Von den vier betrachteten perfluorierten Carbonsäuren PFPA, PFHxA, PFHpA und PFOA ist bis zum Versuchsende ein fast vollständiger Durchbruch des aus fünf C-Atomen bestehenden PFPA zu erkennen. PFHxA, welches ein Grundgerüst aus sechs C-Atomen aufweist, bricht im Laufe des Experiments ebenfalls teilweise durch den Ionenaustauscherfilter: Bei Versuchsende liegt im Ablauf eine Konzentration von $0,14 \text{ } \mu\text{g/L}$ vor, was im Vergleich zur durchschnittlichen Zulaufkonzentration von $0,9 \text{ } \mu\text{g/L}$ einem Anteil von 15 % entspricht.

Die Substanzen PFHpA und PFOA werden über die gesamte Versuchslaufzeit weitestgehend zurückgehalten.

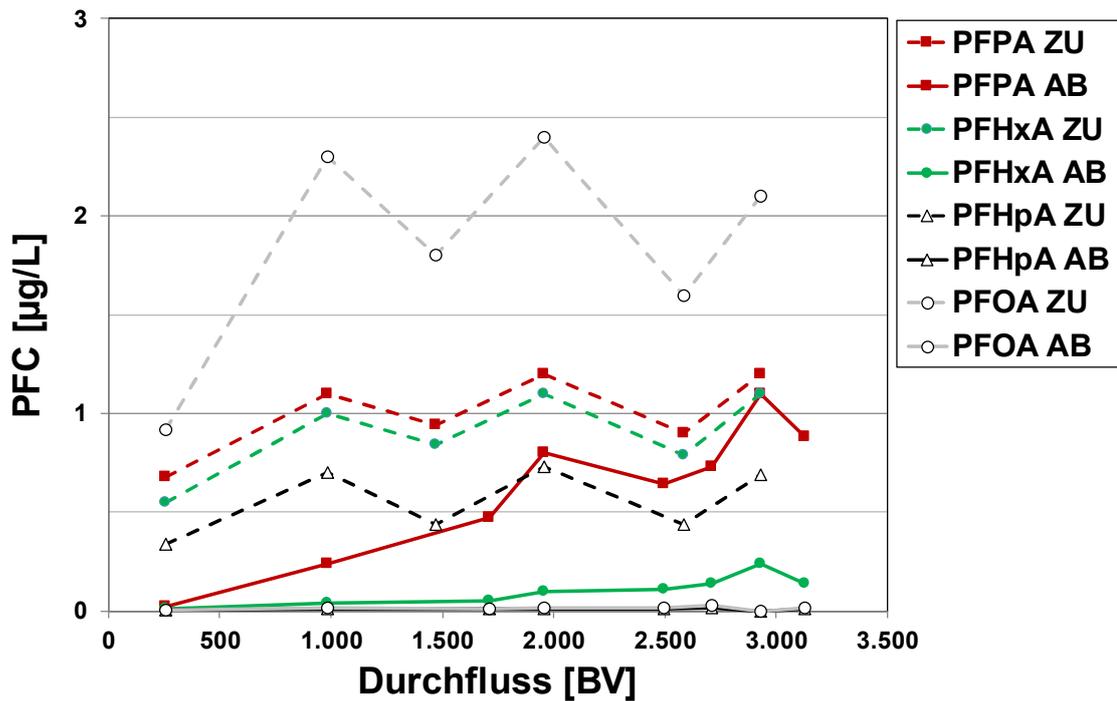


Abbildung 8: PFC-Zusammensetzung im Zu- und Ablauf des Ionenaustauschers

Der Durchbruch der aus vier C-Atomen aufgebauten Substanz PFBA, die im Zulauf in einer Konzentration von durchschnittlich 0,3 µg/L enthalten ist, ist in Abbildung 9 dargestellt. Da dieser Stoff von Ionenaustauschern wie auch von Aktivkohlen bekanntermaßen schlecht sorbiert wird, findet bereits nach 1.500 bis 2.000 BV ein vollständiger Durchbruch durch den Ionenaustauscher statt.

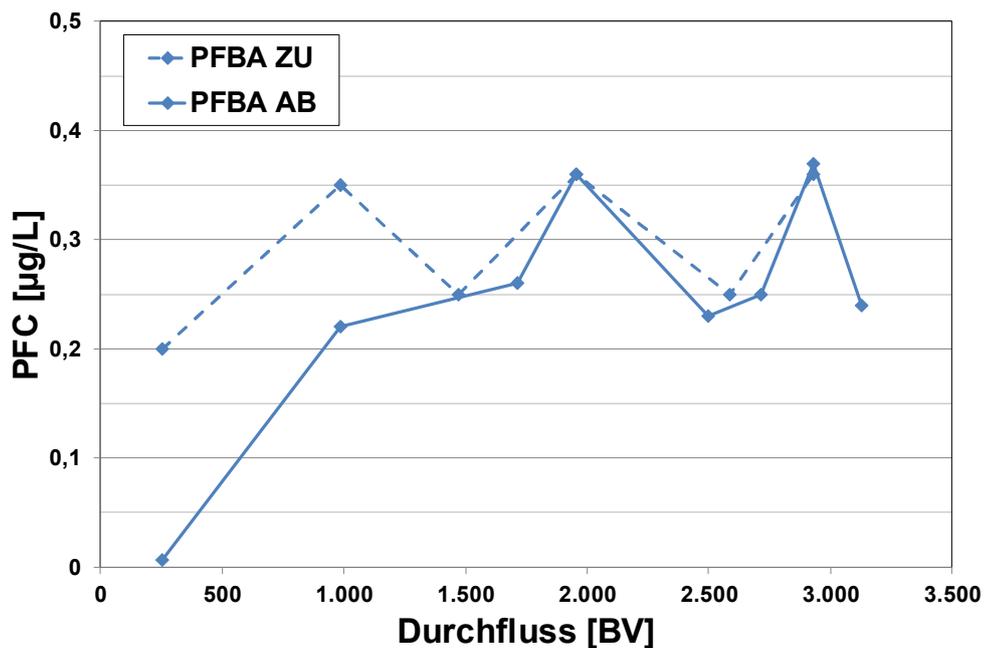


Abbildung 9: Durchbruch von PFBA durch den Ionenaustauscher

Als Bewertungsmaß für die Laufzeit des Ionenaustauscherfilters ist die Quotientensumme (QS) im Ablauf des Filters in Abbildung 10 dargestellt. Die QS bildet sich hierbei durch die Addition der Konzentrationen der einzelnen PFC-Substanzen, die jeweils mit dem zugehörigen Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) gewichtet werden, nach folgender Formel:

$$QS = \sum_i \frac{c(PFC_i)}{GFS_i}$$

Gemäß einer Empfehlung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg [7] wurden folgende PFC sowie deren Geringfügigkeitsschwellenwerte genutzt:

PFOS	0,3 µg/L	PFHxS	0,3 µg/L
PFOA	0,3 µg/L	PFHxA	1,0 µg/L
H ₄ PFOS	0,3 µg/L	PFPeS	1,0 µg/L
PFNA	0,3 µg/L	PFPA	3,0 µg/L
PFDA	0,3 µg/L	PFBS	3,0 µg/L
PFHpS	0,3 µg/L	PFBA	7,0 µg/L
PFHpA	0,3 µg/L		

Diese Bezugsgrößen wurden gewählt, um die QS mit in der Vergangenheit durchgeführten Versuchen vergleichbar zu machen, obwohl seit dem Jahr 2017 in vielen Fällen aktualisierte toxikologische Werte des Umweltbundesamtes (UBA) [8] genutzt werden.

Wenn für eine Substanz der Analysenwert unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) lag, wurde für die Berechnung der Quotientensumme der halbe Wert der BG herangezogen, die für die aufgeführten PFC bei je 0,001 µg/L lag.

Solange die Quotientensumme einen Wert von 1 nicht überschreitet, ist von einem ausreichenden Schutz für alle Bevölkerungsgruppen bei einer lebenslangen Aufnahme des Trinkwassers auszugehen.

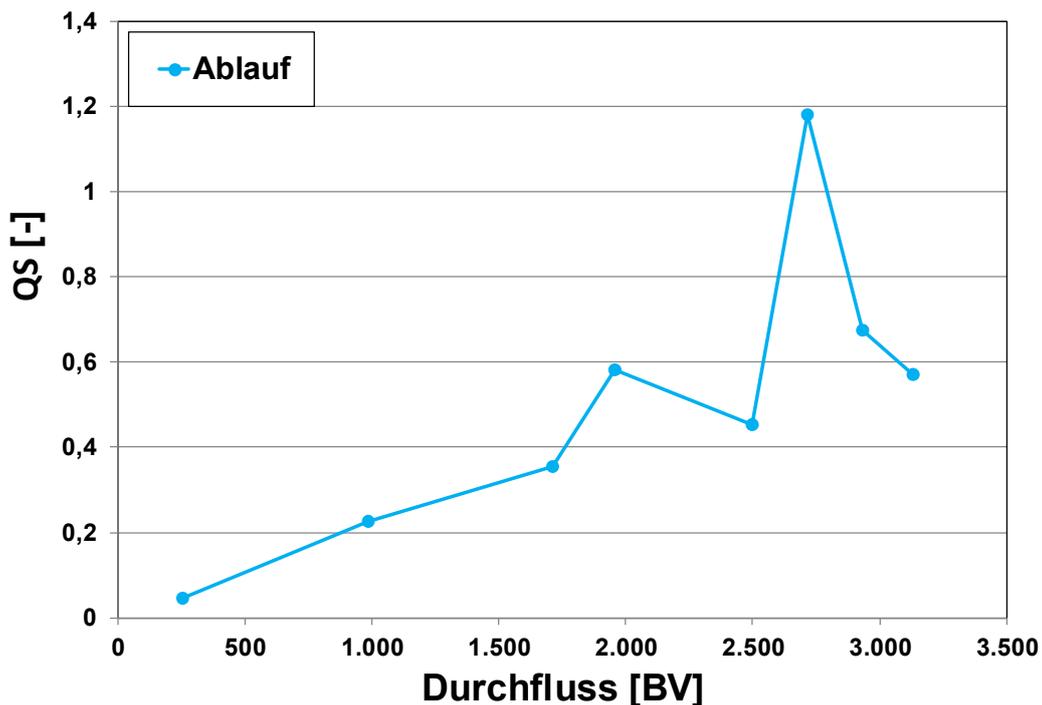


Abbildung 10: Quotientensumme (QS) im Ablauf des Ionenaustauschers

In Abbildung 10 ist mit zunehmendem Durchsatz zunächst ein langsamer Anstieg der Quotientensumme auszumachen. Nach einem Durchsatz von 2.700 BV ist ein sprunghafter Anstieg der QS auf 1,2 erkennbar. Dieser Anstieg ist im Wesentlichen durch das Vorhandensein von PFNA in einer Konzentration von 0,11 µg/L bedingt. Diese Substanz wurde zu anderen Zeitpunkten im Filterablauf nicht oder in deutlich geringerer Konzentration ermittelt. Das zeitweise Vorhandensein des Stoffes in diesen Konzentrationen kann nicht erklärt werden.

Mit Ausnahme dieser Probe nach einem Durchsatz von 2.700 BV weist die QS jeweils Werte unter 1 auf.

Der Gruppenparameter AOF wurde zu Beginn und am Ende des Säulenversuchs jeweils im Zu- und im Ablauf des Ionenaustauschfilters bestimmt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Im Ablauf des Filters liegt der AOF zu Versuchsbeginn nach 250 BV unterhalb der Bestimmungsgrenze von 2,0 µg/L. Nach 3.100 BV liegt im Ablauf ein Wert von 3,0 µg/L, der annähernd dem Wert im Zulauf von 3,3 µg/L entspricht, obwohl bei diesem Durchsatz noch eine Vielzahl an PFC-Einzelsubstanzen durch den Ionenaustauscher zurückgehalten werden. Aus der Analytik der Einzelsubstanzen resultiert im Ablauf zu Versuchsende ein Fluorgehalt von 0,83 µg/L, der deutlich unterhalb des AOF von 3,0 µg/L liegt. Demnach brechen nach 3.100 BV auch fluorhaltige Substanzen durch den Filter, die mit der Einzelstoffanalytik nicht erfasst werden.

Tabelle 2: Analyseergebnisse für AOF, aufsummiertes Fluor und Fluorid

Durchsatz	AOF, $\mu\text{g/L}$		Aufsummiertes Fluor, $\mu\text{g/L}$		Fluorid, mg/L	
	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
250 BV	3,2	< 2,0	1,87	0,02	0,05	0,07
3.100 BV	3,3	3,0	---	0,83	< 0,05	< 0,05

Der Vergleich der Zulaufkonzentrationen des AOF ($3,2 \mu\text{g/L}$) und des aufsummierten Fluors ($1,87 \mu\text{g/L}$) verdeutlicht zudem, dass im Grundwasser Sinzheim fluorhaltige Substanzen enthalten sind, die nicht über den in Tabelle 1 aufgeführten Analyseumfang erfasst werden.

Weder im Zu- noch im Ablauf sind erhöhte Fluoridgehalte vorhanden. Jedoch liegt die Bestimmungsgrenze bei $0,05 \text{ mg/l}$ bzw. $50 \mu\text{g/L}$, was im Vergleich zu den organischen Fluorverbindungen als hoch zu bewerten ist.

Ein Vergleich des PFC-Durchbruchs bei der Nutzung von regeneriertem Ionenaustauschermaterial mit frischem Austauschharz ist in Abbildung 11 dargestellt. In der Abbildung sind in Abhängigkeit vom Filterdurchsatz die aufsummierten Zu- und Ablaufkonzentrationen für die beiden am TZW durchgeführten Laborversuche aufgeführt. Die Konzentrationsverläufe im Ablauf sind für das frische wie für das regenerierte Material nahezu identisch.

Da bei dem zweiten Versuch die Zulaufkonzentrationen geringer waren, wird der Ionenaustauscher in diesem Fall auch weniger beladen. Unter der Annahme linearer Adsorptionsisothermen für die PFC-Einzelsubstanzen, was im vorliegenden Konzentrationsbereich von $\geq 2 \mu\text{g/L}$ je Substanz gerechtfertigt scheint, ist trotz der geringeren Zulaufkonzentration kein späterer Durchbruch zu erwarten. Demnach zeigt das regenerierte Ionenaustauschermaterial keine schlechtere PFC-Aufnahme als der frische Ionenaustauscher.

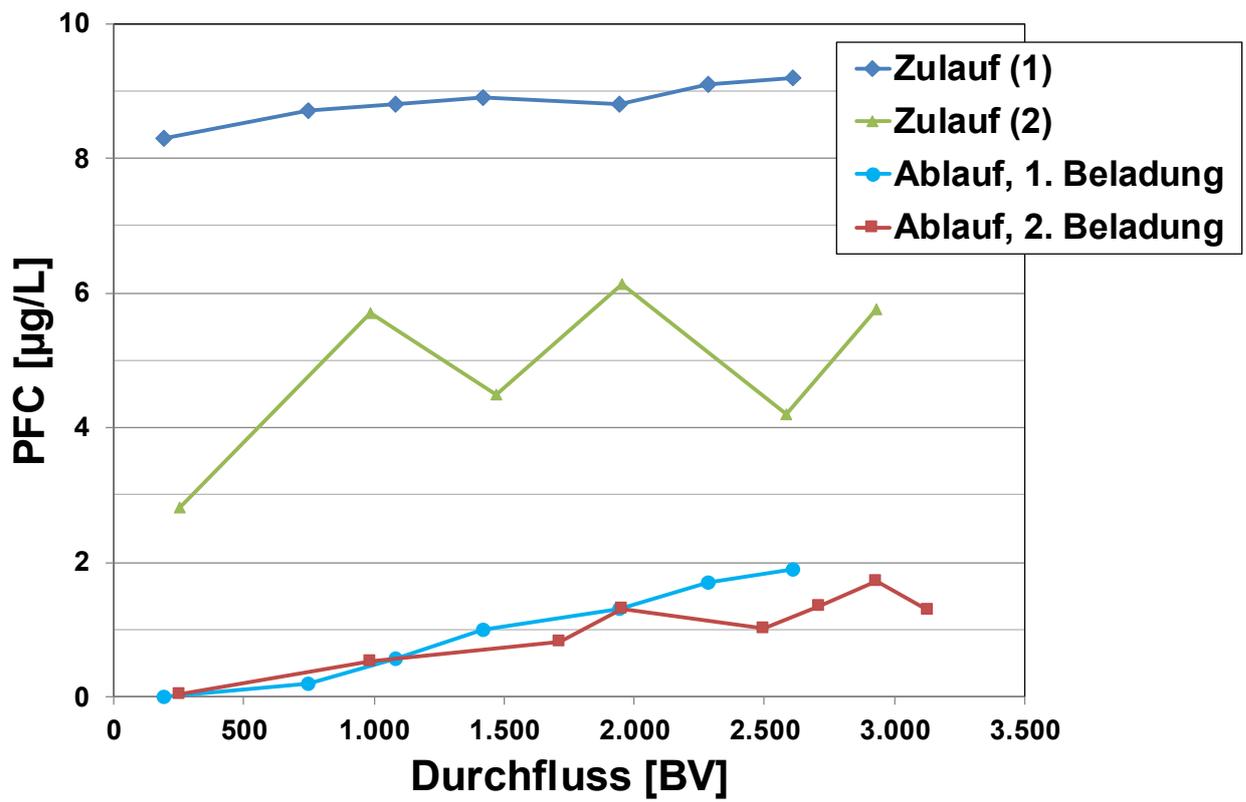


Abbildung 101: PFC-Durchbruch bei der 1. und 2. Beladung des Ionenaustauschers

4 Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Laboruntersuchungen zeigen, dass eine Regeneration von stark basischen Ionenaustauschern und der anschließende erneute Einsatz zur PFC-Entfernung im Rahmen der Grundwassersanierung möglich ist. Bei der durchgeführten Regeneration ist von einer vollständigen Elution der PFC von dem Austauschermaterial auszugehen. Zudem wurden bei der zweiten Beladung des Ionenaustauschers keine Kapazitätseinbußen festgestellt.

Die Regeneration wurde mit einer wässrigen Lösung durchgeführt, die 80 % Ethanol und 5 % Natriumchlorid enthielt. Da eine ethanolische Lösung in dieser Konzentration eine brennbare Flüssigkeit darstellt, ist der Umgang mit einer derartigen Regenerationslösung mit entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen durchzuführen und daher als technisch anspruchsvoll zu bewerten. Je nach im Rohwasser vorliegender PFC-Einzelsubstanzen kann die Ethanolkonzentration u. U. verringert werden. Perfluorierte Carbonsäuren sind leichter von Ionenaustauschern eluierbar als perfluorierte Sulfonsäuren (siehe Abbildung 2). Jedoch ist aus anderen Untersuchungen bekannt, dass auch für die weitgehende Elution von perfluorierten Carbonsäuren eine Ethanolkonzentration von mindestens 40 % erforderlich ist [4].

Durch die Regeneration und Wiederverwendung von Ionenaustauschern bei der PFC-Entfernung können im Vergleich zu nur einmalig verwendbaren Sorbentien wirtschaftliche Vorteile resultieren. Speziell im Vergleich zu Aktivkohle kann der ca. zehnfach höhere Materialanschaffungspreis von Ionenaustauschern durch die mehrfache Nutzung kompensiert werden. Für eine konkrete wirtschaftliche Bewertung sind jedoch die Entsorgungsmöglichkeiten des PFC-haltigen Regenerats (u. U. mit vorheriger Weiterbehandlung) zu beurteilen und mit derjenigen für mit PFC beladener Aktivkohle zu vergleichen.

5 Literatur

- [1] F. Schuricht *et al.* „Entfernung des perfluorierten Tensids PFOS aus Abwasserströmen der galvanischen Industrie / Teil 1“ *Galvanotechnik* 9, 2062-2072, 2014
- [2] M. Albers „Analytik und Elimination von perfluorierten Tensiden aus Prozesswässern der Galvanik“ Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2011
- [3] K. E. Carter; J. Farrell „Removal of Perfluorooctane and Perfluorobutane Sulfonate from Water via Carbon Adsorption and Ion Exchange“ *Separation Science and Technology* 45 (6) 762–767, 2010
- [4] M. Riegel; F. Sacher; F. Th. Lange „Aufbereitungstechnische Entfernung kurzkettiger perfluorierter Chemikalien (PFC) durch Anionenaustauscher“ *Vom Wasser* 115 (2) 57-61, 2017
- [5] J. Janda; F. Th. Lange; M. Riegel „Weitergehende Erfassung von PFC-Quellen im Einzugsbereich von Wasserwerken und Entfernung von kurzkettige, persistenten PFC“ Abschlussbericht zu einem DVGW-Forschungsvorhaben, April 2017
- [6] A. Zaggia, L. Conte, L. Falletti, M. Fant, A. Chiorboli „Use of strong anion exchange resins for the removal of perfluoroalkylated substances from contaminated drinking water in batch and continuous pilot plants“ *Water research* 91, 137-146, 2016
- [7] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, “Vorläufige GFS-Werte PFC für das Grundwasser und Sickerwasser aus schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten” Schreiben vom 17.06.2015
- [8] Umweltbundesamt (UBA), “Fortschreibung der vorläufigen Bewertung von per- und polyfluorierten Chemikalien (PFC) im Trinkwasser: Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission,” *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 60 (3) 350–352, 2017