



Per- und polyfluorierte Chemikalien in Bayern

Untersuchungen 2006 – 2018



analytik



Per- und polyfluorierte Chemikalien in Bayern

Untersuchungen 2006 - 2018

Impressum

Per- und polyfluorierte Chemikalien in Bayern – Untersuchungen 2006 - 2018

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de/

Text:

LfU, Referat 76: Hanna Ulrich, Dr. Michael Gierig; Referat 73: Georgia Buchmeier; Referat 75: Dr. Michael Elsasser; Referat 83: Ilona Schlößer; Referat 94: Christiane Neumann; Referat 96: Roland Hammerl; Referat 107: Dr. Edzard Hangen, Peter Spörlein

Redaktion:

LfU, Referat 76: Hanna Ulrich, Ann-Sophie Heldele, Dr. Michael Gierig

Bildnachweis:

LfU

Stand:

Januar 2019, 2. aktualisierte Ausgabe

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird um Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars gebeten.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	9
Abstract	9
1 Einleitung	11
1.1 Terminologie	11
1.2 Herstellung	13
1.3 Eigenschaften und Verwendung	13
1.4 Eintragspfade in die Umwelt	14
1.5 Internationale und nationale Regulierungen	15
1.6 Ersatzstoffe	19
2 Analytik	20
3 Belastungssituation in Bayern	21
3.1 Oberflächengewässer	21
3.1.1 Erste Untersuchungen 2006 bis 2008	21
3.1.2 Monitoring im Rahmen der EG-Wasserrahmenrichtlinie	22
3.1.3 Monitoring Projekt MOSAIC	32
3.1.4 Muschelschadstoffmonitoring	34
3.2 Grundwasser	36
3.2.1 Erste Untersuchungen 2007/2008	36
3.2.2 Uferfiltratbeeinflusste Wassergewinnungen	37
3.3 Klärschlamm und Abwasser	41
3.3.1 PFC-Belastung in kommunalen Klärschlämmen in Bayern von 2008 bis 2013	41
3.3.2 PFC-Konzentrationen in Kläranlagenabläufen	48
3.3.3 Abwasseruntersuchungen	50
3.4 Wildtiere	52
3.5 Boden	56
3.5.1 Erstes PFC-Screening	56
3.5.2 PFC-Gehalte in Bodenproben der Bodendauerbeobachtungsflächen	60

4	Altlasten und schädliche Bodenveränderungen	64
4.1	Situation und Datenlage	64
4.2	Untersuchungen und Ergebnisse	64
4.3	Steckbriefe ausgewählter Altlasten und schädlicher Bodenveränderung	67
4.4	Boden- und Grundwassersanierung	72
5	Verhalten in der Umwelt	81
5.1	Ökotoxikologische Bewertung ausgewählter PFC	81
5.2	PFC im Boden	83
5.2.1	Lysimeterversuche	83
5.2.2	Lysimeterversuch zur Untersuchung des natürlichen Austragsverhaltens von ADONA	93
5.2.3	Kleinlysimeterversuche	94
5.2.4	Säulen- und Batchversuche	98
6	Literatur	101
7	Anhang	108

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Klassifikation der PFC (abgeändert nach OECD, 2013)	12
Abb. 2:	Beispiele für die Struktur ausgewählter per- und polyfluorierter Verbindungen.	13
Abb. 3:	Eintragungspfade der PFC in die Umwelt (abgeändert nach Gellrich 2014)	15
Abb. 4:	Lage der 38 Überblicksmessstellen nach WRRL an den Fließgewässern, an denen seit 2015 vierteljährlich PFC in der Wasserphase untersucht wird. Der rote Punkt kennzeichnet die Lage der Sondermessstelle Alz/ Hohenwart, die durchgehend viermal jährlich beprobt wird.	23
Abb. 5:	Mittlere PFC-Konzentration in der Wasserphase der Fließgewässer, die 2015 bis 2017 beprobt wurden.	24
Abb. 6:	Vergleich der mittleren PFC-Konzentrationsbereiche zwischen den Untersuchungsjahren 2007/08 und 2015/16/17 in der Wasserphase der Fließgewässer	25
Abb. 7:	Zeitlicher Verlauf der PFOA- und ADONA-Konzentration an der Messstelle Alz, Hohenwart.	25
Abb. 8:	Lage der Probenahmestellen des bayerischen Fischschadstoffmonitorings an Seen. Untersuchungszeitraum 2012 – 2016.	27
Abb. 9:	Lage der Probenahmestellen des bayerischen Fischschadstoffmonitorings an Fließgewässern. Untersuchungszeitraum 2012 – 2016.	28
Abb. 10:	PFC-Konzentrationen in der Fischmuskulatur. Ergebnisse der in den Jahren 2012-16 untersuchten Poolproben aus bayerischen Gewässern. Dargestellt sind alle Messstellen, bei denen mindestens eine Verbindung mit einer Konzentrationen > 4,5 µg/kg (> ½ PFOS UQN) gefunden wurde. Zusätzlich wurden Stellen aufgenommen, die im Gewässerlängsverlauf unterhalb oder oberhalb dieser Messstellen liegen. Rote Pfeile: Überschreitung der Biota-Umweltqualitätsnorm (UQN) für PFOS von 9,1 µg/kg.	30
Abb. 11:	Zustandsbewertung für die Überblicksmessstellen an Fließgewässern. Einhaltung bzw. Überschreitung der PFOS-UQN in Wasser und Fischen (weiße Markierung: Untersuchungsergebnisse in der Wasserphase bzw. in Fischen liegen noch nicht vor.)	31
Abb. 12:	Lage der MOSAIC-Messstellen, die 2018 vierteljährlich auf PFC untersucht werden	32
Abb. 13:	Anteile der Nachweise von PFC in Oberflächenwasserproben oberhalb der Bestimmungsgrenze in den ersten zwei Quartalen 2018.	33
Abb. 14:	PFOS-Konzentration (µg/kg) im Weichkörper von <i>Dreissena polymorpha</i> aus der Isar bei Altheim. Ergebnisse der Herbstprobennahmen der Jahre 2006 – 2016.	35
Abb. 15:	Lage der Grundwassermessstellen, die 2007 beprobt wurden.	36
Abb. 16:	Lage der Beprobungsstellen im Projekt Klimaanpassung und Wasserversorgung, Untersuchungszeitraum 2015 - 2018 (rot – Oberflächenwasser, gelb – Grundwasser, orange – Rohwasser).	38
Abb. 17:	Anteile der Nachweise von PFC in Oberflächenwasserproben oberhalb der Bestimmungsgrenze.	39
Abb. 18:	PFC in der Fränkischen Rezat. In den Wochen- bzw. Tagesmischproben wurden zwischen 4 und 10 verschiedene PFC-Verbindungen im Untersuchungszeitraum April bis September 2016 nachgewiesen.	39

Abb. 19:	Vergleich der PFC-Gesamtkonzentration zwischen Oberflächenwasser- und Grundwasserproben.	40
Abb. 20:	PFC-Belastung im Klärschlamm bayerischer kommunaler KA von 2008 bis 2013. Die Zahl im Kreis gibt die Anzahl der Kläranlagen an, die im jeweiligen Jahr untersucht wurden.	43
Abb. 21:	Häufigkeitsverteilung der Trends (Steigung der Regressionsanalysen von 2008 bis 2013) der PFC-Summen aller Anlagen, für die Regressionen berechnet werden konnten (schwarze Balken). In Rot: Trends von hoher Güte mit $R^2 > 0,5$ und mindestens 3 Untersuchungsergebnissen.	44
Abb. 22:	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Trends der untersuchten Einzelsubstanzen mit den Trends der Summen PFC (alle dargestellten Trends mit $R^2 > 0,5$ und mindestens 3 Werten).	45
Abb. 23:	PFC-Fracht (in t/a) berechnet als Summe der Frachten aller untersuchten KA. Für die Berechnung wurde die durchschnittliche Klärschlammmenge pro EW (10,4 kg/a) herangezogen	45
Abb. 24:	Zeitliche Entwicklung der PFC-Klärschlammbelastung in sieben ausgewählten KA (A). Die rote Linie markiert den Vorsorgewert von 125 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM. Anteil der Einzelverbindungen an der PFC-Summenkonzentration (B).	46
Abb. 25:	Vergleich der PFC-Konzentrationen in Klärschlamm, Kläranlagenablauf und angrenzendem Gewässer der stark belasteten Kläranlagen.	48
Abb. 26:	Vergleich der PFC-Konzentrationen in Klärschlamm, Kläranlagenablauf und angrenzendem Gewässer.	49
Abb. 27:	Vergleich der PFOS- und PFOA-Konzentrationen in Lebern von Rehen aus drei verschiedenen Gebieten in $\mu\text{g}/\text{kg}$ Frischgewicht.	53
Abb. 28:	Lage der BDF an denen PFC-Untersuchungen im Eluat bzw. Feststoff vorliegen.	60
Abb. 29:	PFC-Konzentrationen im S4-Eluat des Feinbodens (Korngröße < 2 mm) der Bodendauerbeobachtungsflächen im Jahr 2016	61
Abb. 30:	Zeitverlauf der PFOA-Gehalte im Feststoff am Bodendauerbeobachtungsstandort Burghausen.	62
Abb. 31:	Zeitverlauf der PFOA-Gehalte im S4-Eluat am Bodendauerbeobachtungsstandort Burghausen.	62
Abb. 32:	Zeitverlauf der ADONA-Gehalte im Feststoff am Bodendauerbeobachtungsstandort Burghausen.	63
Abb. 33:	Lage der Altlasten, schädlichen Bodenveränderungen und Verdachtsflächen mit PFC (23 dem LfU bekannte Standorte; Stand: September 2018)	65
Abb. 34:	Schadensbereiche am Militärflugplatz Manching	68
Abb. 35:	PFC- (a), DOC- und Fluorid-Konzentration (b)- bei Start und Ende des elektrochemischen Abbauersuchs mit GWB 5 (Trautmann et al. 2015).	74
Abb. 36:	Durchbruchskurven der verschiedenen Materialien für die PFC-Summe der vier dotierten PFC-Verbindungen. Säulenversuche mit dotiertem Reinstwasser.	76
Abb. 37:	Zeitlicher Verlauf der PFC-Summenkonzentration an den Probenahmestellen der Pilotanlage während des ersten (A) und zweiten (B) Versuchslaufs (n.b.= nicht bestimmt).	77

Abb. 38:	Durchbruchskurven der verschiedenen Sorptionsmaterialien für die Summe der kurz- (links) und langkettigen (rechts) PFC-Verbindungen in der Pilotanlage.	78
Abb. 39:	VOC-Konzentration an den jeweiligen Probenahmestellen der Pilotanlage über den gesamten Versuchszeitraum.	79
Abb. 40:	Zeitlicher Verlauf der PFC-Konzentration im Sickerwasser des Lysimeters Klärschlamm 1 und Niederschlags- und Sickerwassersumme.	88
Abb. 41:	Zeitlicher Verlauf der PFOA-Konzentration im Sickerwasser des Lysimeters Nadelwald und Niederschlags- und Sickerwassersumme.	89
Abb. 42:	Zeitlicher Verlauf der PFOA-Konzentration im Sickerwasser des Lysimeters Mischwald und Niederschlags- und Sickerwassersumme.	89
Abb. 43:	Zeitlicher Verlauf der PFOA-Konzentration im Sickerwasser des Lysimeters Grünland und Niederschlags- und Sickerwassersumme.	90
Abb. 44:	Zeitlicher Verlauf der ADONA-Konzentration im Sickerwasser des Lysimeters Grünland und Niederschlags- und Sickerwassersumme.	94
Abb. 45:	Verlauf der PFOS- und PFHxS-Konzentration im Sickerwasser der ungestörten und gestörten Killy von Standort A mit zunehmendem W/F-Verhältnis. Die schwarzen Linien kennzeichnen die Berechnungspausen der ungestörten Killy, die unterbrochenen Linien die Berechnungspausen der gestörten Killy.	96
Abb. 46:	Verlauf der PFOS-, PFHxS- und 6:2 FTS-Konzentration im Sickerwasser der ungestörten und gestörten Killy von Standort B mit zunehmendem W/F-Verhältnis. Die schwarzen Linien kennzeichnen die Berechnungspause und Starkregensimulation des ungestörten Killy, die unterbrochenen Linien kennzeichnen die Berechnungspause und Starkregensimulation des gestörten Killy.	96
Abb. 47:	Vergleich der PFOS-Konzentrationen, die mit den unterschiedlichen Elutionsverfahren bzw. Kleinlysimeterversuch ermittelt wurden.	99

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Überblick über das PFC-Analytikspektrum am LfU für die verschiedenen Matrices.	20
Tab. 2:	Konzentration von perfluorierten Verbindungen im Muskelgewebe von Fischen. Ergebnisse für die in den Jahren 2012-16 untersuchten Fische aus bayerischen Gewässern	29
Tab. 3:	Überblick des PFC-Analytikspektrums im MOSAIC-Projekt mit Bestimmungsgrenzen (BG), Häufigkeiten und Konzentrationen	33
Tab. 4:	Konzentrationen ($\mu\text{g}/\text{kg}$) von PFOS und PFDA im Weichkörper von Muscheln aus bayerischen Gewässern. Ergebnisse der Jahre 2015 – 2016.	34
Tab. 5:	Mittelwerte der Einzelverbindungen des jeweiligen Untersuchungsjahres. Werte kleiner NG wurden einmal mit $0 \mu\text{g}/\text{kg}$ TM und einmal mit $10 \mu\text{g}/\text{kg}$ TM berücksichtigt. Damit wird für alle Verbindungen und Untersuchungsjahre ein Bereich angegeben	42
Tab. 6:	PFC-Konzentrationen (ng/L) in den 2006 untersuchten Kläranlagenabläufen. Da die Proben unterschiedlich stark verdünnt wurden, ergeben sich unterschiedliche Bestimmungsgrenzen.	48
Tab. 7:	Anzahl untersuchter Firmenabwässer mit Zuordnung zur Branche und Anzahl positiver Befunde zu den Leitsubstanzen PFOA und PFOS.	51

Tab. 8:	Nachweishäufigkeit, Minimum, Maximum, Medianwert der PFC-Konzentrationen in Wildschweinlebern aus dem Forst Hohenaltheim, Landkreis Donau-Ries.	55
Tab. 9:	PFOA- und PFOS-Gehalte in landwirtschaftlich genutzten Oberböden sowie Auflagen und Oberböden zweier Forststandorte (Beprobung 2000 bis 2004).	57
Tab. 10:	PFOA und PFOS-Gehalte in Bodenproben von mit Klärschlamm (KS) und Bioabfallkomposten (BAK) beaufschlagten landwirtschaftlichen Nutzflächen (Beprobung 2006).	58
Tab. 11:	PFOA- und PFOS-Gehalte in Bodenproben aus dem Ufer- und Auewaldbereich der Alz sowie im Öttinger Forst (Beprobung 2006).	59
Tab. 12:	Maximale PFC-Gehalte bei Altlasten, schädliche Bodenveränderung und Verdachtsflächen in Bayern	66
Tab. 13:	PFC-, LHKW-, BTEX-, Mangan-, Eisen- und TOC (Total Organic Carbon)-Konzentration im Grundwasser der Grundwassermessstellen GWB 5 und GWB 10.	72
Tab. 14:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Membranfiltrations-Versuche (DOC = Dissolved Organic Carbon).	73
Tab. 15:	Überblick über die getesteten Sorptionsmaterialien (k.A. = keine Angabe)	75
Tab. 16:	PFC-Beladung (in Gew.- %) der verschiedenen Adsorbentmaterialien berechnet für die Summe der kurz- (Grenzwert von 1,0 µg/L) und langkettigen PFC (Grenzwert von 0,3 µg/L) und für die Summe aller untersuchten PFC.	78
Tab. 17:	Materialkosten (bei einer Abnahmemenge von 1 t) und kalkulierte spezifische Kosten für die an der Pilotanlage getesteten Sorptionsmaterialien.	80
Tab. 18:	Ergebnisse der ökotoxikologischen Wirktests zu PFHxS, 6:2 FTS, PFBA und PFPeA. Bei einer Abweichung der analytischen Ergebnisse von > 20 % der Nominalwerte werden die Effektivkonzentrationen verwendet. Grau hinterlegt sind die Werte, die für die PNEC-Ableitung verwendet wurden.	82
Tab. 19:	Horizontabhängige PFC-Gesamtstoffgehalte (in µg/kg TM) der für die Lysimeterversuche ausgewählten Böden.	85
Tab. 20:	Mittelwert, Minimum und Maximum der im Sickerwasser der untersuchten Lysimeter gemessenen PFC-Verbindungen.	87
Tab. 21:	Gesamtgehalt, Frachtaustrag mit dem Sickerwasser und daraus berechneter Mobilisierungsgrad von PFOA und der Summe der nachgewiesenen PFC. Berechnet für die Versuchslaufzeit von Mitte 2008 bis Ende 2015.	90
Tab. 22:	Ergebnisse der Pflanzenuntersuchungen auf PFC von 2008, 2009 und 2010 (KS = Klärschlamm; n.n.=nicht nachweisbar; Bestimmungsgrenze (BG) =0,5 µg/kg, Nachweisgrenze (NG)=0,12 µg/kg). Bestimmung mit internem Standard für PFHxA, PFOA und PFOS. Bestimmung ohne internen Standard für PFHpA, ADONA (gelten als Orientierungswerte).	91
Tab. 23:	PFC-Konzentrationen im Feststoff der untersuchten Böden der Standorte A und B.	95
Tab. 24:	Kumulierter Frachtaustrag (in µg) von PFHxS, PFOS und 6:2 FTS mit dem Sickerwasser aus den untersuchten ungestörten und gestörten Killy. Berechnet bis zu einem W/F-Verhältnis von 2.	97
Tab. 25:	PFOS-, PFHxS- und 6:2 FTS-Mobilisierungsgrad (in %) der einzelnen Laborverfahren sowie der Kleinlysimeterversuche bei W/F 2.	100

Zusammenfassung

Die Langlebigkeit und hohe Mobilität der PFC haben dazu geführt, dass sie mittlerweile global und in den verschiedensten Umweltmedien nachgewiesen werden können. Bereits 2006 begann das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) mit einer Reihe von Messprogrammen, um die PFC-Belastungen in der Umwelt in Bayern zu ermitteln und mögliche Eintragswege abzuklären. Untersucht wurden dabei Oberflächengewässer, Grundwässer, Klärschlammproben, Abwässer, Böden und aquatische und terrestrische Biotaprobe. Der vorliegende Bericht fasst die zwischen 2006 und 2018 am LfU gewonnenen Daten zum Vorkommen und Verbleib dieser Schadstoffe in der Umwelt in Bayern zusammen.

Zahlreiche Freiland- und Laborversuche wurden durchgeführt, um Informationen zum Verhalten dieser Stoffgruppe in der Umwelt zu erhalten. Für die Reinigung PFC-belasteter Wässer wurden drei verschiedene Aufbereitungsverfahren (Adsorption, Membranfiltration und elektrochemischer Abbau) getestet. Es zeigte sich, dass die Sorptionstechnik aktuell immer noch die wirtschaftlichste und effizienteste Methode zur Sanierung von PFC-Kontaminationen im Grundwasser darstellt.

Für vier ausgewählte PFC wurde die Schädigung auf aquatische Organismen anhand ökotoxikologischer Wirktests ermittelt. Die PNEC-Werte liegen für alle vier Substanzen deutlich über den in Oberflächengewässern nachgewiesenen Umweltkonzentrationen („Predicted No Effect Concentration“, Konzentration bei der nach derzeitigem Kenntnisstand keine nachteiligen Effekte auf Gewässerorganismen auftreten).

Mit Hilfe von Lysimeter-, Kleinlysimeter und Elutionsversuchen konnten Kenntnisse zum Verhalten der PFC im Boden gewonnen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass das Transport- und Mobilisierungsverhalten stark vom Bodentyp, Schadstoffgehalt und den Eigenschaften der untersuchten PFC-Verbindungen (Länge der perfluorierten Kette und funktionelle Gruppe) abhängt. Unterschiedliche Niederschlagsmengen und Trockenphasen hatten dagegen keinen wesentlichen Einfluss auf das Austragsverhalten.

Abstract

Owing to their persistence and high mobility, Per- and Polyfluorinated Alkyl Substances (PFASs) have been detected worldwide and in various environmental media. The Bavarian Environment Agency (LfU) initiated a series of measurement studies, in 2006 to localize pollution by PFASs in different environmental media and to identify specific pollution pathways. The studies examined PFASs in surface water, groundwater, wastewater, sewage sludge, soil samples and aquatic and terrestrial biota samples. This report summarizes and analyses the occurrence and fate of PFASs in the environment from the data collected in Bavaria from 2006 to 2018.

Numerous laboratory and field tests were performed to receive more information about the behaviour of these substances in the environment. For this, the efficiency of removing PFASs from contaminated water was tested through three different treatment technologies, namely, adsorption, membrane filtration and electrochemical degradation. The results show that adsorption to activated carbon is currently the most economical and effective technology for remediation of groundwater contaminated by PFASs.

The harmful effects on aquatic organisms were studied by ecotoxicological tests for four different PFASs. The PNEC (predicted no-effect concentration) values clearly exceed the concentrations measured in surface waters for all the four substances investigated.

Testing methods using lysimeter, small lysimeter and leaching tests were applied to investigate the transportation and mobilization of PFASs in soils. The results show that the transport and mobility is dependent on the soil type, pollutant content and respective properties of the investigated PFASs (length of the fluorinated carbon chain and functional group). Conditions such as varying precipitation and dry-periods were found to have no significant impact on the leaching behaviour.

1 Einleitung

Seit den 50er Jahren werden per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC) hergestellt und aufgrund ihrer wasser-, schmutz- und ölabweisenden Eigenschaften in zahlreichen Industrie- und Konsumprodukten eingesetzt. Nach aktuellen Schätzungen der OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) werden mehr als 4.700 verschiedene PFC-Verbindungen auf dem Weltmarkt angeboten (OECD 2018). Die Langlebigkeit und hohe Mobilität dieser Substanzen haben dazu geführt, dass sie mittlerweile weltweit und in den verschiedensten Umweltmatrices nachgewiesen werden können (Yamashita et al. 2005; Lau et al. 2007; Houde et al. 2011).

PFC gelangen auf unterschiedliche Weise in die Umwelt. Um die Belastungen einzelner Bereiche mit PFC zu ermitteln und die möglichen Eintragswege abzuklären, wurde am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) schon im August 2006 mit einer Reihe aufeinander abgestimmter Messprogrammen begonnen. Untersucht wurden dabei die bayerischen Oberflächengewässer, Grundwässer, Klärschlammproben, Abwässer und Böden aus belasteten und unbelasteten Bereichen. Auch in aquatischen und terrestrischen Biotaprobenn wurde die PFC-Konzentration bestimmt. Im Rahmen dieser ersten Untersuchungsprogramme wurde teils auch auf älterer Rückstellproben (Boden-, Fisch- und Muschelproben) zurückgegriffen.

Durch den langjährigen Einsatz von fluorhaltigen Feuerlöschschäumen wurden teils erhebliche PFC-Verunreinigungen von Boden, Grundwasser und Oberflächengewässern verursacht. Ziel weiterer Versuche war es daher, eine geeignete Aufbereitungstechnologie zur Reinigung von PFC-belasteten Grundwässern zu entwickeln.

Problematisch sind die PFC, da sie sich neben ihrer Langlebigkeit teilweise in Organismen anreichern und eine toxische Wirkung zeigen. Doch nur für wenige PFC liegen ausreichende Daten vor, um eine Risikoabschätzung für die Umwelt vorzunehmen.

Das Transport- und Mobilisierungsverhalten der PFC im Boden bestimmt maßgeblich, wie schnell diese Schadstoffe in das Grundwasser bzw. in Oberflächengewässer eingetragen werden. Um vertiefende Erkenntnisse zum Verhalten der PFC im Boden zu erhalten, wurden deshalb umfangreiche Lysimeterstudien im Freiland und Kleinlysimeter und Elutionsversuche im Labor durchgeführt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die mittlerweile sehr umfangreichen Mess- und Untersuchungsergebnisse vorgestellt, um über die vergangene und aktuelle Belastungssituation mit PFC in Bayern zu informieren und die gewonnenen Kenntnisse zum Verhalten dieser Substanzen in der Umwelt vorzustellen.

1.1 Terminologie

Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC, auch engl. PFAS, Per- and Polyfluorinated Alkyl Substances) sind organische Verbindungen, an deren Kohlenstoffgerüst mehrere (polyfluoriert) oder alle (perfluoriert) Wasserstoffatome durch Fluoratome ersetzt sind. Es gibt zahlreiche Einzelverbindungen, die in unterschiedliche Gruppen unterteilt werden (siehe Abb. 1). Man unterscheidet zwischen den Polymeren und Nicht-Polymeren. Der bekannteste Vertreter der Polymere ist das PTFE (Polytetrafluorethylen, Teflon®).

Zur Gruppe der Nicht-Polymere zählen die perfluorierten Alkylverbindungen wie beispielsweise die perfluorierten Carbonsäuren (PFCA) und Sulfonsäuren (PFSA) mit den bekanntesten Vertretern PFOA (Perfluorooctansäure) und PFOS (Perfluorooctansulfonsäure). Daneben gehören auch die polyfluorierten Alkylverbindungen wie die Fluortelomere zu den Nicht-Polymeren. Innerhalb der Gruppe der Nicht-Polymere unterscheidet man zusätzlich zwischen kurzkettigen und langkettigen Verbindun-

gen. Zu den langkettigen Verbindungen zählen alle PFCA mit sieben und mehr perfluorierten Kohlenstoffatomen, alle PFSA mit sechs und mehr perfluorierten Kohlenstoffatomen und alle Vorläuferverbindungen die zu den langkettigen PFCA bzw. PFSA abgebaut werden können (OECD 2013). Die PFCA, PFSA und die ployfluorierten Fluortelomeralkohole (FTOH) werden aufgrund ihrer Tensideigenschaften auch unter dem Begriff perfluorierte Tenside (PFT) zusammengefasst (Fricke u. Lahl 2005).

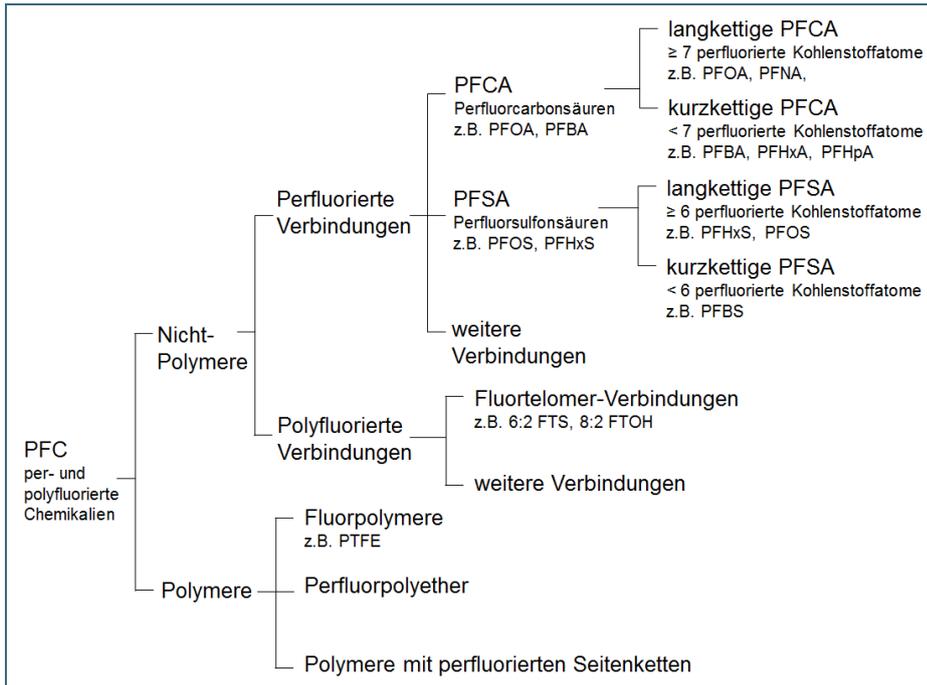


Abb. 1: Klassifikation der PFC (abgeändert nach OECD, 2013)

PFC enthalten eine hydrophobe und lipophobe Kohlenstoffkette und eine hydrophile Kopfgruppe. Die hydrophile Kopfgruppe kann negativ (z. B. Carbonsäuren, Sulfonsäuren, Phosphate), positiv (quartäre Ammoniumverbindungen), neutral (Polyethylenglykole) oder amphoter (z. B. Betain) sein (Buck et al. 2012). In Abb. 2 sind beispielhaft die Strukturformel ausgewählter PFC abgebildet.

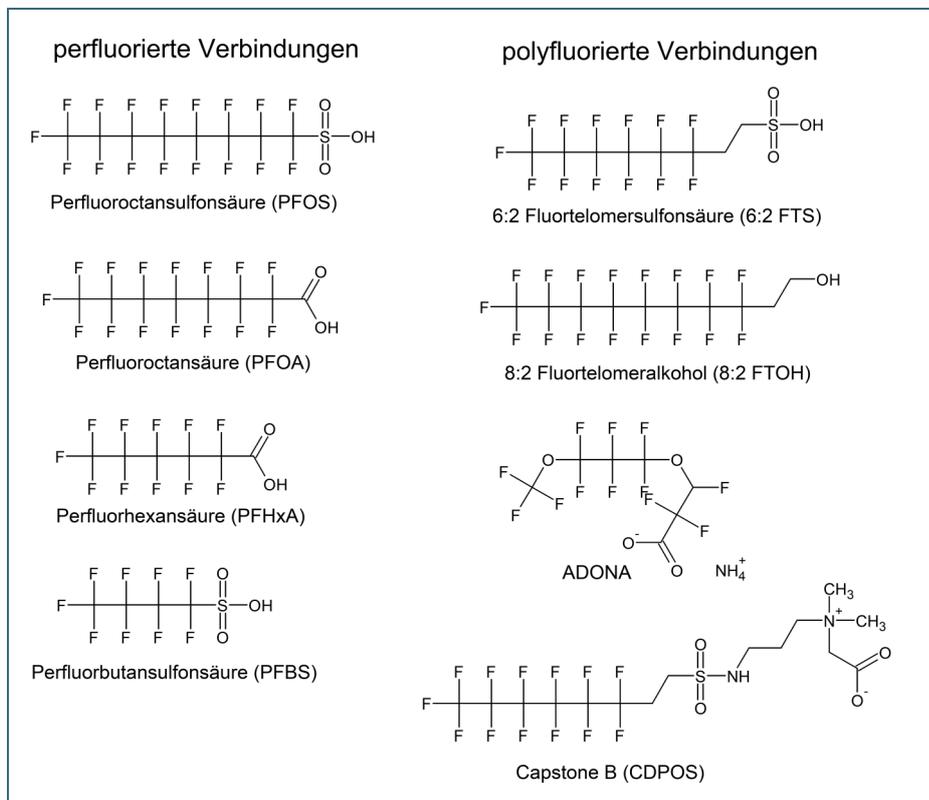


Abb. 2: Beispiele für die Struktur ausgewählter per- und polyfluorierter Verbindungen.

1.2 Herstellung

Zur Herstellung der PFC werden im Wesentlichen zwei verschiedene Verfahren eingesetzt, die elektrochemische Fluorierung (ECF) und die Telomerisation. Bei der ECF werden die Wasserstoffatome der organischen Ausgangsverbindungen elektrochemisch durch Fluoratome ersetzt (Alsmeyer et al. 1994; Buck et al. 2011). Neben den unverzweigten Isomeren entstehen bei diesem Verfahren bis zu 30 % verzweigte Moleküle als Nebenprodukte (Silva et al. 2009). Beim häufiger angewendeten Telomerisations-Verfahren wird Tetrafluorethylen (C_2F_4) schrittweise verlängert. Die dabei entstehenden Fluortelomere können anschließend zu polyfluorierten Alkylverbindungen weiterverarbeitet werden (Buck et al. 2011).

1.3 Eigenschaften und Verwendung

PFC sind durch die äußerst starke C-F-Bindung thermisch, chemisch und biologisch sehr stabil. Sie verhalten sich aufgrund ihrer hydro- und lipophoben Kohlenstoffkette und der hydrophilen Kopfgruppe sowohl wasser- als auch schmutz-, fett-, farb- und ölabweisend. PFC sind oberflächenaktiv und können die Oberflächenspannung von Wasser deutlich herabsetzen (Buck et al. 2012). Weitere physikalisch-chemische Eigenschaften werden durch die funktionelle Kopfgruppe und die Länge der perfluorierten Kohlenstoffkette bestimmt. So sind PFCA und PFSA gut wasserlöslich und zeigen nur eine geringe Flüchtigkeit. Mit zunehmender Kettenlänge nimmt die Wasserlöslichkeit jedoch ab. Kurzkettige PFCA und PFSA zeigen eine geringere Sorptionsneigung an Sediment und Boden und sind dadurch in der Umwelt mobiler (Gellrich et al. 2012; Sepulvado et al. 2011; Vierke et al. 2014).

PFOA wird als Emulgator bei der Herstellung von Fluorpolymeren (z. B. PTFE) eingesetzt und findet sich mit Restgehalten in den Polymeren (früher im mg/kg-Bereich, heute unter 10 µg/kg), so dass es aus den Produkten freigesetzt werden kann.

Wegen ihrer oberflächenaktiven Eigenschaften werden PFC beispielsweise als Benetzungsmittel bei der Oberflächenbehandlung oder in Schaumlöschmitteln eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen chemischen und thermischen Stabilität können PFC in zahlreichen Industrieprozessen verwendet werden, die unter extremen chemischen Bedingungen (z. B. stark saures oder basisches Milieu, oxidierende Bedingungen) stattfinden (Buck et al. 2012). PFOS wurde wegen seiner sehr hohen chemischen Stabilität seit den 1950er Jahren in der Galvanik als Netzmittel bei der Hartverchromung und für filmbildende Feuerlöschschäume (AFFF, engl. Aqueous Film Forming Foam) eingesetzt. Als Bestandteil in Schaumlöschmitteln verhindert PFOS aufgrund seiner fettabstoßenden Eigenschaften, dass unpolare brennbare Flüssigkeiten wie Kerosin in den Schaum aufgenommen werden. Seit 2011 ist der Einsatz PFOS-haltiger Löschmittel in der EU verboten. Als Ersatz für PFOS werden beispielsweise Fluortelomersulfonate (FTS) in Feuerlöschschäumen und in Galvanikbetrieben eingesetzt.

Zahlreiche PFOS-Derivate, z. B. Perfluoroctansulfonamid (PFOSA), Perfluoroctansulfonamidoethanol (FOSE) oder N-Ethyl-Perfluoroctansulfonamidoethanol (N-EtFOSE), wurden als Ausgangsstoffe für funktionalisierte fluorierte Polymere verwendet. Durch die fluorierten Seitenketten sind diese Materialien sowohl wasser- als auch schmutz-, fett- und ölabweisend. Diese PFOS-Derivate werden in der Umwelt zu PFOS umgewandelt.

PFC mit einer neutralen funktionellen Kopfgruppe wie Fluortelomeralkohole (FTOH) sind weniger wasserlöslich und leicht flüchtig (Ahrens 2011). FTOH werden ebenfalls zur Beschichtung z. B. von Papier und Textilien und in Imprägniersprays verwendet (Posner 2012). Sie werden aus diesen Produkten freigesetzt und können daher in der Luft nachgewiesen werden (Jahnke et al. 2007; Dreyer u. Ebinghaus 2009).

1.4 Eintragspfade in die Umwelt

PFC können über verschiedene Pfade in die Umwelt gelangen (siehe Abb. 3). Eine direkte Freisetzung der PFC über den Luft- und Abwasserpfad in die Umwelt kann bei der industriellen Nutzung stattfinden. Aber auch durch die Verwendung PFC-haltiger Produkte wie Kosmetika, Reinigungsmitteln, Textilien oder Imprägniersprays gelangen PFC in die Luft oder über das Abwasser in die Kläranlagen (Boulanger et al. 2005; Prevedouros et al. 2006; Schultz et al. 2006; Sinclair u. Kannan 2006). In den Kläranlagen wird der Großteil der Substanzen aufgrund der hohen Persistenz nicht oder nur teilweise abgebaut und adsorbiert entweder an den Klärschlamm oder wird über das gereinigte Abwasser in die Oberflächengewässer eingeleitet (Schultz et al. 2006, 2006; Huset et al. 2008; Guerra et al. 2014). Als Folge kann mittlerweile bayernweit eine PFC-Hintergrundbelastung von wenigen Nanogramm pro Liter in Gewässern nachgewiesen werden. Beim Klärprozess werden vorzugsweise die langkettigen PFC-Verbindungen z.T. an den Klärschlamm gebunden, da die Sorptionsneigung mit größerer Kettenlänge zunimmt (Sun et al. 2011; Zhang et al. 2013). Wird belasteter Klärschlamm zu Rekultivierungsmaßnahmen oder für landwirtschaftliche Zwecke auf dem Boden aufgebracht, können PFC ausgewaschen werden und damit in das Grundwasser oder angrenzende Oberflächengewässer gelangen (Ahrens 2011). Klärschlamm stellt somit eine weitere Quelle für PFC-Belastungen in der Umwelt dar (Schultz et al. 2006; Bossi et al. 2008).

Punktquellen, die lokal zu sehr hohen PFC-Konzentrationen im Boden, Grundwasser und auch Oberflächengewässer führen, können in Bayern meist auf den Einsatz fluorhaltiger Löschmittel bei Löschübungen oder Brandeinsätzen zurückgeführt werden. Aber auch im Umfeld der Produktionsstandorte von Fluorpolymeren können lokal sehr hohe PFC-Konzentrationen in der Umwelt nachgewiesen werden.

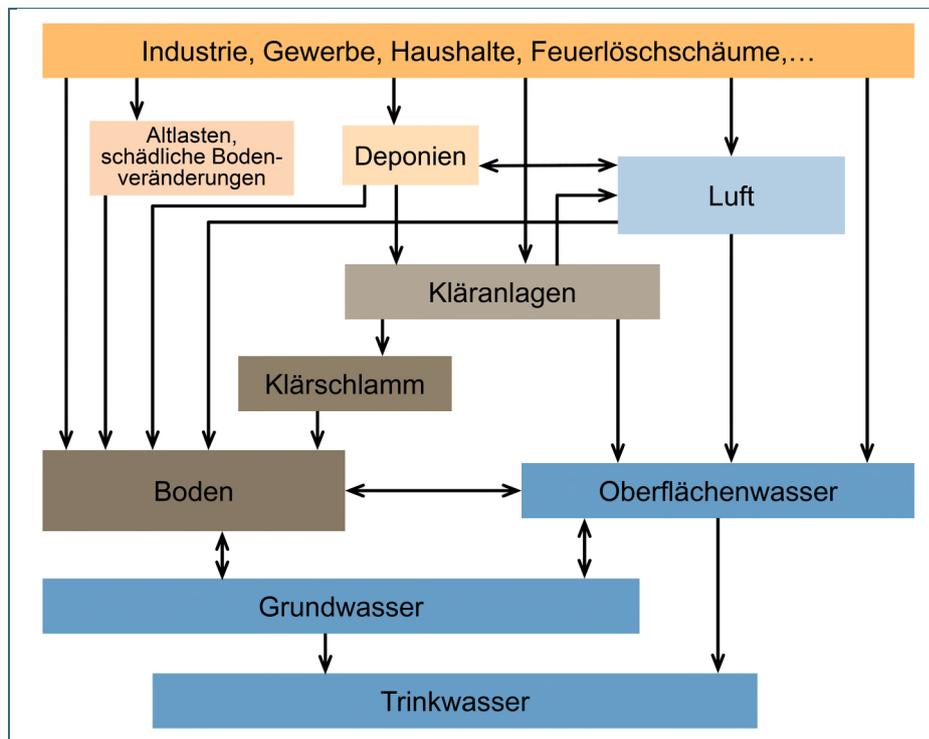


Abb. 3: Eintragungspfade der PFC in die Umwelt (abgeändert nach Gellrich 2014)

1.5 Internationale und nationale Regulierungen

Problematisch sind die PFC, da sie neben der hohen Persistenz teilweise eine bioakkumulierende und toxische Wirkung besitzen (Lau et al. 2007; Ahrens 2011). Daher sind für langkettige PFC in den vergangenen Jahren verschiedene Regulierungen und Beschränkungsmaßnahmen auf nationaler und internationaler Ebene in Kraft getreten.

In der Düngemittelverordnung gilt ein gesetzlicher Grenzwert von 100 µg/kg Trockenmasse für die Summe aus PFOS und PFOA.

Für die am weitesten verbreiteten Verbindungen PFOA und PFOS wurden wegen ihrer Toxizität Richtwerte für verschiedene Umweltmedien vorgeschlagen (s.u.). Für Trinkwasser hat die Trinkwasserkommission am Umweltbundesamt für sieben PFC gesundheitliche Leitwerte für lebenslang duldbare Belastungen (LW) und für weitere sechs PFC gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) festgelegt. Die Leitwerte werden auch für die Beurteilung von Grundwasser als Rohwasser für die Trinkwassergewinnung herangezogen.

Grundwasser

Die LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) hat für sieben PFC mit vorliegenden Leitwerten für das Trinkwasser Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) für das Grundwasser abgeleitet (LAWA 2017). Da für alle diese Einzelstoffe der jeweilige Leitwert niedriger, teilweise sogar deutlich niedriger als die jeweilige "Predicted No Effect Concentration" (PNEC, Konzentration bei der nach derzeitigem Kenntnisstand keine nachteiligen Effekte auf Gewässerorganismen auftreten) zum Schutz der aquatischen Lebensgemeinschaft ist, konnten die GFS-Werte den jeweiligen Leitwerten gleichgesetzt werden.

Da die verfügbaren humantoxikologischen Daten der sieben PFC einen gleichen oder zumindest ähnlichen Wirkmechanismus und damit eventuell additive Effekte auf die menschliche Gesundheit vermu-

ten lassen, wird aus Vorsorgegründen neben den Schwellenwerten (SW) für die Einzelstoffe als zusätzliche Bewertungshilfe auch eine Summenwertregelung definiert.

Oberflächengewässer

Bundesweit einheitliche gesetzliche Regelungen für diese Stoffklasse gibt es aktuell in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV vom 20.06.2016) mit Umweltqualitätsnormen (UQN) für PFOS für den Schutz des Menschen beim Fischverzehr als empfindlichstes Schutzgut. Für Fische gilt demnach eine PFOS-Biota-UQN von 9,1 µg/kg Fisch. Falls nur Wasserproben und keine Fische untersucht werden, gilt im Jahresmittel eine PFOS-Wasser-UQN von 0,65 ng/L. Werden diese UQN in einem Oberflächengewässer überschritten, müssen geeignete Maßnahmen festgesetzt werden, um ihre Einhaltung spätestens ab 2027 zu erreichen. Bis zum 22. Dezember 2018 muss PFOS im Rahmen eines zusätzlichen Überwachungsprogrammes sowie bei der Erstellung eines vorläufigen Maßnahmenprogramms zur Minimierung der Belastung berücksichtigt werden. Ein endgültiges Maßnahmenprogramm zur Erreichung dieser Zielwerte bis 2027 ist bis zum 22. Dezember 2021 zu erstellen.

Die LAWA hat $PNEC_{\text{aquatisch}}$ -Werte für sechs PFC-Verbindungen zur Bewertung des Schutzes der aquatischen Lebensgemeinschaft abgeleitet (LAWA 2017). Generell sollte aber aufgrund der hohen Persistenz und der möglichen Auswirkungen auf das Grundwasser (bei Infiltration) oder das „secondary poisoning“ für fischfressende Tiere für alle PFC eine grundsätzliche Minimierung angestrebt werden.

Denn auch wenn Standardlabortests keine oder nur geringe toxische Wirkungen zeigen, können langfristig Effekte durch eine langanhaltende Exposition mit geringer Dosis auftreten, die auch aufgrund der langen Lebenszyklen bei Organismen am Ende der Nahrungskette kaum vorhersehbar sind. Langzeiteffekte können auch deshalb nicht ausgeschlossen werden, da die Gehalte der PBT- (persistent, bioakkumulierend und toxisch) und vPvB-Stoffe (sehr persistent und sehr bioakkumulierend) in Mensch und Umwelt über langfristige Zeiträume nicht vorhergesagt werden können. Nach den Prinzipien von REACH können deshalb keine sicheren Gehalte in der Umwelt wie z. B. PNEC-Werte abgeleitet werden. Aktuell gilt dies für alle perfluorierten Carbonsäuren mit einer Kettenlänge von C8 – C14, PFOS und PFHxS. Dementsprechend kann für diese Stoffe keine PNEC festgelegt werden. Unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Möglichkeiten sollte die Emission dieser Stoffe soweit wie möglich minimiert werden.

Abwasser

Für die Einleitung PFC-haltiger Abwässer in Oberflächengewässer enthält die Abwasserverordnung (AbwV, 1997) abgesehen von allgemein einzuhaltenden Mindestanforderungen und Summenparametern keine konkreten stoffspezifischen Konzentrationswerte. Gemäß § 57 Abs. 1 Nr. 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) sind bei Abwassereinleitungen jedoch auch die Anforderungen an Gewässereigenschaften einzuhalten. Deshalb ist der PFC-Eintrag soweit zu begrenzen, dass die prognostizierten PFC-Konzentrationen im Gewässer nach Durchmischung mit dem Abwasser keine Beeinträchtigung der Schutzgüter an Oberflächengewässern besorgen lassen, d.h. unterhalb der UQN bzw. des Richtwertes für das empfindliche Schutzgut liegen. Dabei ist nicht nur die Einleitung, sondern ggf. auch eine PFC-Vorbelastung des Gewässers zu berücksichtigen. Ferner sind im Falle einer möglichen Beeinträchtigung des Grundwassers (z. B. bei erheblicher Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser) oder einer Trinkwassernutzung (z. B. bei Verwendung von Uferfiltrat) bei der Begrenzung des PFC-Eintrags in Oberflächengewässer auch die vorläufigen Schwellenwerte für das Grundwasser heranzuziehen.

Bodenschutz und Klärschlamm

Auch im Bodenschutz sind verschiedene Schutzgüter zu berücksichtigen. Viele terrestrisch lebende Organismen wie z. B. Regenwürmer oder auch bestimmte Insekten, die für den Erhalt der natürlichen Bodenfunktionen sehr wichtig sind, können durch PFC ebenfalls geschädigt werden. Für PFOA gilt zum Schutz terrestrischer Organismen eine PNEC für den Boden von 160 µg/kg Nassgewicht.

In der aktuell gültigen Klärschlammverordnung vom 27. September 2017 ist kein Grenzwert für PFC festgelegt (AbfKlärV 2017). Für die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm gilt die Düngemittelverordnung in der Fassung vom 27.05.2015, die einen Grenzwert von 100 µg/kg für die Summe aus PFOS und PFOA festlegt, ab 50 µg/kg besteht eine Kennzeichnungspflicht.

Das Bayerische Umweltministerium hat vor der Novellierung der Klärschlammverordnung mit Schreiben vom 07.01.2008 (zuletzt aktualisiert am 22.03.2016) festgelegt, dass alle Klärschlämme bei einer beabsichtigten landwirtschaftlichen oder landschaftsbaulichen Verwertung und ab einer Ausbaugröße der Kläranlagen von 1.000 Einwohnerwerten auf PFC untersucht werden müssen. Bei Kläranlagen, deren Klärschlamm in den vergangenen 3 bis 4 Jahren durchgängig PFC-Gehalte unterhalb der Nachweisgrenze (alle Einzelparameter < 10 µg/kg TM oder niedrigere Nachweisgrenze) aufwies, ist eine Untersuchung im Abstand von 2 bis 3 Jahren ausreichend, wenn nicht besondere Ereignisse (z. B. Brandereignis mit Einsatz von Löschschaum oder Ansiedlung eines Betriebs, der mit PFC umgeht) aufgetreten sind.

Internationale Regelungen

PFOS ist als bislang einzige Substanz aus der Gruppe der PFC chemikalienrechtlich ein persistenter organischer Schadstoff („Persistent Organic Pollutant“, POP). Herstellung, Verwendung und das Inverkehrbringen von PFOS sind europaweit durch die Verordnung (EG) Nr. 850/2004 („POP“-Verordnung) mit wenigen Ausnahmen verboten. Demnach gelten in der Europäischen Union folgende Beschränkungen für PFOS:

- Stoffe oder Gemische mit einem PFOS-Gehalt von > 0,001 %,
- neue Erzeugnisse oder Teile davon mit einem PFOS-Gehalt von 0,1 % und mehr,
- neue Textilien oder andere neue beschichtete Werkstoffe mit einem Gehalt von 1 µg/m² oder mehr dürfen nicht hergestellt, nicht in Verkehr gebracht und nicht verwendet werden.

Im Anhang IV der Liste der Stoffe, die den Abfallbewirtschaftungsbestimmungen gemäß Artikel 7 unterliegen, wurden PFOS und seine Derivate mit der Konzentrationsgrenze von 50 mg/kg neu aufgenommen.

Ausnahmen gelten für folgende Verwendungen, solange keine Alternativen bestehen:

- Fotoresistlacke und Antireflexbeschichtungen für fotolithographische Prozesse
- Fotografische Beschichtungen von Filmen, Papieren und Druckplatten
- Mittel zur Sprühnebelunterdrückung für nicht dekoratives Hartverchromen (Chrom VI)
- in geschlossenen Kreislaufsystemen
- Hydraulikflüssigkeiten für die Luftfahrt

Mit diesen Vorschriften hat die EU internationale Vereinbarungen der Stockholmer Konvention umgesetzt. PFOS ist im Anhang B der Stockholmer Konvention enthalten, welche die Vertragspartner verpflichtet, PFOS in ihrem jeweiligen Hoheitsgebiet zu beschränken. Die Stockholmer Konvention ist eine internationale Übereinkunft (derzeit 151 Staaten) über völkerrechtlich bindende Verbots- und Beschränkungsmaßnahmen für sogenannte „POP“ (persistente organische Schadstoffe).

Darüber hinaus wurden PFOA und Ammoniumperfluorooctanoat (APFO) mit Wirkung vom 20.06.2013 als SVHC-Stoffe („Substances of Very High Concern“, besonders besorgniserregende Stoffe) in die Kandidatenliste der ECHA nach Artikel 59 der REACH-Verordnung (Verordnung (EG) Nr. 1907/2006) aufgenommen, nachdem sie als PBT-Stoffe eingestuft wurden. In der Folge können diese in Anhang XIV der REACH-Verordnung, Liste der zulassungspflichtigen Stoffe aufgenommen oder weiteren Beschränkungen unterworfen werden.

Für PFOA tritt am 04.07.2020 eine EU-weite Beschränkung von Herstellung, Vermarktung, Import und Verwendung von PFOA, Salzen und Vorläuferverbindungen in Kraft (Verordnung (EU) 2017/1000). Damit gelten Grenzwerte von 25 µg/L für PFOA und 1.000 µg/L für PFOA Vorläufersubstanzen.

Längere Übergangsfristen gelten für:

- Latexdruckfarben und Ausrüstung für die Fertigung von Halbleitern (5 Jahre, 4.07.2022)
- Arbeitsschutztextilien (6 Jahre, 4.07.2023)
- Membranen für medizinische Textilien, sowie für die Filterung bei der Wasseraufbereitung, bei Herstellungsverfahren und bei der Abwasserbehandlung (6 Jahre, 4.07.2023)
- Plasma-Nanobeschichtungen (6 Jahre, 4.07.2023)
- Medizinische Produkte (ausgenommen implantierbare Materialien) (15 Jahre, 4.07.2032)

Generelle Ausnahmen gelten für:

- Unvermeidliche Nebenprodukte, die bei der Herstellung von kurzkettingen Fluorchemikalien anfallen
- Transportierte isolierte Zwischenprodukte
- Implantierbare medizinische Produkte
- Fotographische Beschichtungen für Filme, Papier und Druckplatten
- Fotolithografischen Verfahren für Halbleiter oder in Ätzverfahren für Verbindungshalbleiter
- Feuerlöschschaumgemische, die vor dem 4.07.2020 auf dem Markt waren

Die Risikobewertung weiterer per- und polyfluorierter Chemikalien wird national und international intensiv verfolgt. Bereits seit dem 19. Dezember 2012 befinden sich vier andere perfluorierte Carbonsäuren (mit Kettenlängen von C11-14) in der Kandidatenliste der ECHA, da diese vier Stoffe sehr persistent sind und sich in Organismen stark anreichern können (vPvB-Eigenschaften). Im Jahr 2016 wurden auch die C9- und C10-Carbonsäure (PFNA bzw. PFDA) als SVHC in die Kandidatenliste aufgenommen.

Die Einstufung von SVHC-Stoffen als PBT-Stoff (bzw. vPvB oder reproduktionstoxisch) bedeutet, dass eine „sichere“ Konzentration in der Umwelt aufgrund ihrer Eigenschaften nicht ableitbar ist. Eine Zulassung unter REACH wird auf Antrag nur erteilt, wenn das Risiko für Mensch und Umwelt durch die Verwendung angemessen beherrscht wird (Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, Art. 60 Abs. 2). Für PBT-Stoffe, vPvB-Stoffe und für Stoffe, für die kein Schwellenwert abgeleitet werden kann, ist eine Zulassung jedoch nur möglich, wenn die sozioökonomischen Vorteile die Risiken überwiegen und keine geeigneten Alternativstoffe oder -technologien verfügbar sind (Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, Art. 60 Abs. 4). Bis über entsprechende Zulassungen entschieden ist, sollte daher unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Möglichkeiten die Emission dieser Stoffe soweit wie möglich minimiert werden. Aktuell gilt dies für alle perfluorierten Carbonsäuren mit einer Kettenlänge von C8 – C14 und PFOS.

1.6 Ersatzstoffe

Aufgrund der Regulierungen und Selbstverpflichtungen werden mittlerweile zahlreiche Ersatzstoffe für PFOS und PFOA eingesetzt. Es werden vermehrt kürzerkettige Verbindungen - wie die Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) oder Perfluorbutansulfonsäure (PFBS) - verwendet, die in der Regel ein geringeres Bioakkumulationspotential aufweisen. Jedoch sind auch die kürzerkettigen PFC persistent und in der Umwelt deutlich mobiler (Gellrich et al. 2012; Vierke et al. 2014). Dadurch können sie sehr viel schneller in das Grundwasser und damit in das Trinkwasser gelangen. Aus der Wasserphase können die kurzkettingen Verbindungen mit den aktuell zur Verfügung stehenden Verfahren nach Stand der Technik nur sehr aufwendig wieder entfernt werden (Ochoa-Herrera u. Sierra-Alvarez 2008; Zhao et al. 2011; Xiao et al. 2012). Problematisch ist außerdem, dass die Ersatzstoffe häufig in höheren Konzentrationen eingesetzt werden müssen, um die gewünschten Eigenschaften in der Anwendung zu erreichen (Blepp et al. 2015). Häufig werden auch teilfluorierte Verbindungen wie die 6:2 Fluortelomersulfonsäure (6:2 FTS) eingesetzt, die in der Umwelt zu perfluorierten Verbindungen abgebaut werden können (Wang u. Zhang 2011).

Informationen über die Toxizität und das Umweltverhalten der Ersatzstoffe fehlen bislang weitgehend (Wang et al. 2013). Häufig ist weder die chemische Struktur bekannt noch stehen analytische Standards zum Nachweis dieser Substanzen in der Umwelt zur Verfügung.

2008 wurde von der Firma Dyneon GmbH Gendorf der PFOA-Ersatzstoff ADONA (Ammoniumsalz der 4,8-Dioxa-3H-Perfluoronansäure) eingeführt, der nach bisherigen Kenntnissen deutlich günstigere (öko-)toxikologische Eigenschaften hat. Zudem wird an der Alz, dem betroffenen Vorfluter des Industriestandorts, ein regelmäßiges Gewässermonitoring durchgeführt. Die Ergebnisse finden sich in Kapitel 3.1.

2 Analytik

Die Bestimmung der PFC im Wasser erfolgt nach dem standardisierten Verfahren DIN 38407-42:2011-03 mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) nach Fest-Flüssig-Extraktion. Für die Analytik der PFC im Boden und Klärschlamm wird das Normverfahren DIN 38414-14:2011-08 mittels HPLC-MS/MS angewandt. Tab. 1 zeigt die Einzelverbindungen, die aktuell standardmäßig in Abhängigkeit von der Matrix am LfU bestimmt werden.

Die Bestimmung der PFC in den Biotaprobenn erfolgt in Anlehnung an das Normverfahren DIN 38414-14. Detailliertere Informationen zur Probenaufarbeitung und Messmethode finden sich bei Körner et al. (2016).

Tab. 1: Überblick über das PFC-Analytikspektrum am LfU für die verschiedenen Matrices.

Substanz	Abkürzung	Einteilung nach perfluorierter Kettenlänge	Substanzklasse	Wasser	Boden	Klärschlamm	Biota
Perfluorbutansäure	PFBA	kurzkettig	PFCA Perfluor-carbonsäuren	x	x	x	
Perfluorpentansäure	PFPeA			x	x	x	
Perfluorhexansäure	PFHxA			x	x	x	x
Perfluorheptansäure	PFHpA			x	x	x	x
Perfluoroctansäure	PFOA	langkettig		x	x	x	x
Perfluornonansäure	PFNA			x	x	x	x
Perfluordecansäure	PFDA			x	x	x	x
Perfluorundecansäure	PFUdA			x	x	x	x
Perfluordodecansäure	PFDoA			x	x	x	x
Perfluorbutansulfonsäure	PFBS	kurzkettig		PFSA Perfluor-sulfonsäuren	x	x	x
Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	langkettig	x		x	x	x
Perfluoroctansulfonsäure	PFOS		x		x	x	x
4:2-Fluortelomersulfonsäure	4:2 FTS	kurzkettig	n:2 FTS Fluortelomer-sulfonsäuren	x	x	x	x
6:2-Fluortelomersulfonsäure	6:2 FTS			x			
8:2-Fluortelomersulfonsäure	8:2 FTS	langkettig		x	x	x	x

3 Belastungssituation in Bayern

3.1 Oberflächengewässer

3.1.1 Erste Untersuchungen 2006 bis 2008

Im Jahr 2006 wurden für einen ersten Überblick Wasserproben aus 20 Oberflächengewässern und zwei Trinkwassertalsperren untersucht (Ergebnisse siehe Tab. A1 im Anhang). Besonders auffällig mit einer Summe der PFC von ca. 8.000 ng/L (davon PFOA 7.500 ng/L) war erwartungsgemäß die Messstelle an der Alz unterhalb der wasserrechtlich genehmigten Einleitung aus dem Chemiepark Gendorf (CPG), in dem verschiedene PFC produziert bzw. angewandt wurden und werden. Entsprechend der weiteren Verdünnung wurden für PFOA stromabwärts am Inn und an der Donau noch Konzentrationen von 100 bzw. 50 ng/L gemessen.

Auf Grund der breiten Verwendung gelangen PFC auch über kommunale Kläranlagen in die Umwelt. Demzufolge wurden PFC insbesondere bei Messstellen unterhalb von Siedlungsschwerpunkten und entsprechender Kläranlagen an vergleichsweise abflussschwachen Vorflutern (z. B. Regnitz, Sächsische Saale, Main) in einem niedrigen Konzentrationsbereich (Höchstwert für PFOS 42 ng/L) gefunden. Im Wasser der Trinkwassertalsperren Mauthaus und Frauenau konnten keine PFC größer der Nachweisgrenze von 1 bzw. 2 ng/L nachgewiesen werden.

Vom letzten Quartal 2007 bis zum letzten Quartal 2008 wurden an allen Überblicksmessstellen des bayerischen Gewässergütemessnetzes vierteljährlich Proben zur Ermittlung der flächendeckenden PFC-Kontamination entnommen. Im Regelfall waren nur Belastungen im ng/L-Bereich festzustellen, lediglich in Inn und Donau (Belastung über die Einleitungen des Chemieparks Gendorf in die Alz) konnten wie schon 2006 geringfügig höhere Messwerte bestimmt werden. Die Daten sind in Tab. A2 im Anhang zusammengefasst.

Im Rahmen des Fisch- und Muschelschadstoffmonitorings wurden PFOA und PFOS erstmals 2006 - 2007 untersucht (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2007). Dabei wurden auch Rückstellproben aus dem Jahr 2005 analysiert. Es konnte damals gezeigt werden, dass an allen Beprobungsstellen eine Grundbelastung der Fische mit PFOS gegeben war (Fischmuskulatur: Median 7,7 µg/kg, Maximum 137 µg/kg). PFOA wurde in Fischen aus der Alz bei Hohenwart in höheren Konzentrationen (Fischmuskulatur: Median 12 µg/kg; Maximum 48 µg/kg) als an den anderen untersuchten Stellen (Fischmuskulatur: Median 1,2 µg/kg Maximum 7,2 µg/kg) nachgewiesen. Der Vergleich der Ergebnisse der pathologischen und histopathologischen Untersuchung dieser Fische mit unbelasteten Vergleichsfischen ließ keinen kausalen Zusammenhang zwischen dem Auftreten bestimmter Organveränderungen und einer PFT-Belastung erkennen. Untersuchungsergebnisse des Forschungsvorhabens „Auswirkungen der Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) auf Regenbogenforellen“ wurden in der LfU-Reihe UmweltSpezial publiziert (Schwaiger et al. 2011a).

In einer Muschelprobe aus der Alz bei Hohenwart wurde 2006 eine PFOA-Konzentration von 65 µg/kg gemessen. 2007 betrug die Konzentration in Muscheln von dieser Probenahmestelle noch 3 µg/kg, wohingegen die PFOA-Konzentrationen in den Muscheln der anderen untersuchten Stellen meist unter der Bestimmungsgrenze von 0,2 µg/kg lagen. Die PFOS-Konzentrationen im Muschelweichkörper (Median 1,5 µg/kg, Maximum 6,4 µg/kg) waren geringer als in den Fischproben.

3.1.2 Monitoring im Rahmen der EG-Wasserrahmenrichtlinie

Mit der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG) wird der Gewässerzustand in Europa vorrangig nach ökologischen Qualitätskomponenten und verschiedenen in den Tochterrichtlinien 2008/105/EG und 2013/39/EU festgelegten chemischen Parametern bewertet. Ergänzend dazu fließen auch weitere allgemeine physikalisch-chemische Parameter und die sogenannten flussgebietspezifischen Schadstoffe in den Bewertungsprozess mit ein. Mit der Überführung dieser Vorgaben in nationales Recht hat Deutschland die Oberflächengewässerverordnung (OGewV 2011) im Jahr 2011 in Kraft gesetzt.

Im Rahmen der Neufassung der OGewV im Jahr 2016 wurden die Grenzwertlisten überarbeitet, wobei unter anderem auch PFOS in die Liste der prioritären Stoffe (Oberflächengewässerverordnung (2016), Anlage 8) aufgenommen wurde. Für den ubiquitär vorkommenden Stoff gilt eine Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnorm (JD-UQN) von 0,65 ng/L und eine zulässige Höchstkonzentration von 36.000 ng/L (ZHK-UQN) in Wasser und für Fische eine Biota-UQN von 9,1 µg/kg bezogen auf das Frischgewicht. In Form einer Fußnote wird geregelt, dass die JD-UQN in Wasser nur zugrunde gelegt werden darf, wenn die Erhebung von Biotadaten nicht möglich ist. Bei Überschreitung der UQN ist der chemische Zustand mit „nicht gut“ anzugeben und Maßnahmen sind verpflichtend umzusetzen.

Für alle übrigen PFC gibt es derzeit noch keine UQN. Dennoch werden die im Analysenumfang enthaltenen PFC (siehe Kapitel 2/ Tab. 1) bei den Untersuchungen mit erfasst.

Untersuchungen in der Wasserphase

2015 wurden die Untersuchungen an den 38 Überblicksmessstellen der Fließgewässer gemäß WRRL (Richtlinie 2000/60/EG) um das PFC-Spektrum (Einzelverbindungen siehe Kapitel 2/ Tab. 1) erweitert, um einen Überblick über die PFC-Belastung in der Wasserphase zu erhalten. Mit dem Messnetz der Überblicksüberwachung werden Messstellen untersucht, deren Abfluss bezogen auf das Einzugsgebiet bedeutend ist. Da an diesen Messstellen die Belastungen des Einzugsgebietes integriert wiedergegeben werden, ist damit auch eine Einschätzung des oberhalb liegenden Bereiches möglich. Die Überblicksmessstellen (siehe Abb. 4) sind dabei in drei Gruppen eingeteilt, die im Dreijahreszyklus untersucht werden. Innerhalb eines Jahres erfolgt die Beprobung an den Messstellen vierteljährlich.

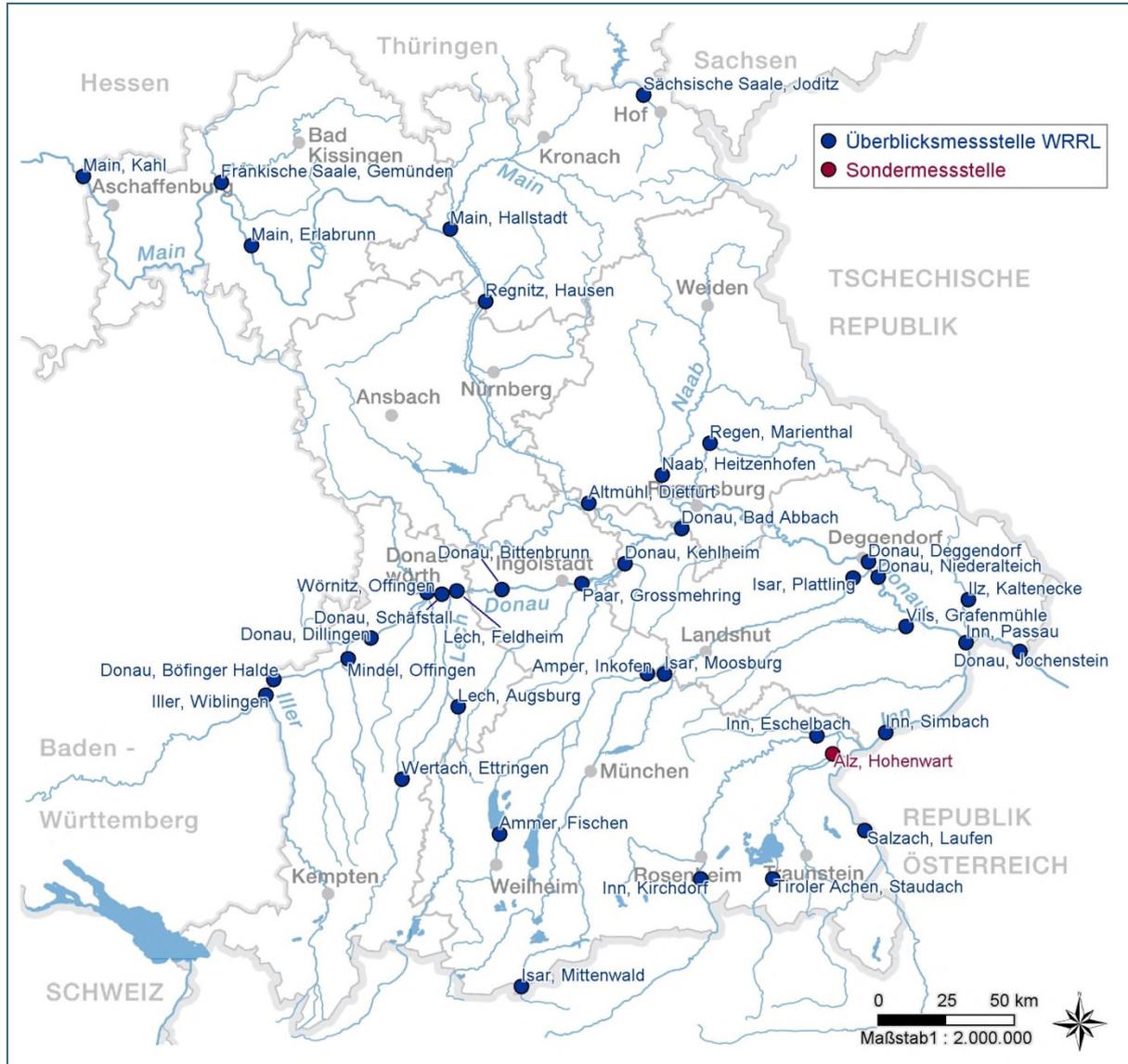


Abb. 4: Lage der 38 Überblicksmessstellen nach WRRL an den Fließgewässern, an denen seit 2015 vierteljährlich PFC in der Wasserphase untersucht wird. Der rote Punkt kennzeichnet die Lage der Sondermessstelle Alz/ Hohenwart, die durchgehend viermal jährlich beprobt wird.

Abb. 5 und Tab. A2 im Anhang fassen die Ergebnisse der 2015 bis 2017 durchgeführten Untersuchungen an den Fließgewässern zusammen. Die Konzentrationen der Einzelverbindungen zeigen jeweils den aus zwei bis vier einzelnen Untersuchungsergebnissen berechneten Mittelwert. Für die Berechnung des Mittelwerts wurden Konzentrationen kleiner der Bestimmungsgrenze (BG) gleich halbe Bestimmungsgrenze gesetzt. Wenn alle Untersuchungen eines Parameters unter der Bestimmungsgrenze liegen, wurde auf eine grafische Darstellung verzichtet.

An zwei Messstellen konnten keine PFC in Konzentrationen größer der BG nachgewiesen werden. An 24 Stellen liegt die PFC-Summenkonzentration im einstelligen ng/L-Bereich. Für die Messstelle Donau, Kelheim liegen noch keine Untersuchungsergebnisse vor.

Am häufigsten und in den höchsten Konzentrationen wurden PFOS und PFOA detektiert, gefolgt von den kurzkettigen perfluorierten Carbonsäuren PFHxA, PFPeA und PFBA. Auch die kurzkettige PFBS konnte an der Messstelle Hallstadt am Main in vergleichsweise hoher Konzentration nachgewiesen werden. Die langkettigen Parameter PFNA, PFDA und PFDoA wurden nur an wenigen Messstellen in

der Regel im Bereich der Bestimmungsgrenze nachgewiesen. Die teilfluorierten Fluortelomersulfonsäuren 6:2 FTS und 8:2 FTS wurden nur an der Messstelle Main, Kahl nachgewiesen und bei einer Untersuchung auch in deutlich hoher Konzentration. PFUnA und 4:2 FTS wurden in keiner Probe in Konzentrationen größer der BG von 1 ng/L gefunden.

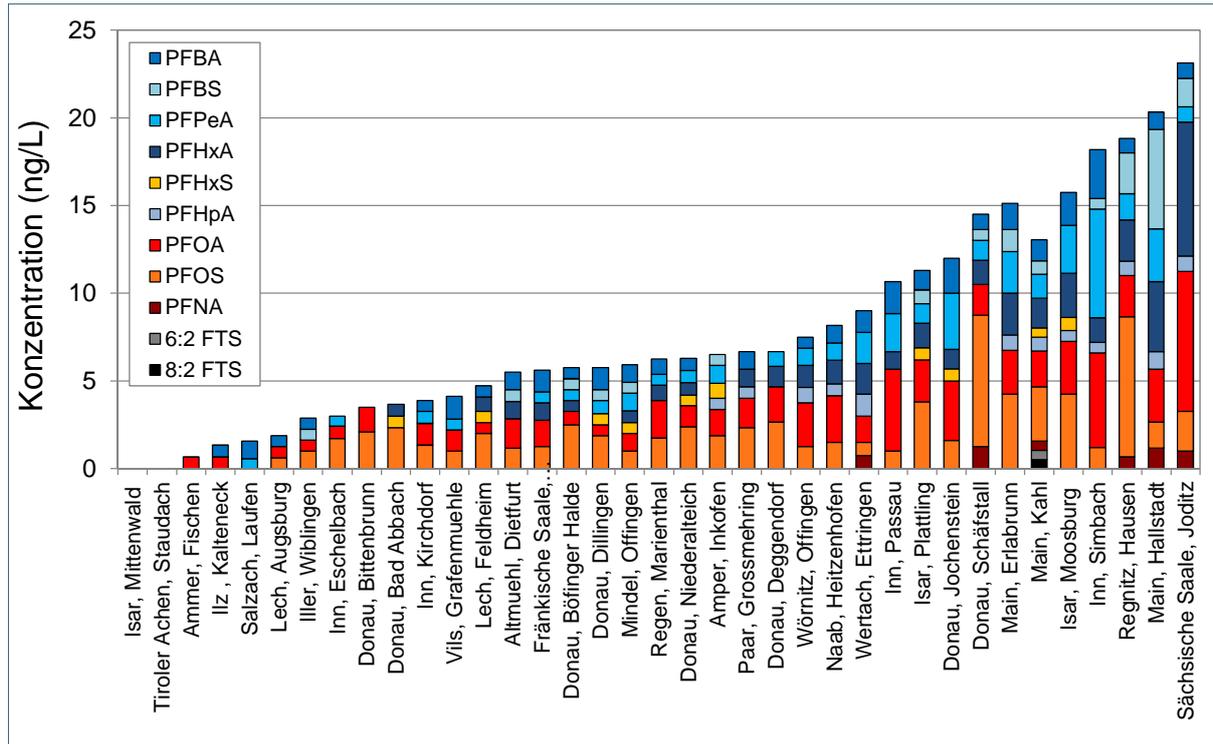


Abb. 5: Mittlere PFC-Konzentration in der Wasserphase der Fließgewässer, die 2015 bis 2017 beprobt wurden.

An 36 Messstellen wurden sowohl 2007/08 als auch in den Jahren 2015 bis 2017 PFC-Untersuchungen durchgeführt. Für diese Messstellen liegen aus den Untersuchungsjahren 2007/08 insgesamt 92 Messergebnisse vor, für die Untersuchungsjahre 2015 bis 2017 97 Messergebnisse. Die Bestimmungsgrenzen aller Einzelparameter lag in 2007/08 im Bereich von 1 bis 4 ng/L. In den jüngeren Ergebnissen wird die Bestimmungsgrenze von 1 ng/L sicher eingehalten. Da ein Vergleich der mittleren Konzentrationen der Einzelverbindungen und der PFC-Summe aus den unterschiedlichen Untersuchungsjahren aufgrund der unterschiedlichen Bestimmungsgrenze nicht zulässig ist, wurden die gemessenen Werte in Konzentrationsbereiche zusammengefasst und in Abb. 6 grafisch gegenüber gestellt. Da das Analytikspektrum 2007/08 acht Einzelverbindungen umfasste, beschränkt sich der Vergleich auf diese Substanzen.

Für die Einzelverbindungen PFOA und PFOS kann eine deutliche Abnahme der hohen Konzentrationen > 10 ng/L nachgewiesen werden (siehe Abb. 6). Dagegen bleiben die Konzentrationen der kürzerkettigen PFBS und PFHxA in etwa gleich. Die Ergebnisse deuten an, dass die geplanten bzw. bereits durchgeführten Regulierungen und Beschränkungen für PFOA und PFOS sich positiv auf die Konzentrationen im Gewässer auswirken und eine Abnahme bewirkt haben.

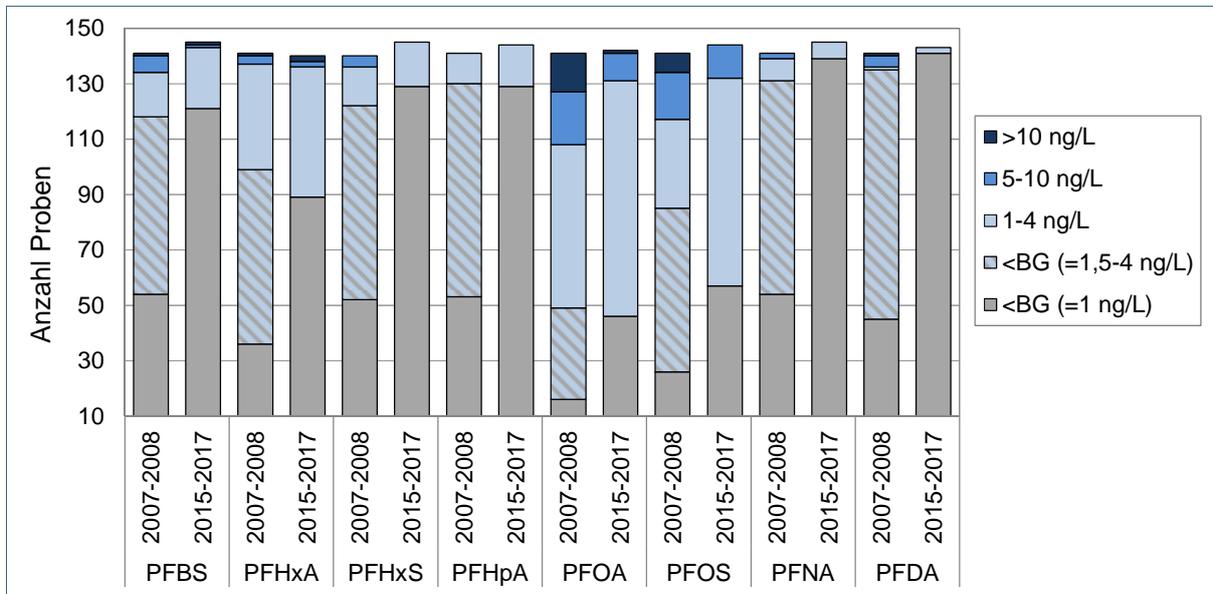


Abb. 6: Vergleich der mittleren PFC-Konzentrationsbereiche zwischen den Untersuchungsjahren 2007/08 und 2015/16/17 in der Wasserphase der Fließgewässer

Die Sondermessstelle Alz/ Hohenwart (in Abb. 4 rot gekennzeichnet) wird seit Mitte 2006 kontinuierlich viermal im Jahr beprobt, da sie im Abstrom des Chemieparks Gendorf liegt. Hier wurde ab 2008 das Analysespektrum zusätzlich auf ADONA erweitert, da diese Substanz seit diesem Zeitpunkt in der betroffenen Produktion als Ersatzstoff für PFOA eingesetzt wird.

Abb. 7 zeigt den zeitlichen Konzentrationsverlauf für die beiden Verbindungen. Seit 2006 geht die PFOA-Konzentration im Gewässer deutlich zurück. Seit 2016 liegt die PFOA-Konzentration im unteren zweistelligen ng/L-Bereich. Die ADONA-Konzentration schwankt nach anfänglich hohen Werten seit 2009 um einen Mittelwert von etwa 2.500 ng/L.

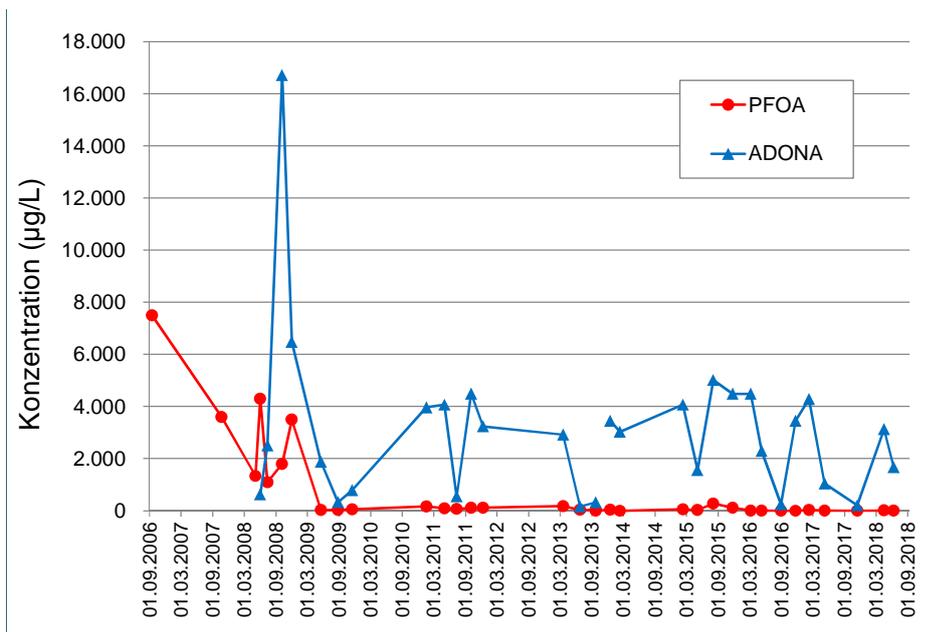


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der PFOA- und ADONA-Konzentration an der Messstelle Alz, Hohenwart.

Fischschadstoffmonitoring

Das bayerische Fischschadstoffmonitoring wird am LfU seit 1995 durchgeführt und dient der Erfassung von Schadstoffen, die sich aufgrund ihrer physiko-chemischen Eigenschaften in Organismen anreichern. Derzeit werden in Bayern circa 85 verschiedene Stoffe, davon 12 PFC (siehe Kapitel 2/ Tab. 1), in Fischen überwacht.

Das Fischschadstoffmonitoring basiert auf der Untersuchung natürlich vorkommender Fische in Fließgewässern und Seen (passives Monitoring). Bis 2010 wurden an allen Probenahmestellen jährlich wenige Fische eines gemischten Artenspektrums untersucht. Seit der Verabschiedung der WRRL 2000 und der „Richtlinie über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik“ 2008 wird das Instrument des „Biotamonitorings“ EU-weit angewendet. Aus diesem Grund war es nötig, die Probenahmestrategie in Deutschland zu vereinheitlichen. Die bayerische Probenahmestrategie des Fischschadstoffmonitorings wurde ab 2011 geändert und an die bundeseinheitlichen Vorgaben des RAKON-Arbeitspapiers IV.3 der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA-AO 2016) angepasst.

Seit 2011 ist vorgesehen, an jeder Probenahmestelle mindestens einmal in sechs Jahren zehn Fische derselben Art und desselben Alters zu untersuchen. In Fließgewässern werden derzeit in der Regel Aitel, in der Forellenregion Bachforellen sowie in Seen Hechte, Flussbarsche und ab 2017 überwiegend Renken beprobt, da diese Arten in den Gewässern des Monitoringprogramms in der Regel in genügender Anzahl vorkommen.

Die Entnahme der Fische erfolgt außerhalb der Laichzeit, zwischen Ende Juli bis Anfang November. Vor der Gewebeprobenentnahme für die chemische Analytik werden die Fische pathologisch-anatomisch sowie parasitologisch untersucht. Neben dem Gesundheitszustand werden auch Länge, Gewicht, Korpulenzfaktor, Alter, Geschlecht und Ernährungszustand bestimmt, um die Ergebnisse der chemischen Analysen besser interpretieren zu können.

Mit der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) vom Juni 2016 wurden die Umweltqualitätsnormen (UQN) der Europäischen Union in nationales Recht umgesetzt. Für Fische gilt eine PFOS-Biota-UQN von 9,1 µg/kg Fisch bezogen auf das Frischgewicht (FG). Seit 2012 wurden daher Fischproben aus dem Fischschadstoffmonitoring auf PFC untersucht. Die PFC-Analytik erfolgt in homogenen Muskulaturmischproben (Poolproben aus aliquoten Muskulaturanteilen aller Fische einer Befischung, Stelle, Art und Größenklasse). Daher liegt für jede Probenahmestelle in der Regel mindestens einmal in sechs Jahren ein Analysenwert pro Parameter vor. Derzeit liegen die Ergebnisse bis einschließlich 2016 vor.

Das Fischschadstoffmonitoring wurde zwischen 2012 und 2016 an 59 Messstellen an Fließgewässern und zwölf Messstellen an Seen durchgeführt. Trotz der relativ geringen Anzahl an Seenprobennahmen wurden verschiedene Seentypen beprobt: vier natürliche Seen im Alpenvorland (Bodensee, Weißensee, Alpsee und Starnberger See), zwei flache Stauseen (Altmühlsee und großer Brombachsee), zwei Trinkwassertalsperren (Mauthaus und Frauenau) und zwei Tagebaurestseen (Kappensee und Steinberger See).

Im Rahmen des Fischschadstoffmonitorings werden verschiedene Messnetze unterschieden: Überblicksmessstellen, an denen prioritäre Stoffe wie PFOS auch aufgrund der Vorgaben durch die OGewV untersucht werden müssen, Stellen des Landesmessnetzes und Stellen, die aufgrund wasserwirtschaftlicher Erfordernisse einmalig oder im Rahmen des Projektes Pure Alps untersucht werden. Die verschiedenen Messstellen zeigen Abb. 8 und Abb. 9.

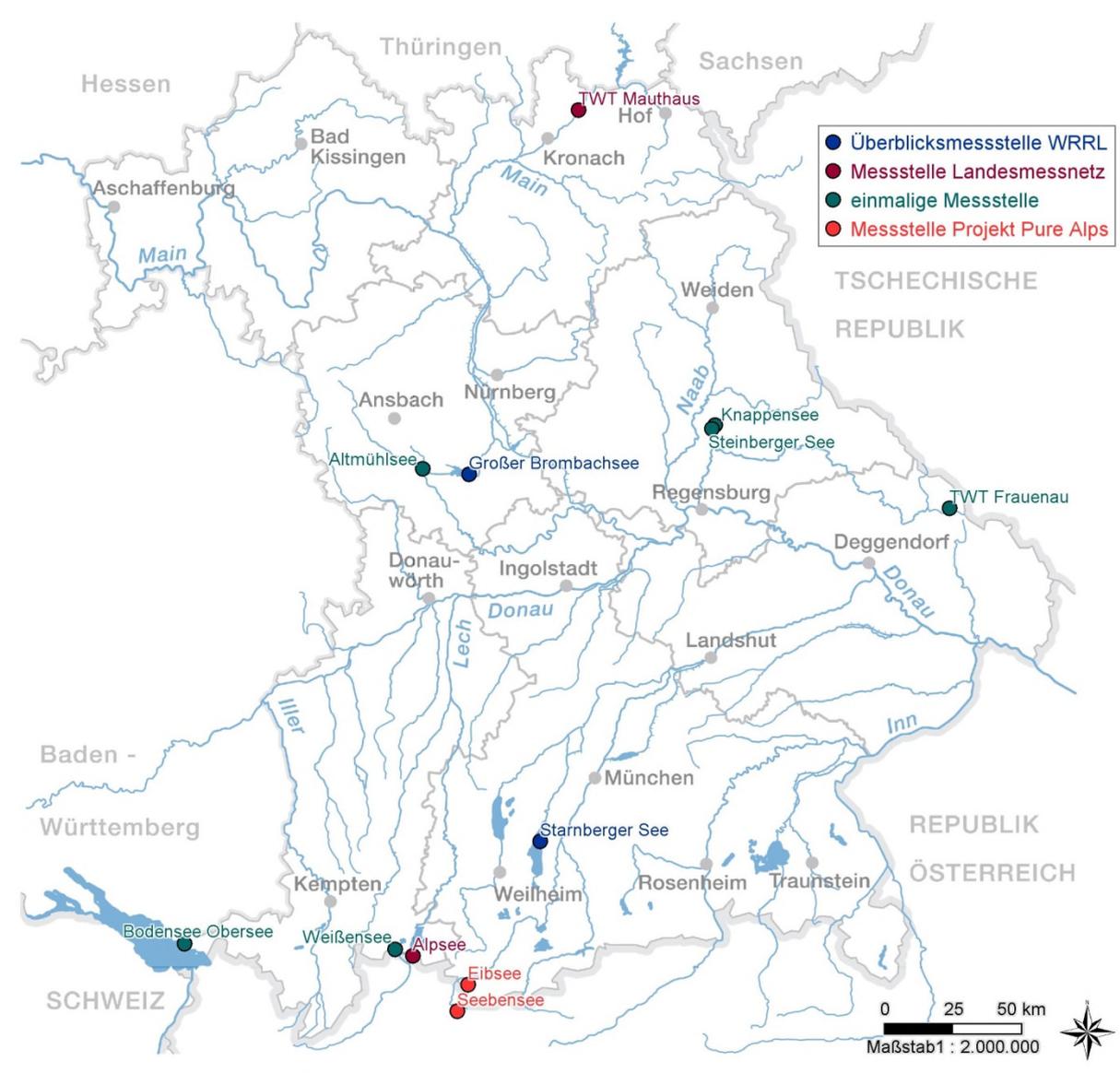


Abb. 8: Lage der Probenahmestellen des bayerischen Fischschadstoffmonitorings an Seen. Untersuchungszeitraum 2012 – 2016.



Abb. 9: Lage der Probenahmestellen des bayerischen Fischschadstoffmonitorings an Fließgewässern. Untersuchungszeitraum 2012 – 2016.

Im Untersuchungszeitraum von 2012 bis 2016 wurden in ca. 100 Muskulaturpoolproben je 12 perfluorierte Verbindungen bestimmt. Die Untersuchungsergebnisse fasst Tab. A3 im Anhang zusammen. Die mittlere PFC-Belastung der untersuchten Fische aus den Seen war insgesamt niedriger als die Belastung der Fische aus Fließgewässern.

Von den untersuchten Einzelverbindungen konnten nur sieben langkettige Verbindungen in Konzentrationen größer der Bestimmungsgrenze von $0,5 \mu\text{g}/\text{kg}$ nachgewiesen werden. In keiner der untersuchten Proben konnten die kürzerkettigen Verbindungen 4:2 FTS, PFBS, PFHxS, PFHxA und PFHpA quantifiziert werden. 8:2 FTS konnte nur 2012 in drei Aitelmuskulaturproben aus der Alz bei Hohenwart ($0,53 \mu\text{g}/\text{kg}$), dem Inn bei Dornitzen ($1,0 \mu\text{g}/\text{kg}$) und der Sächsischen Saale bei Joditz ($2,1 \mu\text{g}/\text{kg}$) quantifiziert werden. PFOA konnte ebenfalls nur 2012 in zwei Aitelmuskulaturproben aus dem Inn bei Dornitzen ($0,54 \mu\text{g}/\text{kg}$) und dem Main bei Kahl ($16 \mu\text{g}/\text{kg}$) mengenmäßig bestimmt werden. An der Beprobungsstelle Alz, Hohenwart war die PFOA-Konzentration in den Aitelmuskulaturpoolproben 2012 und 2016 kleiner als die Bestimmungsgrenze von $0,5 \mu\text{g}/\text{kg}$. 2007 betrug die PFOA-Konzentration in der Muskulatur eines Aitel hier $7,8 \mu\text{g}/\text{kg}$. Die PFNA-Konzentrationen konnten in acht Aitelmuskulaturproben aus der Sächsischen Saale bei Joditz

(0,5 µg/kg), der Donau bei Dillingen 2015 (0,54 µg/kg), dem Brombach bei der Mandlesmühle 2015 (0,70 µg/kg), dem Inn bei Dornitzen 2012 (2,1 µg/kg) und 2016 (0,72 µg/kg), der Alz bei Hohenwart 2012 (2,1 µg/kg) und 2016 (0,89 µg/kg) sowie dem Main bei Kahl 2012 (2,8 µg/kg) bestimmt werden.

Die Ergebnisse zur Konzentration von PFDA, PFUnA, PFDoA und PFOS in der Fischmuskulatur sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Tab. 2: Konzentration von perfluorierten Verbindungen im Muskelgewebe von Fischen. Ergebnisse für die in den Jahren 2012-16 untersuchten Fische aus bayerischen Gewässern

Verbindung	Median (µg/kg)	Min (µg/kg)	Max (µg/kg)	Mittel (µg/kg)	Stichprobenanzahl n	Anzahl > 0,5 µg/kg
PFOS	2,8	< 0,5	26	4,2	100	92
PFDA	0,6	< 0,5	32	1,8	100	61
PFUnA	< 0,5	< 0,5	21	1,3	100	38
PFDoA	< 0,5	< 0,5	25	1,4	93	32

Die PFOS-Konzentration betrug nur in 7 % der untersuchten Muskulaturpoolproben weniger als die Bestimmungsgrenze. An zehn der 71 im Zeitraum 2012 bis 2016 untersuchten Messstellen überschritten die PFOS-Konzentrationen in der Fischmuskulaturmischprobe die UQN von 9,1 µg/kg zumindest an einem Probenahmetermin oder in einer Fischart. Sie sind in Abb. 10 mit einem roten Pfeil markiert.

Die PFOS-Konzentration in den untersuchten Muskulaturpoolproben einer Art war unabhängig von der Fischlänge, dem Fischgewicht und dem Fischalter und ist daher nicht abgebildet. Wurden in einem Jahr und Gewässer sowohl Hechte als auch Flussbarsche untersucht, so war die PFOS-Konzentration in der Muskulatur der Barsche etwa viermal höher als in der Muskulatur der Hechte (Starnberger See, Weißensee).

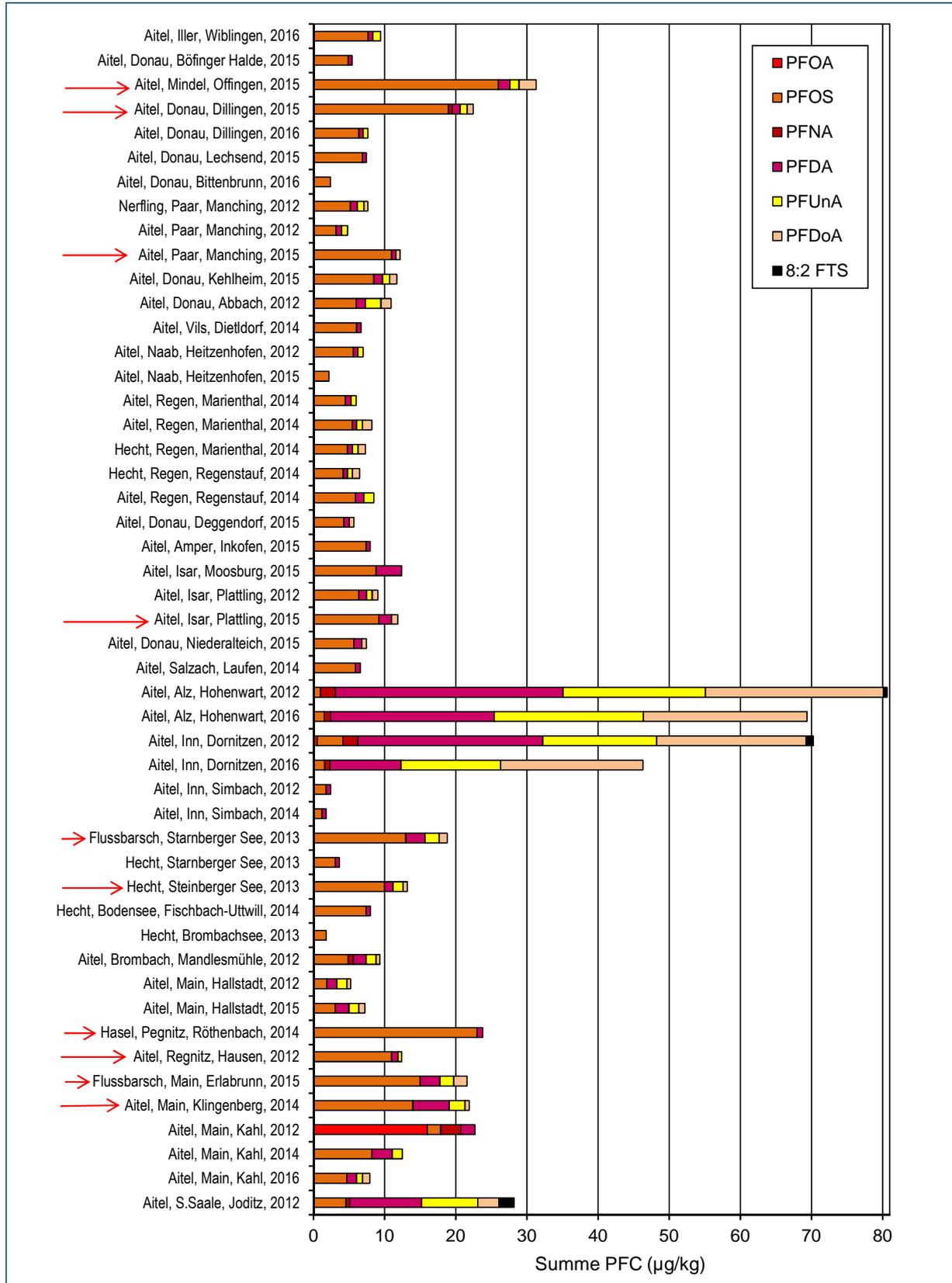


Abb. 10: PFC-Konzentrationen in der Fischmuskulatur. Ergebnisse der in den Jahren 2012-16 untersuchten Poolproben aus bayerischen Gewässern. Dargestellt sind alle Messstellen, bei denen mindestens eine Verbindung mit einer Konzentrationen > 4,5 µg/kg (> ½ PFOS UQN) gefunden wurde. Zusätzlich wurden Stellen aufgenommen, die im Gewässerlängsverlauf unterhalb oder oberhalb dieser Messstellen liegen. Rote Pfeile: Überschreitung der Biota-Umweltqualitätsnorm (UQN) für PFOS von 9,1 µg/kg.

Unterschiedliche Fischarten und Altersklassen reichern Stoffe aufgrund ihrer Nahrungswahl und Lebensweise unterschiedlich stark an. Ein direkter Vergleich der PFOS-Gehalte der Fische aus dem Untersuchungszeitraum 2005 bis 2007 mit den Ergebnissen aus 2012 bis 2016 ist aufgrund der unterschiedlichen Probennamestellen und Fischarten, sowie der geringeren Individuenzahl pro Art im Untersuchungszeitraum 2005 bis 2007 nicht möglich.

Zustandsbewertung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie: Vergleich von PFOS-Konzentrationen in Wasser und Fischen

Bis Ende 2018 ist geplant, an allen Überblicksmessstellen nach WRRL (Seen und Fließgewässer) Fische auf ihren PFOS-Gehalt in der Muskulatur zu untersuchen. An 31 der 38 bayerischen Überblicksmessstellen an Fließgewässern nach WRRL wurde PFOS sowohl in Wasser- als auch in Fischmuskulaturproben untersucht. In Tab. A4 im Anhang sind die Ergebnisse gegenübergestellt und in Abb. 11 grafisch dargestellt.

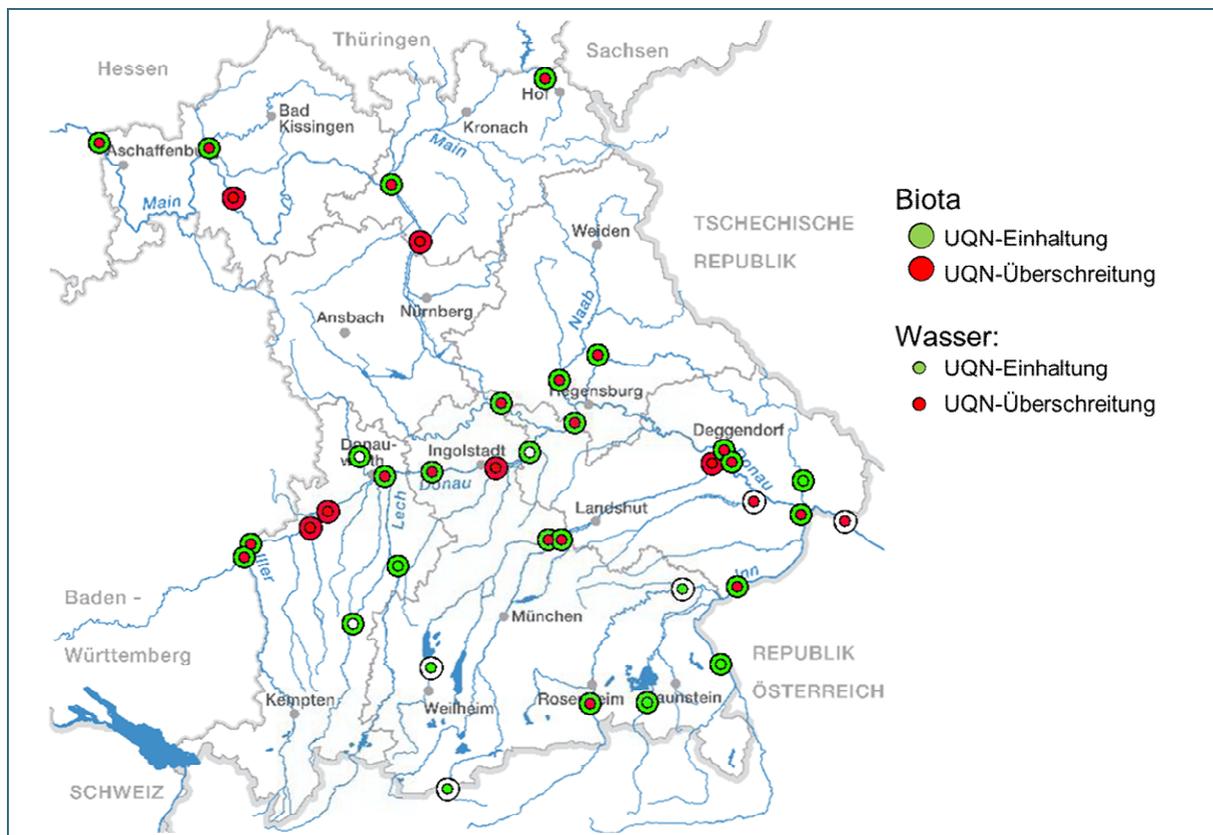


Abb. 11: Zustandsbewertung für die Überblicksmessstellen an Fließgewässern. Einhaltung bzw. Überschreitung der PFOS-UQN in Wasser und Fischen (weiße Markierung: Untersuchungsergebnisse in der Wasserphase bzw. in Fischen liegen noch nicht vor.)

An 31 der 38 Überblicksmessstellen an Fließgewässern wurde die UQN für PFOS eingehalten, weil in der Regel die UQN in Fischen eingehalten war und nach OGewV der Wasserwert nur herangezogen wird, wenn keine Fische untersucht wurden. Nur an sieben Messstellen, die im Voralpenland oder im Bayerischen Wald liegen, wurde die JD-UQN in der Gesamtwasserphase eingehalten. An allen Stellen, an denen die UQN in Biota überschritten wurde, wurde sie auch in der Wasserphase überschritten, sofern diese untersucht wurde (Mindel bei Offingen, Donau bei Dillingen, Main bei Erlabrunn, Regnitz bei Hausen, Paar bei Manching und Isar bei Plattling). Für zwei Messstellen mit Überschreitung der JD-UQN in Wasser liegen derzeit noch keine Ergebnisse in Fischen vor. Die ZHK-UQN wurde in allen Untersuchungen eingehalten.

3.1.3 Monitoring Projekt MOSAIC

Im Jahr 2018 startete das Monitoring Projekt MOSAIC (Monitoring-Offensive Schadstoffe). Dabei soll ein bayernweit flächendeckendes Monitoring der prioritären und flussgebietspezifischen Schadstoffe, die in der Wasserphase gemessen werden, nach Vorgaben der Oberflächengewässerverordnung (OGewV, Stand 20.06.2016) aufgesetzt werden. Ziel ist die chemische Bewertung von knapp 2/3 der bayrischen Oberflächenwasserkörper (ca. 540 Messstellen) innerhalb von sechs Jahren, um einen Überblick über die Nachweise und die Konzentrationen von Schadstoffen zu erhalten und ein vollständiges Bild bezüglich der Konzentrationen in der Wasserphase an die EU nach Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) melden zu können. Pro Jahr werden ca. 90 Oberflächenwasserkörper untersucht, wobei im Vergleich zum Überblickmessnetz auch kleinere Fließgewässer beprobt werden. Im Jahr 2018 werden 92 Messstellen (siehe Abb. 12) auf 255 Parameter analysiert. Im Untersuchungsumfang im Projekt sind 10 PFC (siehe Tab. 3) enthalten, die vierteljährlich gemessen werden.



Abb. 12: Lage der MOSAIC-Messstellen, die 2018 vierteljährlich auf PFC untersucht werden

Die Ergebnisse der ersten zwei Quartale im Jahr 2018 zeigen regionale Unterschiede. So sind die höchsten PFOS-Werte, deren Einzelwerte über dem zulässigen durchschnittlichen Jahreshöchstwert von 0,65 ng/L liegen (JD-UQN), eher zentral in Bayern, in der Nürnberger, Ingolstädter und Landshuter Region zu verzeichnen. Hingegen sind im Voralpenraum kaum erhöhte Befunde zu vermerken. Da-

bei ist zu beachten, dass es sich bei den Ergebnissen um vorläufige Ergebnisse aus dem Projekt handelt und diese noch eine finale Plausibilisierung benötigen. In Tab. 3 ist ein Überblick über die Daten der ersten zwei Quartale 2018 dargestellt. Als Konzentrationen der Einzelverbindungen wird jeweils der Mittelwert aller 92 Messstellen und deren zwei Quartalswerte verwendet. Für die Berechnung des Mittelwerts wurden Konzentrationen, die kleiner der Bestimmungsgrenze (BG) sind, gleich der Hälfte der Bestimmungsgrenze gesetzt (0,5 bzw. 0,1 ng/L für PFOS). Mittelwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind dabei nicht dargestellt.

Tab. 3: Überblick des PFC-Analytikspektrums im MOSAIC-Projekt mit Bestimmungsgrenzen (BG), Häufigkeiten und Konzentrationen

Verbindung	BG (ng/L)	Anzahl Messwerte	Nachweishäufigkeit (%)	Mittelwert (ng/L)	Maximum (ng/L)
PFBA	1	184	32	1,5	67
PFBS	1	184	10	1,2	41
PFPeA	1	184	8	-	27
PFHxA	1	184	18	1,1	26
PFHxS	1	184	8	1,7	91
PFHpA	1	184	4	-	14
PFOA	1	184	16	1,5	130
PFOS	0,2	184	80	4,1	190
PFNA	1	184	3	1,2	65
PFDA	1	184	1	-	2

Wie auch in Abb. 13 zu sehen, wurde PFOS mit Abstand am häufigsten nachgewiesen (80 % der Proben zeigten Befunde über der Bestimmungsgrenze von 0,2 ng/L und einem Median von 0,4 ng/L), gefolgt von PFBA, PFHxA und PFOA (32 %, 18 % bzw. 16 % Nachweishäufigkeit). Die kurzkettige PFBA tritt dabei am zweit häufigsten auf, wohingegen PFOA nach den Regulierungsmaßnahmen seltener auftritt. PFOS liegt zudem in den höchsten Konzentrationen von bis zu 190 ng/L vor, gefolgt von PFOA und PFHxS mit Maximalwerten von 130 und 91 ng/L. Die höchsten PFOS-Konzentrationen stammen dabei von bekannten Altlasten. Die für PFOS zulässige Höchstkonzentration (ZHK-UQN) von 36 µg/L wurde an keiner Messstelle überschritten.

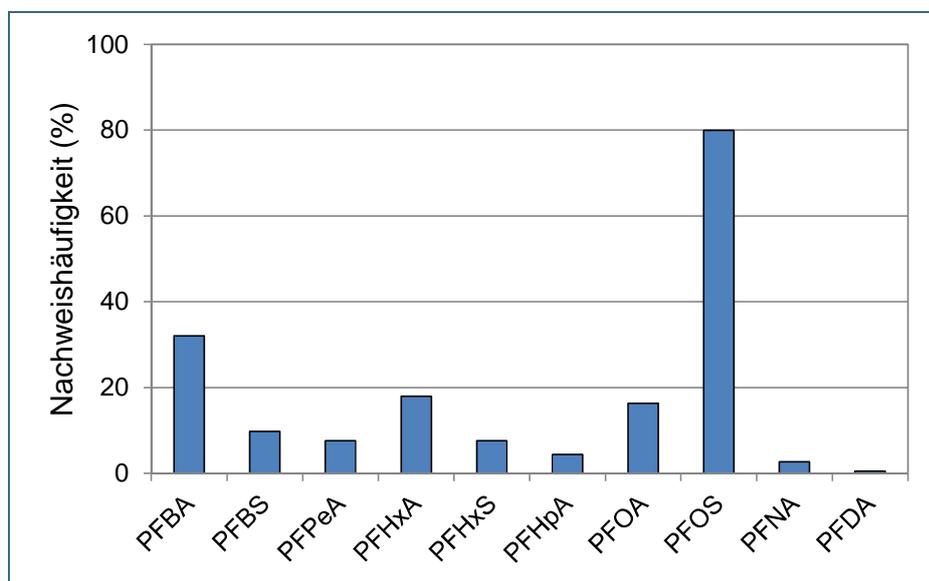


Abb. 13: Anteile der Nachweise von PFC in Oberflächenwasserproben oberhalb der Bestimmungsgrenze in den ersten zwei Quartalen 2018.

3.1.4 Muschelschadstoffmonitoring

Das bayerische Muschelschadstoffmonitoring wird am LfU seit 2000 durchgeführt. Es dient wie das Fischschadstoffmonitoring der Erfassung von Schadstoffen, die sich aufgrund ihrer physikochemischen Eigenschaften in Organismen anreichern. Derzeit werden in Bayern circa 50 verschiedene Stoffe davon 12 PFC (siehe Kapitel 2/ Tab. 1) in Muscheln überwacht.

Das Muschelschadstoffmonitoring ist ein aktives Monitoring, d.h. es werden Muscheln für einen bestimmten Zeitraum in einem Gewässer exponiert und anschließend auf ihren Schadstoffgehalt untersucht. Die Exposition der Muscheln erfolgt für ein halbes Jahr, jeweils im Frühjahr (meist April) und im Herbst (meist Oktober). Das Monitoring wird mit *Dreissena polymorpha* (Dreikant- oder Wandermuschel) durchgeführt. Da es sich um eine invasive Art handelt, die nicht weiter verbreitet werden soll, wurden nur bereits von *D. polymorpha* besiedelte Gewässer ins Monitoringprogramm aufgenommen. Die exponierten Dreikantmuscheln werden kurz vor der Exposition von Tauchern im Starnberger See gesammelt. Für das Monitoring werden Muscheln einer einheitlichen Größenklasse von circa 20 mm Länge ausgewählt.

Mindestens alle drei Jahre sind im Rahmen des Trendmonitoring nach OGeWV unter anderem auch für PFOS Untersuchungen in Biota oder Schwebstoff durchzuführen. Ein Monitoring mit Muscheln liefert, im Gegensatz zum Fischschadstoffmonitoring räumlich und zeitlich genau zuzuordnende Analysenwerte, da die exponierten Muscheln sich nicht frei im Gewässer bewegen können. Muschelproben sind hinsichtlich Art, Alter und Größe im Vergleich zu den Fischproben einfacher zu standardisieren. Die Probenahme-strategie ist in Bayern seit 2000 im Wesentlichen unverändert. In den 2006 und 2007 durchgeführten Untersuchungen lagen die PFOS-Gehalte in den untersuchten Muschelproben in einem Konzentrationsbereich, der analytisch gut bestimmbar war (0,4 – 6,4 µg/kg). Daher wird derzeit überprüft, ob das Biota-Trendmonitoring nach WRRL mit Dreikantmuscheln durchgeführt werden kann.

2015 und 2016 wurden an den sieben Trendmonitoringmessstellen (Isar bei Altheim, Inn bei Simbach, Naab bei Heitzenhofen, Donau bei Jochenstein, Regnitz bei Hausen, Main bei Hallstadt, Main bei Kahl) versuchsweise auch PFC in Muscheln untersucht. Die PFC-Analytik erfolgte in homogenen Weichkörpermischproben (Poolproben von ca. 50 Muscheln). Die Trendmessstellen wurden jeweils im Frühjahr und Herbst beprobt. Nur an drei der sieben untersuchten Messstellen konnte eine PFOS-Belastung von > 0,5 µg/kg in den Muscheln nachgewiesen werden (siehe Tab. 4). An allen anderen Messstellen und für alle anderen gemessenen zwölf PFC-Einzelverbindungen lagen die Konzentrationen unterhalb oder an der Bestimmungsgrenze von 0,5 µg/kg.

Messstelle	PFOS (µg/kg)	PFDA (µg/kg)
Inn bei Simbach	< 0,5 – 0,57	< 0, 5
Isar bei Altheim	0,52 – 1,4	< 0,5 - 0,51
Regnitz bei Hausen	0,56 – 1,3	< 0, 5

Tab. 4: Konzentrationen (µg/kg) von PFOS und PFDA im Weichkörper von Muscheln aus bayerischen Gewässern. Ergebnisse der Jahre 2015 – 2016.

Daher wurden versuchsweise die in der Probenbank des LfU eingelagerten Muschelproben der Herbstprobennahmen von der Isar bei Altheim rückblickend auf PFC analysiert. Die Auswertung der Daten erfolgte mit einem Excel-basierten Software Tool (LOESS-Trend) des deutschen Umweltbundesamtes. Obwohl die PFOS-Konzentration in den Muscheln 2016 deutlich geringer war als 2006, konnte bisher kein signifikant abnehmender Trend nachgewiesen werden (siehe Abb. 14). Auf keinen Fall ist aber eine Zunahme der PFOS-Konzentration in den Muscheln zu beobachten.

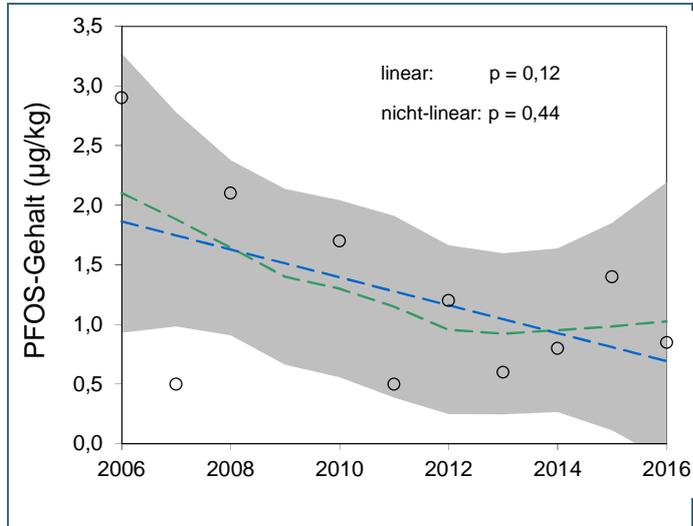


Abb. 14: PFOS-Konzentration ($\mu\text{g}/\text{kg}$) im Weichkörper von *Dreissena polymorpha* aus der Isar bei Altheim. Ergebnisse der Herbstprobennahmen der Jahre 2006 – 2016.

Die Auswertung der Daten erfolgte mit einem Excel-basierten Software Tool (LOESS-Trend) des deutschen Umweltbundesamtes.

Kreise: Messergebnisse

blau gestrichelt: linearer Trend, nicht signifikant

grün gestrichelt: nicht-linearer Trend (LOESS-Funktion), nicht signifikant

Grau: 95 %-Konfidenzintervall der LOESS-Funktion

3.2 Grundwasser

3.2.1 Erste Untersuchungen 2007/2008

Aufgrund der 2007 zunächst flächendeckend durchgeführten Grundwasseruntersuchungen, die in der Fläche nur eine sehr geringe bis gar keine Belastung zeigten, wurde seitdem in Bayern ein risikobasiertes Grundwassermonitoring durchgeführt, bei dem gezielt im Bereich potenzieller Kontaminationen (Flughäfen, Raffinerien, Großindustrie etc.) untersucht wurde.

2007 wurde zunächst ein bayernweites Grundwassermonitoring durchgeführt. Dafür wurden 51 Grundwassermessstellen soweit möglich risikobasiert ausgewählt. Die Auswahl der Messstellen erfolgte nach folgenden Kriterien:

- Wasserfassungen mit Uferfiltratanteil und einer Entnahmemenge > 300.000 Kubikmeter pro Jahr
- Messstellen, in deren Einzugsgebiet erhöhte PAK-Werte in Böden festgestellt wurden (Hinweis auf atmosphärische Einträge)
- Messstellen, in deren Einzugsgebiet in den Jahren 2001 bis 2006 wiederholt mit Klärschlamm gedüngt wurde
- weitere Messstellen aus dem bayerischen Landesmessnetz zur Abdeckung der Landesfläche
- eine Messstelle im Einzugsgebiet einer Christbaumkultur

Abb. 15 zeigt die räumliche Verteilung der Brunnen, Grundwasserpegel und Quellen, die auf die fünf Verbindungen PFHxA, PFHpA, PFOA, PFDA und PFOS untersucht wurden.



Abb. 15: Lage der Grundwassermessstellen, die 2007 beprobt wurden.

PFOS wurde in 14 Grundwässern in Konzentrationen von <1 ng/L bis 20 ng/L nachgewiesen, wobei es sich bei diesen fast ausschließlich um uferfiltratbeeinflusste Grundwassermessstellen handelt. PFOA konnte zwar 23-mal nachgewiesen werden, allerdings in niedrigeren Konzentrationen (<1 – 4,1 ng/L) und bei mehr als der Hälfte dieser Proben waren auch die kurzkettigen Homologen in geringeren Konzentrationen zu finden. PFDA war in keinem Grundwasser enthalten. Alle Grundwasserergebnisse sind im Anhang Tab. A5 aufgeführt.

Zusätzlich zum flächenhaften Monitoring wurden im Bereich Gendorf Grundwasserproben entnommen. Hier wurde seit den 60er-Jahren PFOA hergestellt bzw. verwendet, verarbeitet und über den Luft-, Grundwasser- und Abwasserpfad in die Umwelt eingetragen. Im Grundwasser fanden sich auffällige Werte für PFOA und die homologen Carbonsäuren PFHxA und PFHpA. Es wurden PFOA-Konzentrationen von 29 ng/L bis 4.300 ng/L bestimmt. Für PFHxA und PFHpA wurden Werte zwischen <10 ng/L und 550 ng/L gefunden. PFOS spielt in Proben aus dem Raum Gendorf eine stark untergeordnete Rolle (Konzentrationsbereich: nicht nachweisbar – 3,4 ng/L).

Sieht man vom Sonderfall Gendorf ab ist festzustellen, dass in Bayern in der Fläche – wenn überhaupt – nur sehr geringe PFC-Konzentrationen im unteren ng/L-Bereich im Grundwasser nachweisbar sind.

Neben dem Sonderfall Gendorf liegen die bislang bekannten PFC-Grundwasserverunreinigungen in Bayern im Umfeld von Flughäfen, Raffinerien und der chemischen Industrie. Die Ursache für die erhöhten PFC-Konzentrationen im Grundwasser können dabei überwiegend auf den langjährigen Einsatz PFC-haltiger Schaumlöschmittel bei Löschübungen und Brandeinsätzen zurückgeführt werden. An den betroffenen Standorten laufen derzeit Erkundungen zur Gefährdungsabschätzung und Vorbereitung von Sanierungsmaßnahmen bzw. wurde bereits mit ersten Maßnahmen begonnen, um einen weiteren PFC-Eintrag in die Umwelt zu verringern (siehe auch Kapitel 4).

3.2.2 Uferfiltratbeeinflusste Wassergewinnungen

Die Stoffgruppe der PFC wird neben weiteren Indikatorsubstanzen als Hinweis auf anthropogene Beeinflussung eines Wasserkörpers verwendet. Inwieweit Trinkwassergewinnungen aus Uferfiltrat qualitativ durch das angekoppelte Oberflächengewässer beeinflusst werden, untersucht das Projekt „Klimaanpassung und Wasserversorgung in Bayern“ im Zeitraum 2015 – 2020. Insgesamt werden neun Stoffgruppen mit anthropogenen Quellen untersucht, u. a. die PFC.

Regelmäßige Untersuchungen oder Stichtagsmessungen finden nicht statt, vielmehr handelt es sich bei der Probenahme um bayernweite Stichproben an uferfiltratbeeinflussten Wassergewinnungsanlagen (siehe Abb. 16). Eine Beprobung des Grund-/Rohwassers geht dabei immer mit der hydrochemischen Charakterisierung des Oberflächengewässers einher. Ebenso wurden die Abflussverhältnisse des Oberflächengewässers zum Zeitpunkt der Probenahme registriert.



Abb. 16: Lage der Beprobungsstellen im Projekt Klimaanpassung und Wasserversorgung, Untersuchungszeitraum 2015 - 2018 (rot – Oberflächenwasser, gelb – Grundwasser, orange – Rohwasser).

Zustand des begleitenden Oberflächengewässers

Bisher wurden bayernweit 101 Oberflächenwasserproben an 62 verschiedenen Standorten im Überblicksverfahren auf 20 verschiedene PFC untersucht. Zusätzlich zu den in Kapitel 2/ Tab. 1 erwähnten PFC wurde auf Perfluorpentansulfonsäure (PFPeS), Perfluorheptansulfonsäure (PFHpS), Perfluordecansulfonsäure (PFDS), Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA), 7H-Dodecafluorheptansäure (HPFHpA), 2H,2H-Perfluordecansäure (H2PFDA), und 2H,2H,3H,3H-Perfluorundecansäure (H4PFUnA) untersucht. Mindestens eine PFC-Verbindung oberhalb der Bestimmungsgrenze von 1 ng/L wurde in 83 Proben nachgewiesen. Die Gesamtkonzentration der PFC lag im Mittel bei 24 ng/L (Median 8 ng/L). Proben mit mehr als 100 ng/L PFC traten im Umfeld bekannter PFC-Fälle auf.

Nach der Häufigkeit ihres Auftretens wurden die Verbindungen PFOS, PFOA, PFHxA, PFBS, PFBA, PFHxS, PFPeA, H4PFOS und PFHpA jeweils mehr als zehnmals nachgewiesen. Keine Befunde gab es für PFDoA, H2PFDA und H4PFUnA. Weitere PFC wurden in Einzelfällen detektiert.

Die größte Anzahl unterschiedlicher PFC-Verbindungen in einer Probe wurden im Abstrom der PFC-Fälle Flughafen Nürnberg (n = 11) bzw. Militärflughafen Ansbach (n = 10) nachgewiesen. Mit Ausnahme von PFOA/PFOS sind die kürzerkettigen PFC im Umweltmedium Wasser häufiger vertreten (siehe Abb. 17).

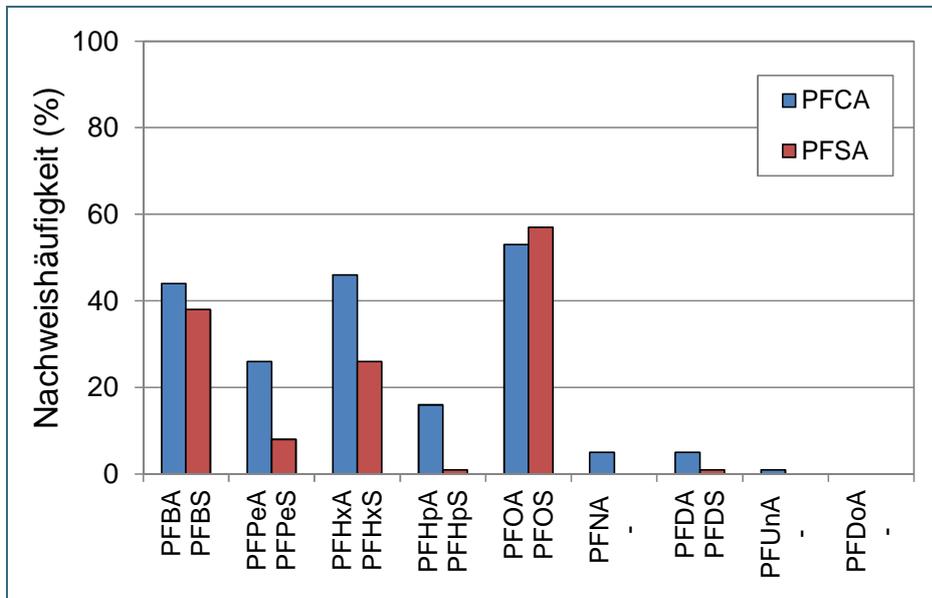


Abb. 17: Anteile der Nachweise von PFC in Oberflächenwasserproben oberhalb der Bestimmungsgrenze.

Über einen Zeitraum von 5 Monaten (April – September 2016) liegen Ergebnisse der Spurenstoffbelastung aus Tages- bzw. Wochenmischproben an der Fränkischen Rezat, Wassermungenau vor. Neben den kontinuierlich erfassten Parametergruppen Pharmaka, Kontrastmittel und Süßstoffe wurde phasenweise PFC bestimmt (siehe Abb. 18, n = 10). Mit Konzentrationen von 17 – 51 ng/L und bis zu 10 verschiedenen PFC ist die Fränkische Rezat deutlich beaufschlagt. Eine Korrelation zwischen Abfluss und hydrochemischer Beschaffenheit wurde nicht festgestellt.

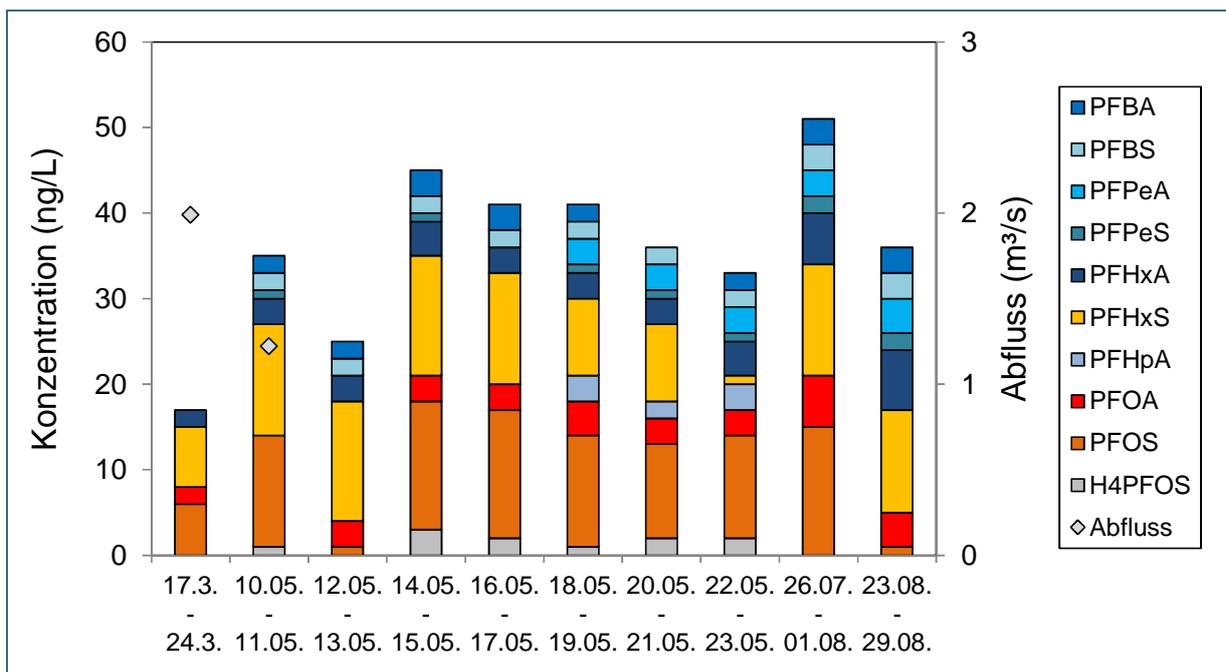


Abb. 18: PFC in der Fränkischen Rezat. In den Wochen- bzw. Tagesmischproben wurden zwischen 4 und 10 verschiedene PFC-Verbindungen im Untersuchungszeitraum April bis September 2016 nachgewiesen.

Uferfiltratbeeinflusste Roh- und Grundwasserproben

Bei nahe gelegenen Verdachts- bzw. Schadensfällen oder dem Nachweis von PFC im Oberflächengewässer wurde das Rohwasser uferfiltratbeeinflusster Wassergewinnungsanlagen auf PFC untersucht. Dies war bisher bei 34 Proben der Fall, davon 32 mit dem Nachweis von PFC. Vereinzelt wurden auch Grundwassermessstellen beprobt.

Mit Ausnahme der Grundwasserproben aus dem Raum Gendorf lagen die maximalen Gehalte bei 143 ng/L und im Mittel bei 17 ng/L (Median 7 ng/L). Die Anzahl der PFC-Verbindungen pro Probe variiert zwischen 1 und 10 Verbindungen und lag im Mittel bei 3.

Vergleicht man das Spektrum der auftretenden Gesamtkonzentration von PFC der untersuchten Oberflächen- und Grundwasserproben (siehe Abb. 19), erstrecken sich die Proben über den gleichen Wertebereich. Vorsicht ist bei der Interpretation gegeben, da die Probenahme im Oberflächengewässer verdachtsunabhängig, die Rohwasserproben hingegen in begründeten Verdachtsfällen untersucht wurden.

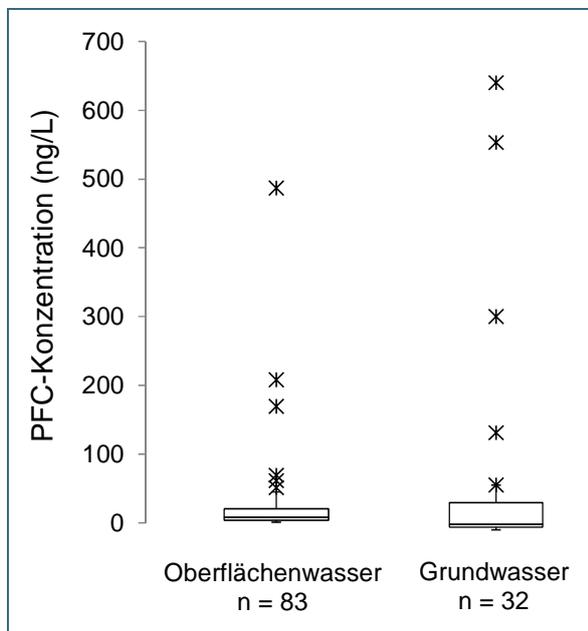


Abb. 19: Vergleich der PFC-Gesamtkonzentration zwischen Oberflächenwasser- und Grundwasserproben.

In der Betrachtung einzelner Standorte bleibt festzustellen, dass keine signifikante Konzentrationsminderung auf einer längeren Fließstrecke im Grundwasserleiter zu beobachten war und das Stoffspektrum des Oberflächengewässers sich im Grundwasser wiederfindet.

3.3 Klärschlamm und Abwasser

3.3.1 PFC-Belastung in kommunalen Klärschlämmen in Bayern von 2008 bis 2013

In den vergangenen Jahren wurden in Bayern jährlich zwischen 260.000 und 290.000 t Klärschlamm produziert. Davon wurden bis zu 48 % (mit abnehmendem Trend) für eine landschaftsbauliche bzw. landwirtschaftliche Nutzung verwendet. Seit 2008 müssen in Bayern alle Klärschlämme bei einer beabsichtigten bodenbezogenen Verwertung und ab einer Ausbaugröße der Kläranlage von 1.000 Einwohnergleichwerten (EW) auf PFC untersucht werden. Damit soll verhindert werden, dass durch belasteten Klärschlamm PFC in die Umwelt freigesetzt werden. Diese Untersuchung muss im Abstand von einem Jahr wiederholt werden. Für eine bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm wurde ein Vorsorgewert von 100 µg/kg Trockenmasse (TM) zzgl. einer Toleranz von 25 % im Hinblick auf Ungenauigkeiten bei der Probenahme und der Analyse festgelegt. Wird dieser Wert überschritten, muss der Schlamm einer thermischen Entsorgung zugeführt werden. Für Kläranlagen (KA), deren Klärschlamm keiner bodenbezogenen Verwertung zugeführt wird, sondern thermisch entsorgt wird, besteht weder eine Pflicht zur PFC-Untersuchung noch zur Übermittlung eventuell vorhandener Untersuchungsergebnisse.

PFC gelangen über Indirekteinleiter der Industrie oder durch Freisetzung aus Produkten, die PFC enthalten, in das Abwasser und damit in kommunale Kläranlagen (Boulanger et al. 2005; Prevedouros et al. 2006; Schultz et al. 2006; Sinclair u. Kannan 2006). Dort wird der Großteil der Substanzen aufgrund der hohen Persistenz nicht oder nur teilweise abgebaut. Sie adsorbieren entweder an den Klärschlamm oder werden über das gereinigte Abwasser in die Oberflächengewässer eingeleitet (Schultz et al. 2006; Huset et al. 2008; Guerra et al. 2014). Beim Klärprozess werden vorzugsweise die langkettigen PFC-Verbindungen z.T. an den Klärschlamm gebunden, da die Sorptionsneigung mit größerer Kettenlänge zunimmt (Sun et al. 2011; Zhang et al. 2013). Wird belasteter Klärschlamm zu Rekultivierungsmaßnahmen oder für landwirtschaftliche Zwecke auf dem Boden aufgebracht, können PFC ausgewaschen werden und damit in das Grundwasser oder angrenzende Oberflächengewässer gelangen (Ahrens 2011). Klärschlamm stellt somit eine Quelle für PFC-Belastungen in der Umwelt dar (Schultz et al. 2006; Bossi et al. 2008).

Im Folgenden wurden die von den Kläranlagenbetreibern zur Verfügung gestellten Untersuchungsergebnisse von 2008 bis 2013 ausgewertet, mit dem Ziel, Informationen zur aktuellen PFC-Belastung in bayerischen Klärschlämmen zu erhalten und zu untersuchen, ob die Beschränkungen und Verbote auf nationaler und internationaler Ebene zu einer Abnahme der Belastung führen. Zusätzlich wurde untersucht, ob das PFC-Spektrum im Klärschlamm Informationen zur Quelle der Belastung liefern kann.

Material und Methoden

Die Probenahme erfolgt analog der Abfallklärschlammverordnung (AbfKlärV, 1992). Dabei ist eine Sammelprobe aus mindestens fünf verschiedenen Klärschlammchargen herzustellen und der Schlamm soll dem Zustand entsprechen, in dem er abgegeben wird. Die Analytik muss durch akkreditierte Labore nach DIN 38414-14 durchgeführt werden und folgende elf Einzelverbindungen umfassen: PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFDoA, PFBS, PFHxS, PFOS, PFDS, PFOSA.

Die Labore, die die Klärschlammproben auf PFC untersuchen, ermitteln für die Einzelsubstanzen unterschiedliche Nachweisgrenzen (NG). Um jedoch eine Vergleichbarkeit zwischen den Messergebnissen der verschiedenen Labore und den verschiedenen Untersuchungsjahren herzustellen, wurden die NG einheitlich auf 10 µg/kg TM festgelegt. Dafür wurden Messergebnisse kleiner 10 µg/kg TM auf 10 µg/kg TM gesetzt und Untersuchungsergebnisse mit einer NG größer 10 µg/kg TM aus dem Datensatz entfernt. Die PFC-Summenbildung erfolgte nur für Konzentrationen oberhalb der Nachweisgrenze von 10 µg/kg TM, Werte kleiner der NG wurden nicht berücksichtigt.

Für die einzelnen KA liegen keine jährlichen Klärschlamm-mengen vor. Deshalb wurde für die Berechnung der Jahresfrachten die durchschnittliche bayerische Klärschlamm-menge bezogen auf den EW herangezogen (10,4 kg/(EW·a)). Für die Frachtberechnung wurde dieser Wert mit dem EW und der PFC-Konzentration der jeweiligen KA multipliziert.

Im betrachteten Untersuchungszeitraum von 2008 bis 2013 wurden insgesamt 4.981 Klärschlamm-proben aus 1.165 verschiedenen kommunalen KA auf PFC untersucht. Damit liegt für 85 % aller baye-rischen kommunalen KA mit einer Ausbaugröße ab 1.000 EW bzw. für 74 % aller EW mindestens eine PFC-Untersuchung im Klärschlamm vor.

Ergebnisse und Diskussion

Alle untersuchten PFC konnten in den Klärschlammproben in unterschiedlichen Konzentrationen und Häufigkeiten nachgewiesen werden. Am häufigsten konnte PFOS (43 % der Klärschlammproben), gefolgt von PFDA (20 %), PFOA (7 %) und PFDoA (5 %) in Konzentrationen größer der NG detektiert werden. Die Maximalkonzentration für PFOS betrug 7.600 µg/kg TM, für PFDA 597 µg/kg TM, für PFOA 1.043 µg/kg TM und für PFDoA 325 µg/kg TM. PFNA wurde in 1,6 % aller Klärschlammproben größer der NG nachgewiesen, die Maximalkonzentration betrug 171 µg/kg TM. Die übrigen Verbindungen PFHxA, PFHpA, PFBS, PFHxS, PFDS und PFOSA wurden in weniger als 1 % aller Schlammproben detektiert und in Konzentrationen kleiner 125 µg/kg TM, mit Ausnahme der PFHxA für die eine Maximalkonzentration von 680 µg/kg TM ermittelt wurde. Auch in anderen Studien wurde PFOS als Hauptkontaminante im Klärschlamm identifiziert (Higgins et al. 2005; Bossi et al. 2008; Guo et al. 2010, 2010; Sun et al. 2011, 2011; Alder u. van der Voet 2015).

Für jedes Untersuchungs-jahr wurden für jede einzelne PFC-Verbindung die Mittelwerte errechnet (siehe Tab. 5). Diese liegen im gleichen Konzentrationsbereich wie in anderen Studien, die in Europa und den USA durchgeführt wurden (Bossi et al. 2008; Sun et al. 2011; Armstrong et al. 2016). Die höchsten Mittelwerte wurden für PFOS mit 50 µg/kg TM, PFOA und PFDA mit 16 µg/kg TM im Jahr 2008 berechnet.

Tab. 5: Mittelwerte der Einzelverbindungen des jeweiligen Untersuchungsjahres. Werte kleiner NG wurden einmal mit 0 µg/kg TM und einmal mit 10 µg/kg TM berücksichtigt. Damit wird für alle Verbindungen und Untersuchungs-jahre ein Bereich angegeben

Substanz	2008	2009	2010	2011	2012	2013
PFBS	0,13 - 10	0,12 - 10	0,06 - 10	0,01 - 10	0,04 - 10	0,04 - 10
PFHxA	0,16 - 10	1,0 - 11	0,09 - 10	0,45 - 10	0,13 - 10	0,00 - 10
PFHxS	0,32 - 10	0,23 - 10	0,09 - 10	0,10 - 10	0,00 - 10	0,00 - 10
PFHpA	0,19 - 10	0,36 - 10	0,18 - 10	0,21 - 10	0,00 - 10	0,00 - 10
PFOA	7,8 - 16	2,7 - 12	1,6 - 11	1,4 - 11	1,0 - 11	0,32 - 10
PFOS	46 - 50	19 - 24	15 - 21	20 - 26	21 - 27	12 - 19
PFNA	1,4 - 11	0,63 - 10	0,31 - 10	0,43 - 10	0,23 - 10	0,08 - 10
PFDA	9,2 - 16	6,9 - 14	4,3 - 12	3,4 - 12	2,8 - 11	1,3 - 11
PFDS	0,29 - 10	0,27 - 10	0,11 - 10	0,02 - 10	0,02 - 10	0,00 - 10
PFDoA	2,5 - 12	2,1 - 11	1,4 - 11	0,89 - 11	0,34 - 10	0,24 - 10
PFOSA	0,34 - 10	0,20 - 10	0,11 - 10	0,09 - 10	0,18 - 10	0,02 - 10

Zwischen 2008 und 2013 wurde im Schlamm von 71 KA der PFC-Vorsorgewert von 125 µg/kg TM mindestens einmal überschritten, dies entspricht 6 % der untersuchten KA. Abb. 20 zeigt die PFC-Summenkonzentration im Klärschlamm der untersuchten KA für das jeweilige Untersuchungsjahr. Jährlich wurden zwischen 685 und 784 KA auf PFC-Verbindungen untersucht. Im Jahr 2008 überschritten 39 (5,7 %) der untersuchten Anlagen den Vorsorgewert, 2013 nur mehr 6 (0,8 %). Der Anteil

unbelasteter Anlagen stieg von 33 % (2008) auf 65 % (2013) an. Im gesamten Zeitraum wurden im Klärschlamm von 15 KA sehr hohe PFC-Konzentrationen > 500 µg/kg TM nachgewiesen. Acht dieser Anlagen erhalten Abwässer von Industrieanlagen (Galvanik, Halbleiter- Textil-, Leder- und Papierindustrie), die PFC im Produktionsprozess einsetzen. Im Einzugsgebiet einer KA befindet sich ein Löschübungsbecken, dessen Löschwasser nach Löschübungen in der Vergangenheit über die KA entsorgt wurde. Im Klärschlamm der übrigen Anlagen wurden nur einmalig sehr hohe Werte gemessen, danach und davor lagen die PFC-Konzentrationen wieder unterhalb des Vorsorgewerts. Die Ursache für die einmalig erhöhten Konzentrationen konnten hier nicht identifiziert werden. Insgesamt lässt sich für die untersuchten Substanzen ein kontinuierlicher Rückgang der PFC-Belastung feststellen.

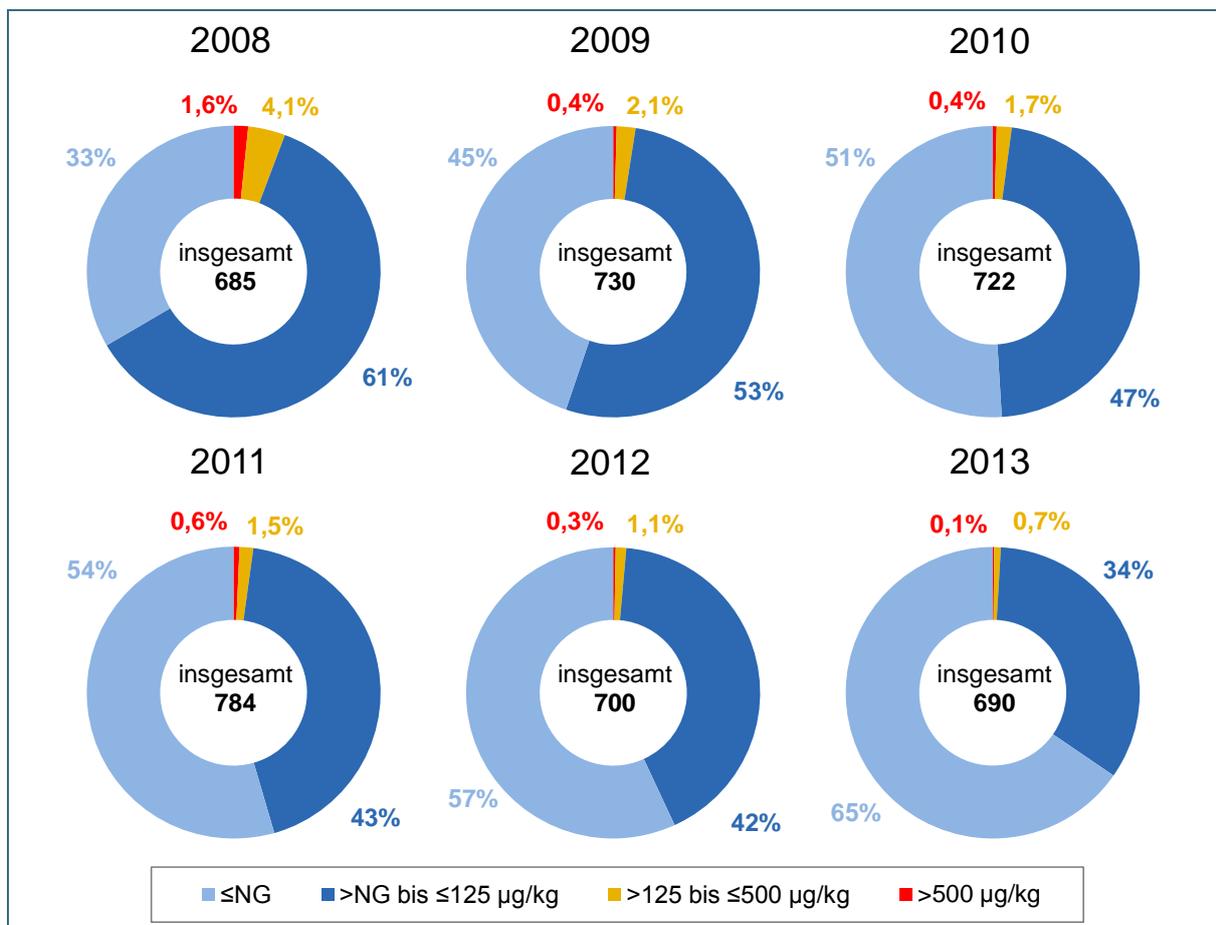


Abb. 20: PFC-Belastung im Klärschlamm bayerischer kommunaler KA von 2008 bis 2013. Die Zahl im Kreis gibt die Anzahl der Kläranlagen an, die im jeweiligen Jahr untersucht wurden.

Bei der Bewertung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass in den sechs betrachteten Untersuchungsjahren nicht zwangsläufig die gleichen KA beprobt wurden. Somit kann eine Abnahme der Belastung auch darauf zurückgehen, dass die Kläranlagenbetreiber, deren Anlagen den Vorsorgewert überschreiten, in den darauffolgenden Jahren den Klärschlamm ohne Untersuchung direkt der thermischen Behandlung zuführten. Betrachtet man die einzelnen KA im zeitlichen Verlauf, zeigt sich, dass bei 2/3 der Anlagen nach einer anfänglichen Überschreitung die PFC-Konzentration wieder deutlich abnimmt und unterhalb des Vorsorgewerts liegt. 1/3 der Anlagen, für die bei der ersten Untersuchung eine Überschreitung des Vorsorgewerts festgestellt wurde, haben danach keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, sondern den Schlamm direkt der thermischen Verwertung zugeführt. Dies deutet an, dass die PFC-Belastung im Abwasser insgesamt abnimmt.

Um diesen abnehmenden Trend klarer zu erfassen, wurde soweit möglich für jede KA im gesamten Datensatz eine Regressionsanalyse durchgeführt. Die Regressionsanalyse konnte für 729 Anlagen berechnet werden, dies entspricht 63 % der untersuchten KA. Die übrigen KA sind nur einmalig untersucht worden (9 %) oder enthielten keine nachweisbaren PFC im Klärschlamm (28 %).

Wie Abb. 21 zeigt, ist für die PFC-Konzentration in den untersuchten KA für die Jahre 2008 bis 2013 kein eindeutig zunehmender oder abnehmender Trend feststellbar. Die ermittelten Steigungen der Regressionsanalysen zeigen eine große Streuung. Allerdings ist eine starke Häufung von negativen Steigungen im Bereich von $-10 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$ erkennbar.

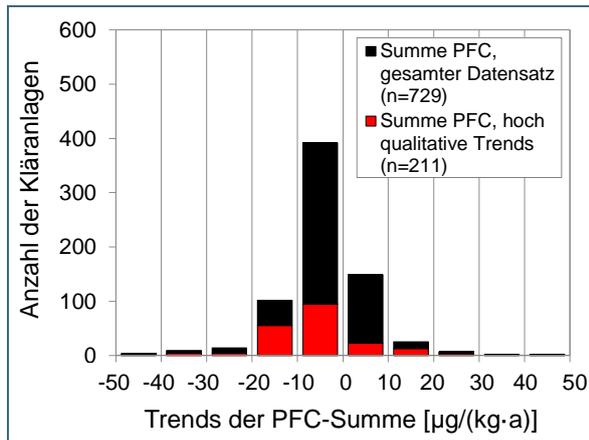


Abb. 21: Häufigkeitsverteilung der Trends (Steigung der Regressionsanalysen von 2008 bis 2013) der PFC-Summen aller Anlagen, für die Regressionen berechnet werden konnten (schwarze Balken). In Rot: Trends von hoher Güte mit $R^2 > 0,5$ und mindestens 3 Untersuchungsergebnissen.

540 der mittels Regressionsanalyse untersuchten KA (das entspricht 47 % aller KA im gesamten Datensatz) zeigen abnehmende Konzentrationen, 189 KA (16 % bezogen auf den gesamten Datensatz) weisen dagegen eine zunehmende Konzentration auf. Die Zunahmen erfolgen vor allem im Bereich niedriger Konzentrationen (Daten nicht dargestellt). Die Häufigkeitsverteilung bleibt auch unter der Bedingung von hoch-qualitativen Trends (Regression berechnet mit mindestens drei Werten im Untersuchungszeitraum und mit einem Bestimmtheitsmaß von größer 0,5) in ihrer Form bestehen und kann damit als statistisch robust betrachtet werden (siehe Abb. 21, rote Balken).

Dieses von einer Normalverteilung deutlich abweichende Muster erklärt, warum andere Untersuchungen keine statistisch haltbaren Trends feststellen konnten, sobald versucht wurde, aus den Daten mehrerer KA einen einzigen, „globalen“ Trend zu berechnen (Olofsson et al. 2012; Armstrong et al. 2016). Der hier gewählte Ansatz, der durch die große Anzahl von untersuchten Kläranlagen möglich ist, kann daher zum ersten Mal Trends bei PFC-Konzentrationen im Klärschlamm auf statistisch robuste Art nachweisen.

Um zu beurteilen, ob das gleichzeitige Auftreten von zu- und abnehmenden Trends durch unterschiedliche Tendenzen von (teil-)regulierten Substanzen wie PFOS und PFOA und unregulierten Substanzen hervorgerufen wird, erfolgte eine Regressionsanalyse der Einzelsubstanzen für jede KA (siehe Abb. 22). Diese Regressionen konnten für die Verbindungen PFOS, PFOA, PFDA und PFDoA durchgeführt werden, für alle weiteren Verbindungen waren zu wenig Werte gegeben.

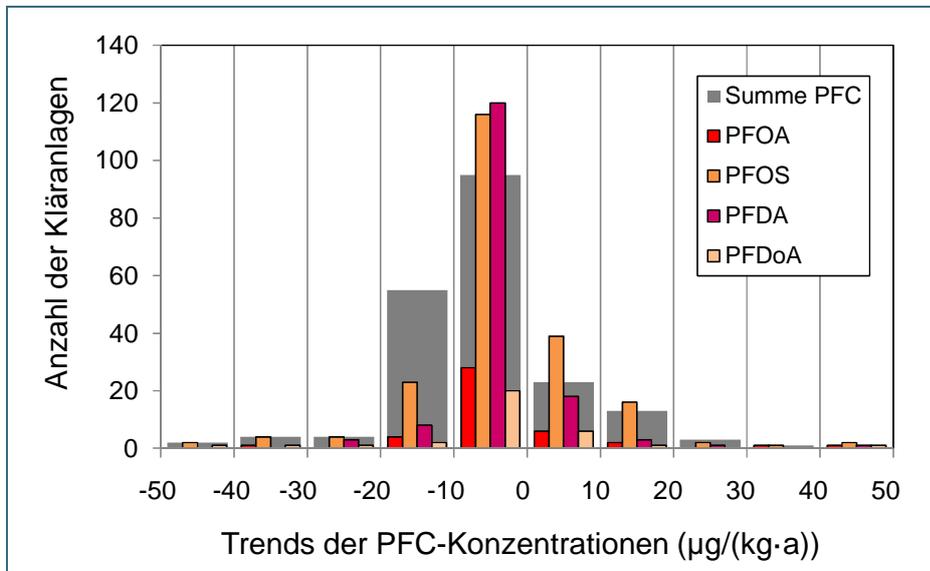


Abb. 22: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Trends der untersuchten Einzelsubstanzen mit den Trends der Summen PFC (alle dargestellten Trends mit $R^2 > 0,5$ und mindestens 3 Werten).

Die Regressionen der Einzelverbindungen ergaben in der Häufigkeitsverteilung keine ausgeprägten Unterschiede in zu- oder abnehmenden Trends. Dies spricht dafür, dass die beobachteten Trends ein generelles Muster darstellen, das unabhängig von Substanzen ist. Ein Ersatz regulierter Verbindungen durch unregulierte Verbindungen, was die teilweise Zunahme erklären würde, kann für die untersuchten Verbindungen nicht bestätigt werden. Zusammen mit der Tatsache, dass zunehmende Trends vor allem in niedrigen Konzentrationsbereichen zwischen $10 \mu\text{g}/\text{kg}$ und $125 \mu\text{g}/\text{kg}$ liegen, kann man daher vermuten, dass ein diffuser Eintrag durch Verbraucherprodukte mit der gesamten Palette an untersuchten PFC für den beobachteten Effekt verantwortlich ist.

Anschließend wurden die potentiellen PFC-Frachten, die über die Klärschlammausbringung in die Umwelt freigesetzt werden können, für den Untersuchungszeitraum berechnet. Die gesamte PFC-Fracht, berechnet für alle untersuchten KA, nahm von 17 t/a im Jahr 2008 kontinuierlich auf $2,2 \text{ t/a}$ im Jahr 2013 ab (siehe Abb. 23).

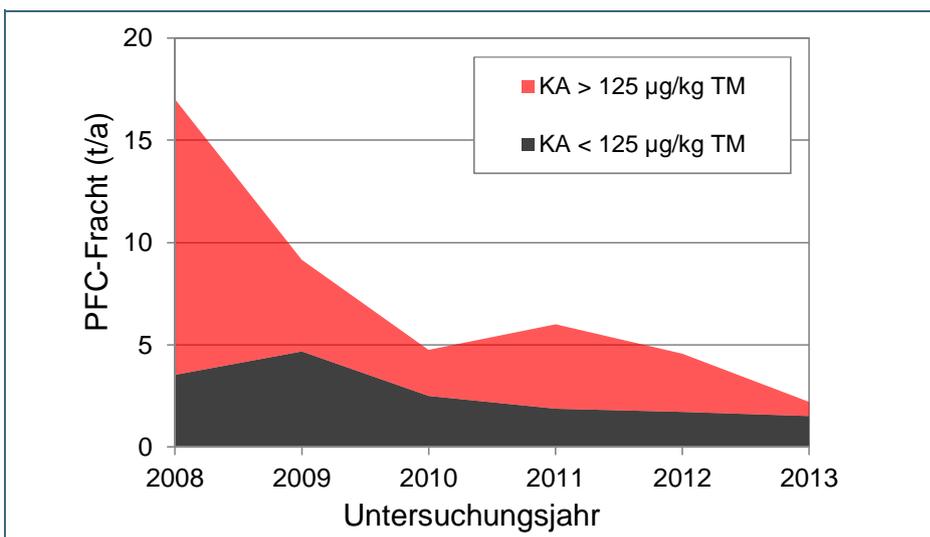


Abb. 23: PFC-Fracht (in t/a) berechnet als Summe der Frachten aller untersuchten KA. Für die Berechnung wurde die durchschnittliche Klärschlammmenge pro EW ($10,4 \text{ kg/a}$) herangezogen

Unter der Annahme, dass die PFC-Fracht in den Jahren vor Beginn der Klärschlammuntersuchungen in etwa dem ersten Untersuchungsjahr 2008 entsprechen, konnte die freigesetzte PFC-Fracht insgesamt um mehr als 90 % vermindert werden. Über den gesamten Untersuchungszeitraum konnte damit die Freisetzung von 28 t PFC in die Umwelt verhindert werden. Das Verbot der Ausbringung von Klärschlamm über dem Vorsorgewert von $125 \mu\text{g}/\text{kg TM}$ als sogenannte „End-of-pipe“ Lösung war in ihrer

Wirkung vor allem in den ersten beiden Untersuchungsjahren sehr effektiv. Dagegen sind die internationalen Maßnahmen unerlässlich, um langfristig eine Abnahme der gesamten Emissionen zu erreichen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die auf mehreren Ebenen erfolgten Beschränkungen und Regulierungen auf nationaler und internationaler Ebene eine sinnvolle Kombination darstellten. Zusammen haben die Maßnahmen einen deutlichen Rückgang der PFC-Belastung im Klärschlamm bewirkt.

Um Informationen darüber zu erhalten, ob das PFC-Spektrum im Klärschlamm Hinweise auf die Ursache der Belastung liefern kann, wurden abschließend sieben hoch belastete KA (Summe PFC > 500 µg/kg TM) genauer betrachtet. Alle sieben Anlagen überschreiten den Vorsorgewert im Untersuchungszeitraum mindestens zweimal und erhalten Abwasser aus Industrieanlagen, die PFC im Produktionsprozess einsetzen, bzw. PFC-belastetes Löschwasser. Abb. 24 zeigt die zeitliche Entwicklung der Konzentrationen und das PFC-Muster im Klärschlamm der betroffenen Anlagen.

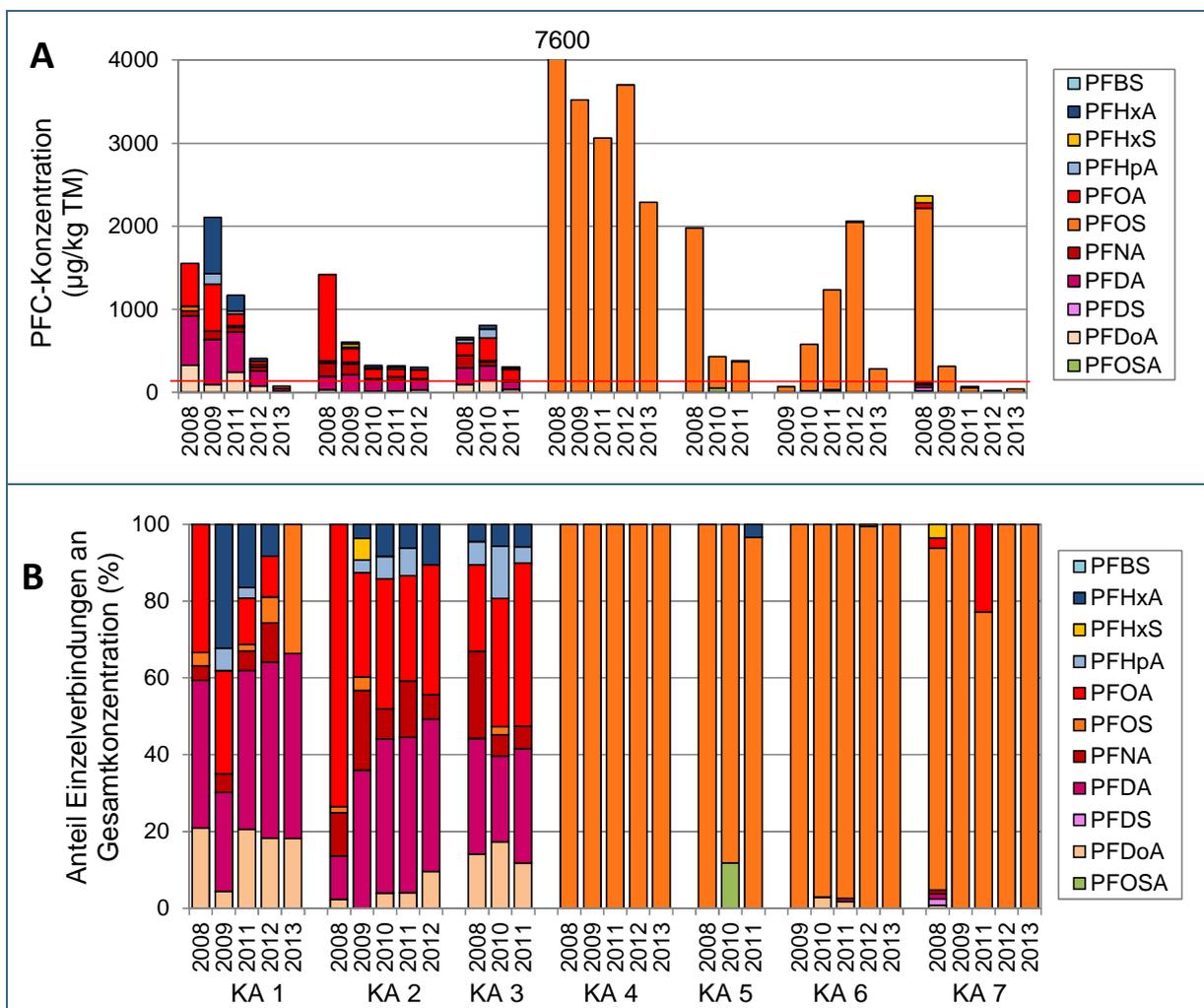


Abb. 24: Zeitliche Entwicklung der PFC-Klärschlammbelastung in sieben ausgewählten KA (A). Die rote Linie markiert den Vorsorgewert von 125 µg/kg TM. Anteil der Einzelverbindungen an der PFC-Summenkonzentration (B).

Es können zwei Gruppen von KA deutlich voneinander unterschieden werden: im Klärschlamm der ersten Gruppe KA 1 bis KA 3 werden vor allem die Perfluorcarbonsäuren (PFCA) nachgewiesen. Diese werden zur Oberflächenbehandlung von Textilien, Leder und Papier eingesetzt. Die Anlage KA 1 erhält Abwasser aus einer Papierfabrik, wohingegen sich im Einzugsgebiet der Anlagen KA 2 und KA 3 Textilfabriken befinden. Die PFCA-Zusammensetzung im Klärschlamm dieser Anlagen ändert sich

im sechsjährigen Untersuchungszeitraum nicht. Dies entspricht den vorangegangenen Erkenntnissen zum Trend der Einzelverbindungen (siehe Abb. 22). Lediglich PFOA kann im Klärschlamm der KA 1 im letzten Untersuchungsjahr nicht mehr nachgewiesen werden. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass hier PFOA bereits durch ein Substitut ersetzt wurde. Im Klärschlamm der zweiten Gruppe werden vor allem die Perfluorsulfonsäuren (PFSA) nachgewiesen. PFSA, vor allem PFOS, werden in Galvanikbetrieben (KA 4 – KA 6) und wurden in der Vergangenheit auch in Löschsäumen (KA 7) eingesetzt. Im Untersuchungszeitraum gehen die PFOS-Konzentrationen im Klärschlamm der KA 4 bis KA 6 teilweise zurück, bleiben aber auch bei der letzten Messung auf einem sehr hohen Konzentrationsniveau. Dies lässt sich damit erklären, dass für Galvanikbetriebe trotz der EU-weiten PFOS-Einschränkung eine Ausnahmeregelung gilt. Im Gegensatz dazu wurde der Einsatz PFOS-haltiger Löschmittel 2011 verboten. Dies erklärt den deutlichen PFOS-Rückgang im Klärschlamm der Anlage KA 7, der bis 2009 PFOS-haltiges Löschwasser aus einem Löschübungsbecken zugeführt wurde.

Fazit und Ausblick

Für den sechsjährigen Untersuchungszeitraum kann abschließend festgestellt werden, dass die PFC-Konzentrationen im Klärschlamm kommunaler KA deutlich zurückgegangen sind. Dies kann zum einen auf regulatorische Maßnahmen zurückgeführt werden, die in den letzten Jahren für PFOS bereits umgesetzt wurden und für langkettige PFCA in Arbeit sind. Zum anderen konnte durch die Einführung des Vorsorgewerts bei einer beabsichtigten bodenbezogenen Verwertung von Klärschlamm die PFC-Emission stark verringert werden.

Jedoch konnte die Frage, weshalb für 16 % der untersuchten KA eine zunehmende PFC-Konzentration im Klärschlamm verzeichnet wurde, nicht abschließend geklärt werden. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig. Möglicherweise wird der Anstieg durch eine zunehmende Verwendung dieser Substanzen oder deren Vorläuferverbindungen in Konsumprodukten verursacht. Die Auslaugung der PFC aus diesen Produkten könnte den Konzentrationsanstieg auf niedrigem Niveau erklären, was von hoher Umweltrelevanz wäre. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass die betroffenen KA einfach nur "Nachzügler" einer allgemeinen Entwicklung von zunehmenden hin zu abnehmenden PFC-Konzentrationen sind. Damit wäre es nur eine Frage der Zeit bis sich der Trend auch bei diesen Anlagen umkehrt.

Mit den vorliegenden Untersuchungsergebnissen für die Jahre 2008 bis 2013 kann keine generelle Aussage zur PFC-Belastung im Abwasser getroffen werden. Denn die langkettigen PFC-Verbindungen werden in den letzten Jahren durch kurzkettige Verbindungen ersetzt, die sich durch eine deutlich geringere Sorptionsneigung an den Klärschlamm auszeichnen. Dadurch stellt Klärschlamm ein ungenügendes Probenmaterial dar, um quantitative Informationen bezüglich der Abwasserbelastung mit kurzkettigen PFC zu erhalten. Darüber hinaus werden auch zahlreiche unbekannt polyfluorierte Verbindungen als Substitute eingesetzt, die mit dem gängigen PFC-Analytikspektrum nicht erfasst werden. Folglich kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Gesamtbelastung mit PFC im Abwasser in den vergangenen Jahren zugenommen hat. Um dies zu überprüfen müsste das Abwasser direkt untersucht werden und das Analytikspektrum deutlich erweitert werden bzw. ein Summenparameter für PFC, wie der adsorbierbare organische Fluorgehalt (AOF) nach Wagner et al. 2013, bestimmt werden.

3.3.2 PFC-Konzentrationen in Kläranlagenabläufen

Erstmals wurden 2006 Abläufe von fünf größeren kommunalen Kläranlagen auf PFC untersucht. Dazu wurden 24-Stunden-Mischproben entnommen und auf PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnA, PFDoA und PFOS analysiert. PFOA wurde in Konzentrationen von 5 – 32 ng/L und PFOS in Konzentrationen von 9 – 26 ng/L nachgewiesen (siehe Tab. 6).

Substanz	KA 1	KA 2	KA 3	KA 4	KA 5
PFHxA	3	< 1	2	5	< 10
PFHpA	2	< 1	2	4	< 10
PFOA	21	5	13	32	25
PFOS	26	15	9	11	17
PFNA	2	< 1	< 1	3	< 10
PFDA	6	2	2	7	12
PFUnA	2	1	1	2	16
PFDoA	1	1	1	3	13

Tab. 6: PFC-Konzentrationen (ng/L) in den 2006 untersuchten Kläranlagenabläufen. Da die Proben unterschiedlich stark verdünnt wurden, ergeben sich unterschiedliche Bestimmungsgrenzen.

Das LfU untersuchte bei den meisten Kläranlagen, in deren Klärschlamm in den Jahren 2007 und 2008 erhöhte PFC-Konzentrationen (> 125 µg/kg TM) nachgewiesen wurden, zusätzlich die PFC-Konzentrationen im Kläranlagenablauf und im Vorfluter unterhalb der Einleitungsstelle. Die Gewässerbeprobung fand hierbei ca. 200 bis 300 m unterhalb der Einleitungsstelle statt. Von einer vollständigen Durchmischung im Vorfluter kann daher in der Regel nicht ausgegangen werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind zusammen mit den korrespondierenden Klärschlammgehalten in den nachfolgenden Abbildungen Abb. 25 und Abb. 26 dargestellt. Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Abwasser- und Gewässerproben um Stichproben handelt, während der Klärschlamm systembedingt die Verhältnisse über einen längeren Zeitraum widerspiegelt. Des Weiteren fand die Klärschlammbeprobung zu einem anderen Zeitpunkt als die Beprobung der Abflüsse und Oberflächengewässer statt. An den mit einem * gekennzeichneten Kläranlagen fand die Beprobung des Klärschlammes 2007 statt, wohingegen die Abwasser- und Oberflächengewässerproben aus dem Jahr 2008 stammen. Somit können die Ergebnisse nur grobe Hinweise bezüglich eines Zusammenhangs zwischen PFC-Konzentration im Klärschlamm, Abwasser und angrenzendem Oberflächengewässer liefern.

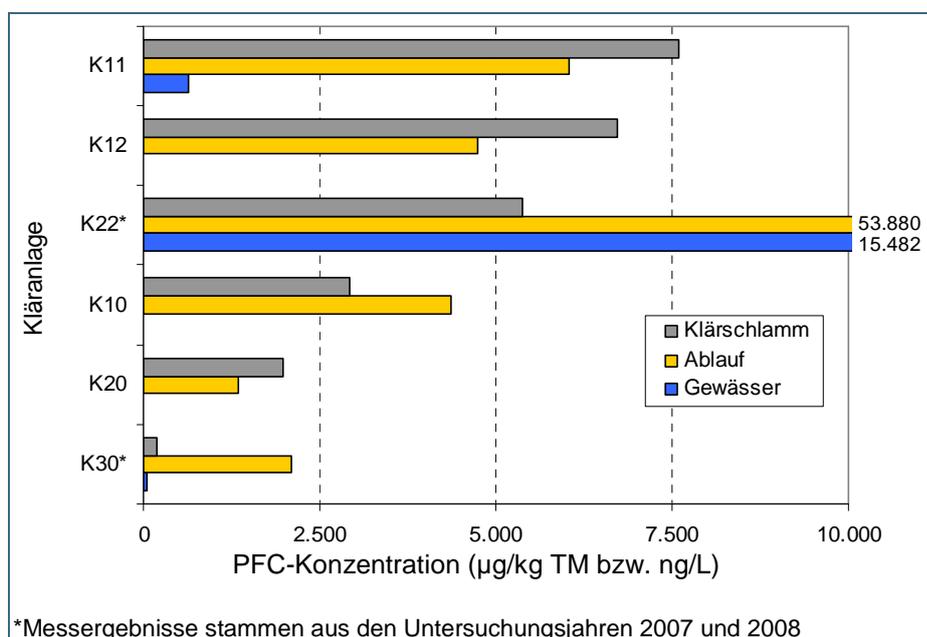


Abb. 25: Vergleich der PFC-Konzentrationen in Klärschlamm, Kläranlagenablauf und angrenzendem Gewässer der stark belasteten Kläranlagen.

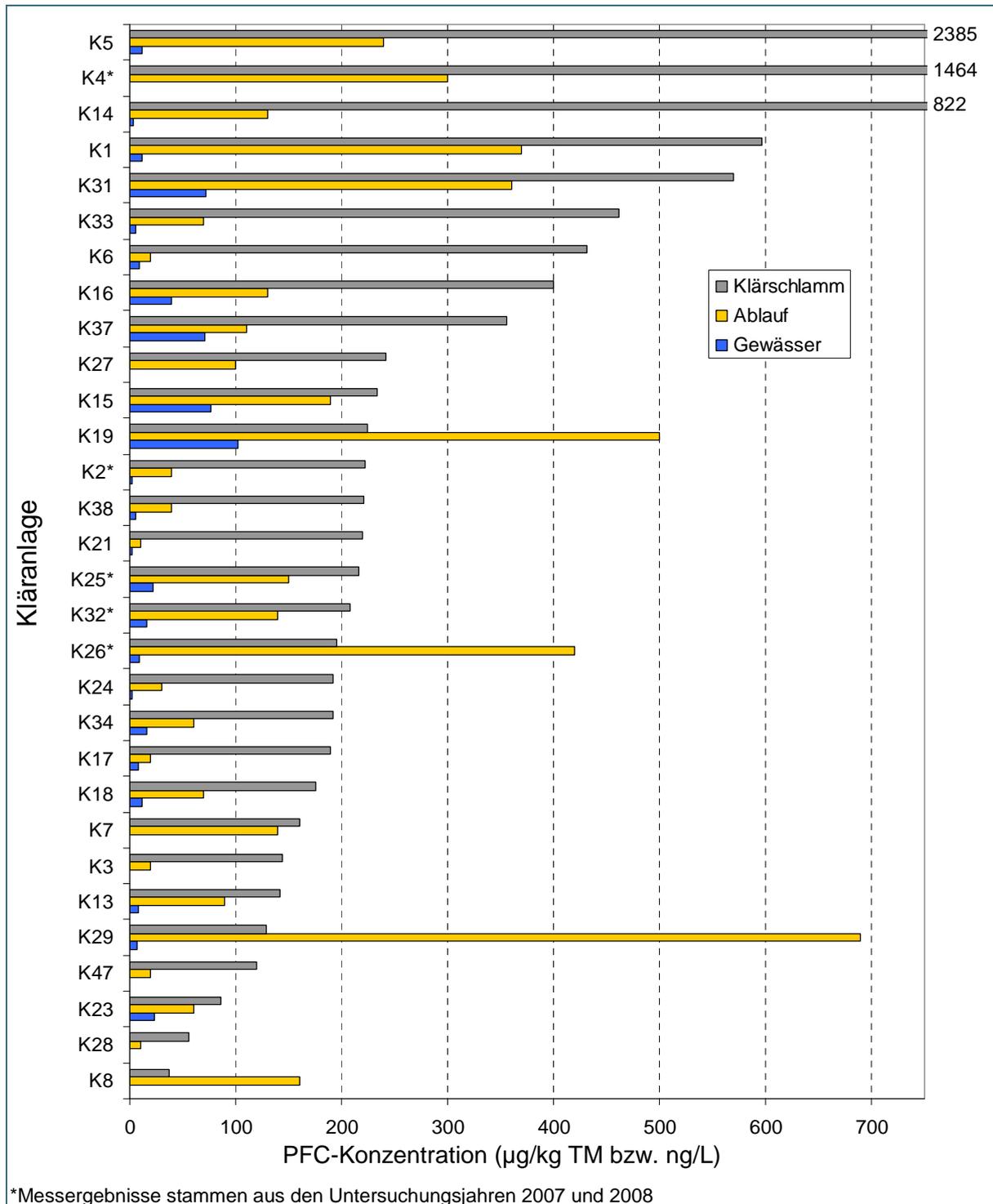


Abb. 26: Vergleich der PFC-Konzentrationen in Klärschlamm, Kläranlagenablauf und angrenzendem Gewässer.

In aller Regel konnten bei erhöhten PFC-Gehalten im Klärschlamm auch erhöhte Gehalte im Kläranlagenablauf ermittelt werden. Eine direkte Korrelation zwischen den Gehalten im Klärschlamm und den Ablaufkonzentrationen ist jedoch nicht gegeben. Diese ist insbesondere aufgrund der Art der Probenahme (Stichprobe im Ablauf) und des unterschiedlichen Adsorptionsverhaltens der PFC-Einzelsubstanzen auch nicht zu erwarten.

In den meisten Fällen war bei einem erhöhten Gehalt im Kläranlagenablauf auch ein Nachweis der PFC im Vorfluter möglich. Da die Konzentrationen im Vorfluter durch das Verdünnungsverhältnis bestimmt werden, ergibt sich keine Korrelation der korrespondierenden Werte.

Auffällig sind die sehr hohen PFC-Gehalte bei der Kläranlage K22* im Kläranlagenablauf (ca. 54.000 ng/L) und im Vorfluter (ca. 15.000 ng/L) mit einem korrespondierenden Klärschlammwert von ca. 5.000 µg/kg TM. Der hohe Gehalt im Vorfluter ist auf dessen geringen Abfluss und das resultierende ungünstige Verdünnungsverhältnis zurückzuführen.

3.3.3 Abwasseruntersuchungen

2008 wurden bayernweit Industrieabwässer auf PFC untersucht. Dafür wurden Firmen aus Branchen ausgewählt, die potentiell mit perfluorierten Verbindungen umgehen. Folgende Branchen wurden dabei einbezogen:

- Metallbe- und -verarbeitung (z. B. Galvaniken)
- Halbleiter- und Elektronikindustrie
- Papier- und Pappeindustrie
- Wäscherei
- Textil- und Teppichindustrie
- Lederindustrie
- Textilveredelung, Imprägnierung
- Lackiererei, Färberei
- Druckerei

Insgesamt wurden 110 Firmenabwässer, wobei es sich teilweise um unterschiedliche Abwasserteilströme derselben Firma handelt, auf PFC untersucht. Bei den 110 Proben handelt es sich um 93 Abwässer indirekt – d.h. in kommunale Kläranlagen - einleitender Firmen sowie um 17 direkt in Fließgewässer einleitender Firmen. Im Laufe des Projekts wurde das Parameterspektrum von zwei (PFOA und PFOS) auf bis zu elf Einzelverbindungen erweitert.

Einen Überblick über die Anzahl der positiven Befunde und den zuzuordnenden Branchen gibt Tab. 7 wieder. Die Einzelergebnisse der bisher durchgeführten Untersuchungen sind im Anhang tabellarisch dargestellt (siehe Tab. A6 im Anhang).

In 48 Abwasserproben wurden PFC nachgewiesen, wobei die PFOA-Konzentration bis auf eine Ausnahme 3 µg/L nie überschritt, während PFOS in Konzentrationen zwischen 0,08 µg/L und 2.600 µg/L nachgewiesen werden konnte. Die höchsten Konzentrationen sind den Branchen Metallbe- und -verarbeitung zuzuordnen. Nur in sechs Fällen wurde PFOS und PFOA parallel in einer Probe gefunden. PFBS wurde grundsätzlich nur in Proben gefunden, in denen PFOS enthalten ist. Nur in wenigen Fällen wurden mehr als zwei Einzelsubstanzen nebeneinander detektiert.

Der Bereich der Galvanik und Oberflächenbehandlung ist im Hinblick auf PFOS nicht nur wegen der festgestellten Emissionen problematisch, sondern auch wegen der Ausnahmeregelungen in der EU-Verordnung (EU) Nr. 757/2010. Demnach bleibt die Verwendung von PFOS-haltigen Zubereitungen u.a. im Bereich von nicht-dekorativem Hartverchromen zur Sprühnebelunterdrückung zunächst in geschlossenen Kreislaufsystemen von den Ausnahmeregelungen ausgenommen. Bei diesen Prozessen wird PFOS insbesondere aus Arbeitsschutzgründen (Chrom(VI)-Bäder) und aufgrund ihrer chemi-

schen Stabilität eingesetzt. Allerdings sind hierbei in Anlagen, die unter die Richtlinie 2010/75/EU fallen, die einschlägigen besten verfügbaren Techniken für die Vermeidung oder größtmögliche Verminderung von PFOS-Emissionen anzuwenden. Der Einsatz von PFOS als Netzmittel für überwachte Galvanotechniksysteme war noch bis 26. August 2016 erlaubt.

Die Halbleiter- und Elektronikindustrie war nur in wenigen Fällen auffällig. Bei einer Firma konnte die Abwasserkonzentration von PFOS zunächst durch getrennte Entsorgung von über 500 µg/L auf unter 10 µg/L gesenkt werden, bis auf einen PFOS-freien Ersatzstoff umgestellt werden konnte. Bei einer zweiten Firma wurde PFOS zwar nur in einer Konzentration von unter 2 µg/L gefunden. Wegen des hohen Anteils von Firmenabwasser im Kläranlagenzulauf konnte aber bereits diese geringe Konzentration den PFC-Gehalt des Klärschlammes der betroffenen Kläranlage über den in Bayern seit Anfang 2008 gültigen Vorsorgerichtwert von 100 µg/kg TM bringen.

Branche	Anzahl untersuchter Betriebe	positive PFOA-Befunde	positive PFOS-Befunde
Metallbe- und –verarbeitung/Galvanik	58	3	28
Oberflächenbehandlung	15	1	10
Papier- und Pappeindustrie	10	1	1
Textil	5	1	0
Halbleiter- und Elektronikindustrie	4	0	2
Leder	3	0	0
Wäscherei	3	1	2
Lackiererei, Färberei	2	0	0
Sonstige	10	1	0

Tab. 7: Anzahl untersuchter Firmenabwässer mit Zuordnung zur Branche und Anzahl positiver Befunde zu den Leitsubstanzen PFOA und PFOS.

Aus der Literatur sind Vergleichswerte aus Österreich bekannt (Hohenblum et al. 2003). Dort wurden 15 relevante Betriebe untersucht und in neun Abwässern wurden PFC nachgewiesen, die vorwiegend den Branchen Papier, Leder und Textil zuzuordnen sind. Der Höchstwert für PFOS betrug allerdings nur 2,5 µg/L und für PFOA 0,56 µg/L. Untersuchungen in NRW und anderen Bundesländern in den letzten Jahren bestätigen die Auffälligkeiten bei den genannten Branchen.

3.4 Wildtiere

Neben dem aquatischen Biota-Monitoring wurden zwischen 2010 und 2013 die bayernweite Belastung terrestrischer Wildtiere mit PFC untersucht (ausführlicher Bericht siehe Körner et al. 2016). Um einen Überblick über die Belastung von Säugetieren in Waldökosystemen in Bayern zu erhalten, wurden aus mehreren bayerischen Waldgebieten mit unterschiedlicher anthropogener Beeinflussung die Lebern von Rehen (Pflanzenfresser) und Wildschweinen (Allesfresser) bzgl. der Anreicherung von PFC untersucht. Die Leber als primäres Anreicherungs- und Entgiftungsorgan des Organismus erfasst zurückliegende wie aktuelle Expositionen. Aufgrund der sehr viel größeren Blatt- bzw. Nadeloberfläche im Verhältnis zur bedeckten Bodenfläche ist der depositionsbedingte Eintrag von persistenten Schadstoffen in Waldökosysteme wesentlich größer als der in Gras- und Ackerland („Auskämmeffekt“). Da in Waldökosystemen zahlreiche Wirbeltierarten am Boden leben und ihre Nahrung vom oder aus dem Boden beziehen, ist von einer höheren nahrungsbedingten Exposition gegenüber PFC auszugehen als bei Tierarten, die bevorzugt offenes Gelände bewohnen. Entsprechend ist als Folge der Bioakkumulation bei Waldtierarten mit einer höheren inneren Belastung, d. h. höheren Schadstoffkonzentrationen im Organismus zu rechnen.

Als Untersuchungsgebiete waren der Ebersberger Forst als urban beeinflusster Ballungsraum, der Öttinger Forst als Chemiestandort sowie der Nationalpark Berchtesgaden (NP BGL) vorgesehen. Zusätzlich wurde mit dem Lehr- und Forschungsrevier der Landesjagdschule in Wunsiedel ein dünn besiedeltes Gebiet ausgewählt.

In diesen Gebieten sollten von jeweils 15 Rehen (Pflanzenfresser) und 15 Wildschweinen (Allesfresser) Leberproben und, wenn möglich, Fleischproben genommen werden. Im NP BGL wurde neben dem Reh zusätzlich die Gämse als Pflanzenfresser mit anderem Habitat und anderer Ernährung untersucht. Wildschweine leben dort nicht.

Im Ebersberger Forst und Öttinger Forst gibt es jeweils nur wenige Wildschweine, so dass trotz intensiver Bemühungen des zuständigen Forstbetriebs Wasserburg leider keine Wildschweinproben aus diesen beiden Gebieten erhältlich waren. Deshalb wurde im Herbst 2011 der Forstbetrieb des Fürst Öttingen-Wallerstein wegen Wildschweinproben angefragt, damit gesichert wenigstens aus einem Gebiet 15 Wildschweinlebern analysiert werden konnten. Von der Landesjagdschule in Wunsiedel konnte zusätzlich noch eine Wildschweinprobe erhalten werden.

In den Wildtierproben wurden die in Kapitel 2, Tab. 1 aufgelisteten PFC-Einzelverbindungen und zusätzlich ADONA bestimmt. Ausführliche Angaben zur Probenaufarbeitung und Analytik finden sich bei Körner et al. 2016.

Rehe

In den Rehleberproben aus dem Ebersberger Forst, dem Nationalpark Berchtesgaden und dem Öttinger Forst waren die Konzentrationen an PFC durchweg niedrig. Deshalb wurde für die zuletzt erhaltenen Proben aus Wunsiedel auf die aufwändige Analytik verzichtet. In der Mehrzahl der Proben aus allen drei Gebieten waren die Substanzen PFBA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnA und PFOS jeweils im unteren $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich bestimmbar.

Beispielhaft sind die Ergebnisse für die PFOS und PFOA vergleichend für die drei Gebiete in Abb. 27 in Box-Whisker-Diagrammen dargestellt. Die roten Kreuze in diesen Diagrammen geben jeweils Minimum und Maximum an, die untere und obere horizontale Linie des Rechtecks repräsentiert das 25. bzw. 75. Perzentil, der blaue Querstrich stellt den Medianwert dar.

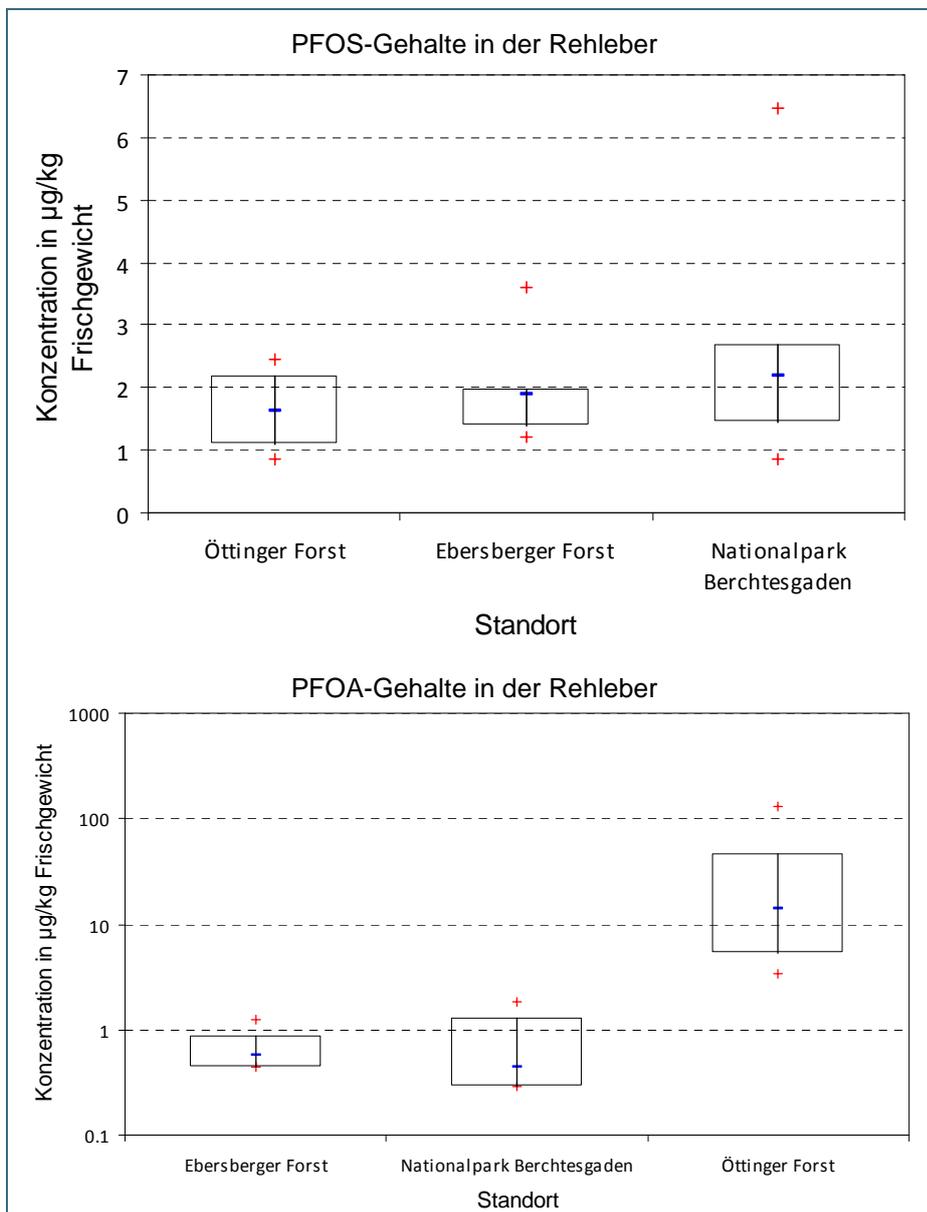


Abb. 27: Vergleich der PFOS- und PFOA-Konzentrationen in Lebern von Rehen aus drei verschiedenen Gebieten in $\mu\text{g}/\text{kg}$ Frischgewicht.

Für PFOS sind nennenswerte Unterschiede zwischen den drei Gebieten weder im Median noch für den Konzentrationsbereich erkennbar. Dies weist auf eine weiträumige Verbreitung von PFOS bzw. von relativ flüchtigen PFOS-Vorläuferverbindungen auf dem Luftweg und depositionsbedingte Einträge hin. Dies scheint offensichtlich in ähnlicher Weise für die gefundenen perfluorierten Carbonsäuren

zu gelten, deren Verbreitung vermutlich auf dem atmosphärischen Transport von flüchtigen polyfluorierten Telomeralkoholen und anderen Fluortelomerverbindungen und ihrer oxidativen abiotischen und biotischen Transformation zu den entsprechenden perfluorierten Säuren beruht.

Dagegen liegen die PFOA-Gehalte in den Leberproben aus dem Öttinger Forst deutlich über den Leberproben aus den anderen beiden gebieten. Im Öttinger Forst lagen in vier der 15 untersuchten Leberproben die Gehalte über 40 µg/kg Frischgewicht (FG). Der Höchstwert, der in dieser Serie gemessen wurde, lag bei 132 µg/kg FG. Die hohen PFOA-Gehalte spiegeln den depositionsbedingten Eintrag von PFOA-Emissionen aus dem Chemiepark Gendorf aus der Vergangenheit und die dadurch bedingte Belastung des Waldökosystems wieder.

Das seit Oktober 2008 im Chemiepark Gendorf als PFOA-Ersatzstoff bei der Fluorpolymerherstellung als Emulgator eingesetzte ADONA wurde in sechs der 15 Rehlebern oberhalb der Bestimmungsgrenze (0,2 – 0,3 µg/kg FG) in Konzentrationen von 0,6 bis 1,5 µg/kg FG gefunden. Diese Ergebnisse sind konsistent mit den Resultaten eines Immissionsmessprogrammes im Umfeld des Chemieparks Gendorf von Ende 2009 bis Mai 2010. ADONA wurde in Luft- und Depositionsproben in einem Konzentrationsbereich gefunden, der nach Verwendungsmenge und Rückhalteeffizienz zu erwarten war. Die Gehalte lagen deutlich niedriger als die PFOA-Werte in einem analogen Messprogramm im ersten Halbjahr 2008 (Ulman et al. 2012).

Die Vorbelastung des Untersuchungsgebietes Öttinger Forst mit perfluorierten Substanzen bildet sich in den untersuchten Rehleberproben ab. Da auch das erst seit 2009 eingesetzte PFOA-Ersatzprodukt ADONA in Rehlebern bereits feststellbar ist, sollte die Entwicklung dieser neuen Belastung in den nächsten Jahren weiterverfolgt werden.

Wildschweine

In den untersuchten 15 Wildschweinlebern aus Hohenaltheim, Landkreis Donau-Ries, wurden Gehalte an PFOS im unteren dreistelligen µg/kg-Bereich nachgewiesen. In Tab. 8 sind die Nachweishäufigkeit (Bestimmung in Konzentrationen > BG), Minimum, Maximum und Median der Einzelverbindungen zusammengefasst.

Die PFOS-Gehalte lagen in einem engen Konzentrationsbereich von 78 bis 416 µg/kg FG mit einem Medianwert von 138 µg/kg FG. Der enge Konzentrationsbereich in den Wildschweinlebern ist sicher eine Folge der Umzäunung des Reviers und spiegelt die offensichtlich relativ gleichmäßige räumliche Verteilung der PFOS-Belastung in diesem Waldökosystem wieder. In frei zugänglichen Forsten werden hingegen Wildschweine angetroffen, die im Laufe ihres Lebens weite Wanderungstrecken zurückgelegt haben und sich dadurch in verschiedenen bewachsenen und durchaus unterschiedlich mit persistenten Schadstoffen belasteten Ökosystemen aufgehalten haben.

Von den anderen perfluorierten Säuren waren die längerkettigen Carbonsäuren ab der PFHpA in allen Proben zu finden; die Konzentrationen lagen aber in der Regel unter 10 µg/kg FG und wie bei PFOS in einem engen Konzentrationsbereich.

Sub- stanz	Nach- weis- häufigkeit (%)	Minimum (µg/kg FG)	Maximum (µg/kg FG)	Median (µg/kg FG)
PFBA	100	0,43	1,3	0,73
PFBS	53	n.n.	0,41	0,25
PFPeA	13	n.n.	0,3	-
PFHxA	67	n.n.	1,1	0,49
PFHxS	93	<BG	2,7	0,98
PFHpA	100	0,3	2,7	1,9
PFOA	100	1,4	8,3	5,6
PFOS	100	78	416	138
PFNA	100	3,3	12,7	8,7
PFDA	100	5,4	10,9	7,3
PFUnA	100	4,7	11	6,6
PFDoA	100	4,5	9,7	5,6

Tab. 8: Nachweishäufigkeit, Minimum, Maximum, Medianwert der PFC-Konzentrationen in Wildschweinlebern aus dem Forst Hohenthalheim, Landkreis Donau-Ries.

Die Untersuchung von Wildschweinen aus mehreren Gebieten Bayerns auf PFOS und andere PFC könnte weitere Erkenntnisse über deren Belastung liefern. PFOS wurde im Rahmen dieses Projektes wie auch in Untersuchungen anderer Länder in relativ hohen Konzentrationen gefunden. Auch zahlreiche weitere, insbesondere längerkettige perfluorierte Carbonsäuren waren in allen analysierten Leberproben zu finden, wenngleich in niedrigen Konzentrationen, was auf einen atmosphärischen Ferntransport und Deposition dieser Stoffe bzw. ihrer polyfluorierten Vorläuferverbindungen (Fluortelomer-Verbindungen) hinweist.

Gämsen

Die Gämseleberproben aus dem Nationalpark Berchtesgaden zeigten insgesamt noch geringere Gehalte an perfluorierten Tensiden als die Rehleberproben aus diesem und zwei anderen Gebieten. PFOA lag in keiner Probe über der Bestimmungsgrenze. In einem Teil der Gämselebern waren PFBA, PFNA, PFDA und PFOS bestimmbar. Die PFUnA wurde in allen 17 untersuchten Gämselebern im Bereich von 0,4 bis 1,3 µg/kg Frischgewicht (FG) gefunden. In einigen Proben waren auch geringe Konzentrationen an PFHxA bzw. PFDoA bis maximal 1,0 µg/kg FG nachweisbar.

PFOS war in elf der 17 Gämselebern im Bereich von 0,4 bis 1,5 µg/kg FG quantifizierbar, während sie in allen 15 Rehleberproben aus dem Nationalpark Berchtesgaden in Konzentrationen von 0,9 bis 6,5 µg/kg FG gefunden wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Wildtierproben sich insgesamt als geeignet erwiesen, um Belastungen von Waldökosystemen mit PFC festzustellen. Die Probenzahl pro Gebiet (n = 15) war ausreichend um Belastungsunterschiede zwischen den einzelnen Gebieten zu erkennen.

3.5 Boden

3.5.1 Erstes PFC-Screening

2006 wurde in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) ein PFC-Screening auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden durchgeführt. Insgesamt wurden 87 Bodenproben ausgewählt und auf die PFC-Leitsubstanzen (PFOS, PFOA) im Feststoff untersucht.

Für das Screening wurden 29 Oberbodenproben von land- und forstwirtschaftlichen Flächen aus der LfU-Bodenprobenbank ausgewählt. Auswahlkriterium waren erhöhte EPA-PAK-Gehalte. Dabei stehen die EPA-PAK für 16 polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die durch die Amerikanische Bundesumweltbehörde (US-EPA) 1977 als prioritäre Umweltschadstoffe eingestuft wurden und als Indikator für einen anthropogenen Zusatzeintrag gelten.

Zusätzlich wurden bayernweit insgesamt 28 landwirtschaftlich genutzte, mit Klärschlamm bzw. Bioabfallkompost beaufschlagte Flächen ausgewählt und beprobt, da Klärschlämme und Bioabfälle als eine mögliche Quelle für PFC-Einträge in Böden angesehen werden. Zudem wurden neun Bodenproben von insgesamt fünf geeigneten Standorten im Einflussbereich des Industrieparks Gendorf untersucht.

In den Oberböden ackerbaulich genutzter Standorte mit erhöhtem Immissionseinfluss konnten PFOA und PFOS jeweils nur in einem Viertel aller Proben in Spuren (i.d.R. im Bereich der Nachweisgrenze) nachgewiesen werden (siehe Tab. 9).

Probenart	Tiefe (cm)	PFOA (µg/kg TM)	PFOS (µg/kg TM)
Oberboden	0-35	4*	n.n.
Oberboden	0-25	n.n.	n.n.
Oberboden	0-20	n.n.	n.n.
Oberboden	0-34	n.n.	4*
Oberboden	0-20	n.n.	5*
Oberboden	0-18	n.n.	n.n.
Oberboden	0-31	n.n.	n.n.
Oberboden	0-23	n.n.	n.n.
Oberboden	0-24	3*	n.n.
Oberboden	0-13	4*	3,5*
Oberboden	0-12	n.n.	6,5*
Oberboden	0-8	n.n.	n.n.
Oberboden	0-35	n.n.	n.n.
Oberboden	0-27	n.n.	n.n.
Oberboden	0-30	< 4*	n.n.
Oberboden	0-25	n.n.	n.n.
Oberboden	0-10	n.n.	n.n.
Oberboden	0-24	n.n.	n.n.
Oberboden	0-33	4,5*	4*
Oberboden	0-18	n.n.	4,5*
Oberboden	0-16	n.n.	n.n.
Oberboden	0-18	n.n.	n.n.
Oberboden	0-24	n.n.	n.n.
Oberboden	0-12	3*	n.n.
Oberboden	0-18	n.n.	n.n.
Nadelwald mit maximalen EPA-PAK – Gehalten in Nordostbayern:			
Humusauflage	4	4,5*	15
Oberboden	0-7	n.n.	n.n.
Nadelwald mit minimalen EPA-PAK-Belastung in Westbayern:			
Humusauflage	1,5	n.n.	n.n.
Oberboden	0-10	n.n.	n.n.

*Spuren unterhalb der BG von 10 µg/kg TM und > bzw. ≥ der NG von 3 µg/kg TM.

Tab. 9: PFOA- und PFOS-Gehalte in landwirtschaftlich genutzten Oberböden sowie Auflagen und Oberböden zweier Forststandorte (Beprobung 2000 bis 2004).

Auch in den Oberböden der mehrfach mit Klärschlamm oder Bioabfallkompost beaufschlagten Flächen war PFOA nicht, PFOS nur in zwei Fällen (Bioabfallkompost) und hier nur in Spuren im Bereich der Nachweisgrenze (3 µg/kg TS) zu finden (siehe Tab. 10). In den Unterböden war in keiner Fläche PFOA und PFOS nachweisbar. Bei den Klärschlämmen handelte es sich überwiegend um kommunale Klärschlämme, einige stammten auch aus der Nahrungsmittelindustrie. Die Bioabfälle waren v.a. Bioabfallkomposte (mit oder ohne Grüngutkomposte), einige auch Gärrückstände aus Biogasanlagen, die in größerem Umfang Bioabfälle mitvergären.

Probenart	Beaufschlagung	Tiefe (cm)	PFOA (µg/kg TM)	PFOS (µg/kg TM)
Oberboden	KS	0-20	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	21-40	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-30	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	30-60	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-25	n.n.	n.n.
Unterboden	BAK	25-45	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-30	n.n.	n.n.
Unterboden	BAK	30-55	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-28	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	28-60	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-28	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	28-60	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-25	n.n.	3*
Unterboden	BAK	25-60	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-25	n.n.	n.n.
Unterboden	BAK	25-60	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-30	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	30-60	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-30	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	30-60	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-25	n.n.	n.n.
Unterboden	BAK	25-55	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-30	n.n.	n.n.
Unterboden	BAK	30-60	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-20	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	30-60	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-25	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	30-60	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-15	n.n.	3*
Unterboden	BAK	15-30	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-30	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	30-60	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-30	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	30-50	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-30	n.n.	n.n.
Unterboden	BAK	30-60	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	00-30	n.n.	n.n.
Unterboden	BAK	30-50	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-20	n.n.	n.n.
Unterboden	KS	20-40	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-20	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-25	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-25	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-30	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-25	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-20	n.n.	n.n.
Oberboden	KS	0-30	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-30	n.n.	n.n.
Oberboden	BAK	0-30	n.n.	n.n.

Tab. 10: PFOA und PFOS-Gehalte in Bodenproben von mit Klärschlamm (KS) und Bioabfallkomposten (BAK) beaufschlagten landwirtschaftlichen Nutzflächen (Beprobung 2006).

*Spuren unterhalb der BG von 10 µg/kg TM und größer bzw. größer gleich der NG von 3 µg/kg TM.

Demgegenüber konnte PFOA in allen Proben aus dem Ufer- und Auewaldbereich der Alz (PFOA < 32 µg/kg) nachgewiesen werden (siehe Tab. 11). Im Öttinger Forst erreichten die PFOA-Gehalte am Standort im Hauptimmissionsbereich des Industrieparks 249 µg/kg (Unterboden) sowie 179 µg/kg (Oberboden) am zweiten außerhalb des direkten Immissionseinflusses untersuchten Standorts. PFOS wurde nur in einer Auflagenprobe in Höhe der Nachweisgrenze bestimmt.

Probenart	Tiefe (cm)	PFOA (µg/kg TM)	PFOS (µg/kg TM)
Gesamtboden 1**	0-60	10	n.n.
Oberboden 2	0-15	32	n.n.
Unterboden 2	15-45	24	n.n.
Gesamtboden 3**	0-60	11	n.n.
Oberboden 4	0-7 ^a	80	n.n.
Unterboden 4	7-67 ^b	249	n.n.
Humusaufgabe 5	5	163	(3) ^e
Oberboden 5	0-7 ^c	179	n.n.
Unterboden 5	7-60 ^d	42	n.n.

Tab. 11: PFOA- und PFOS-Gehalte in Bodenproben aus dem Ufer- und Auewaldbereich der Alz sowie im Öttinger Forst (Beprobung 2006).

**keine Trennung in Ober- bzw. Unterboden möglich

^a variable Horizontmächtigkeit: Untergrenze Oberboden 2 – 7 cm

^b variable Horizontmächtigkeit: Untergrenze Unterboden 55 – 67 cm

^c variable Horizontmächtigkeit: Untergrenze Oberboden 1 – 7 cm

^d variable Horizontmächtigkeit: Untergrenze Unterboden 50 – 60 cm

^e Spuren unterhalb der BG von 10 µg/kg TM und größer bzw. größer gleich der NG von 3 µg/kg TM

2007 wurden im Raum Gendorf weitere Bodenuntersuchungen durchgeführt, um die Ergebnisse aus dem Jahr 2006 zu validieren und mögliche Zusammenhänge mit den vorhandenen Grundwasserbelastungen herzustellen. Ziel war es dabei u.a. den atmosphärischen Depositionsbereich für PFC in Böden einzugrenzen, sowie landwirtschaftliche Nutzflächen im Umfeld des Industriestandorts Gendorf in die Untersuchungen einzubeziehen. Bei der Auswahl der Messstellen wurde besonderes Augenmerk auf die Böden im Auenbereich und im Öttinger Forst gelegt. Die Proben wurden im April 2007 entnommen und analysiert (siehe Tab. A7 im Anhang).

Die dabei festgestellte Verteilung auf mehrere Bodenhorizonte bei einer mit der Tiefe stark abnehmenden Konzentration spricht für eine gewisse Mobilität der PFOA. Aufgrund der relativ hohen Wasserlöslichkeit ist eine Verfrachtung von PFOA aus dem Boden ins Grundwasser wahrscheinlich. Zur Quantifizierung dieser Frachten und für eine Prognose weiterer Entwicklungen wurden daher im Juni 2008 an drei Stellen im Umfeld des Industrieparks sog. Lysimeter-Bodensäulen mit einer Fläche von 1 m² und einer Höhe von 2 m entnommen, die bis Ende 2015 in der Lysimeteranlage des LfU in Wiesenbach intensiv auf das Austragsverhalten von PFOA untersucht wurden. Die Ergebnisse der Lysimeterstudien fasst Kapitel 5.2.1 zusammen.

Weitere Bodenuntersuchungen 2009 führten zu einer Abschätzung der PFOA-Konzentration in den an den IPWG angrenzenden Waldflächen. Es zeigte sich, dass aufgrund von Auskämmeffekten der Bäume, die auch für andere über die Luft verbreitete Schadstoffe beobachtet werden können, die PFOA-Konzentrationen in der Streuaufgabe von Waldflächen deutlich höher ist als auf landwirtschaftlichen Flächen und in Siedlungsgebieten. Aufgrund der relativ hohen Mobilität von PFOA ist bei den festgestellten Bodenkontaminationen vor allem der Pfad Boden-Grundwasser relevant. Eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit, auch über einen möglichen Transfer Boden-Pflanze, ist bei den vorgefundenen Konzentrationen nach bisherigem Kenntnisstand auszuschließen.

Die deutlich niedrigeren Belastungen außerhalb von Forstflächen zeigten sich auch bei Untersuchungen 2010 in Neubaugebieten im Raum Emmerting. Es wurden, wenn überhaupt, nur sehr niedrige Feststoffkonzentrationen im Bereich der Bestimmungsgrenze des Messverfahrens gefunden.

3.5.2 PFC-Gehalte in Bodenproben der Bodendauerbeobachtungsflächen

Um langfristige, möglicherweise für die Umwelt und letztlich für uns Menschen negative Veränderungen in unseren Böden zu erkennen, wird am Bayerischen Landesamt für Umwelt das sog. Bodenmonitoring durchgeführt.

Dabei werden seit Mitte der achtziger Jahre in bestimmten zeitlichen Abständen an sogenannten Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) Bodenproben entnommen und auf ihre (Schad)stoffgehalte untersucht. Das LfU betreut derzeit 61 BDF.

Von 13 BDF wurde der Feinbodenanteil (Korngröße < 2mm) der Oberbodenproben der letzten turnusmäßigen Probenahme in 2016 zusätzlich zur Standardanalytik auch auf PFC-Gehalte im S4-Eluat nach DIN 38414-4:1984 untersucht, um die Hintergrundwertbelastung natürlicher Böden zu ermitteln. Abb. 28 zeigt die Lage der untersuchten BDF.

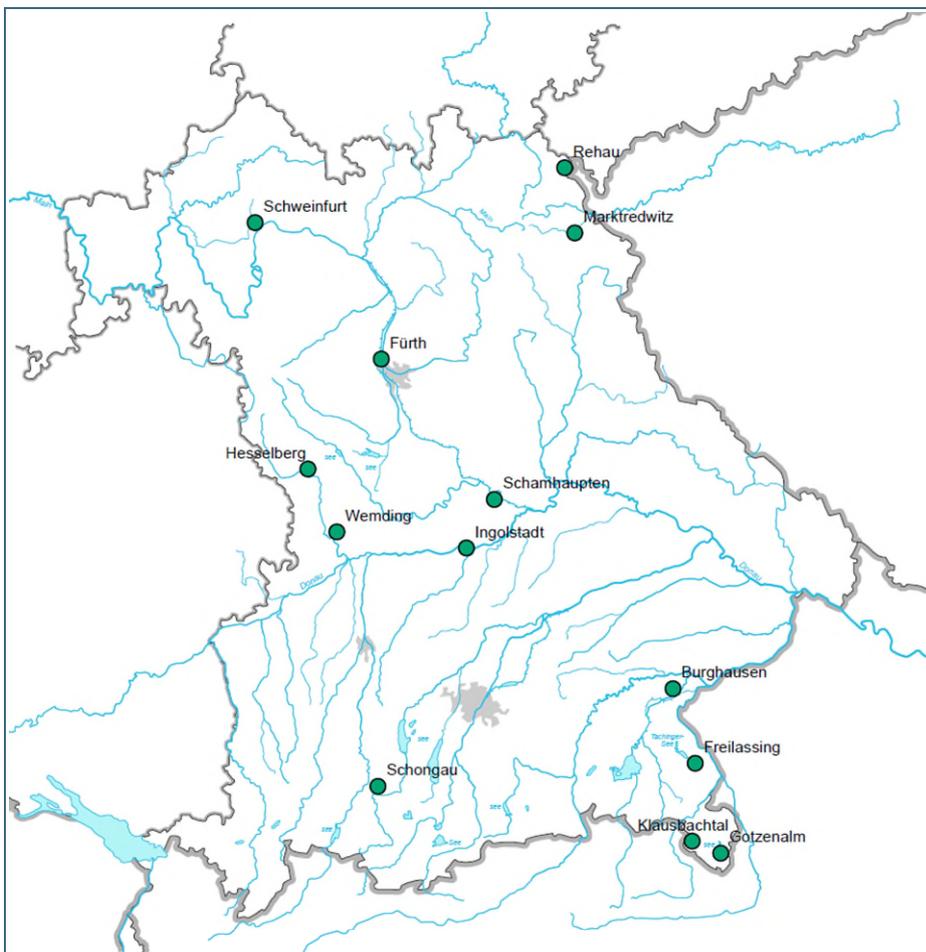


Abb. 28: Lage der BDF an denen PFC-Untersuchungen im Eluat bzw. Feststoff vorliegen.

Die Ergebnisse zeigen, dass in allen untersuchten Böden PFC im Bodeneluat nachweisbar sind (siehe Abb. 29). Neben PFOS und PFOA wurden die kurzkettigen Perfluorcarbonsäuren PFBA, PFPeA, PFHxA und PFHpA in den höchsten Konzentrationen detektiert.

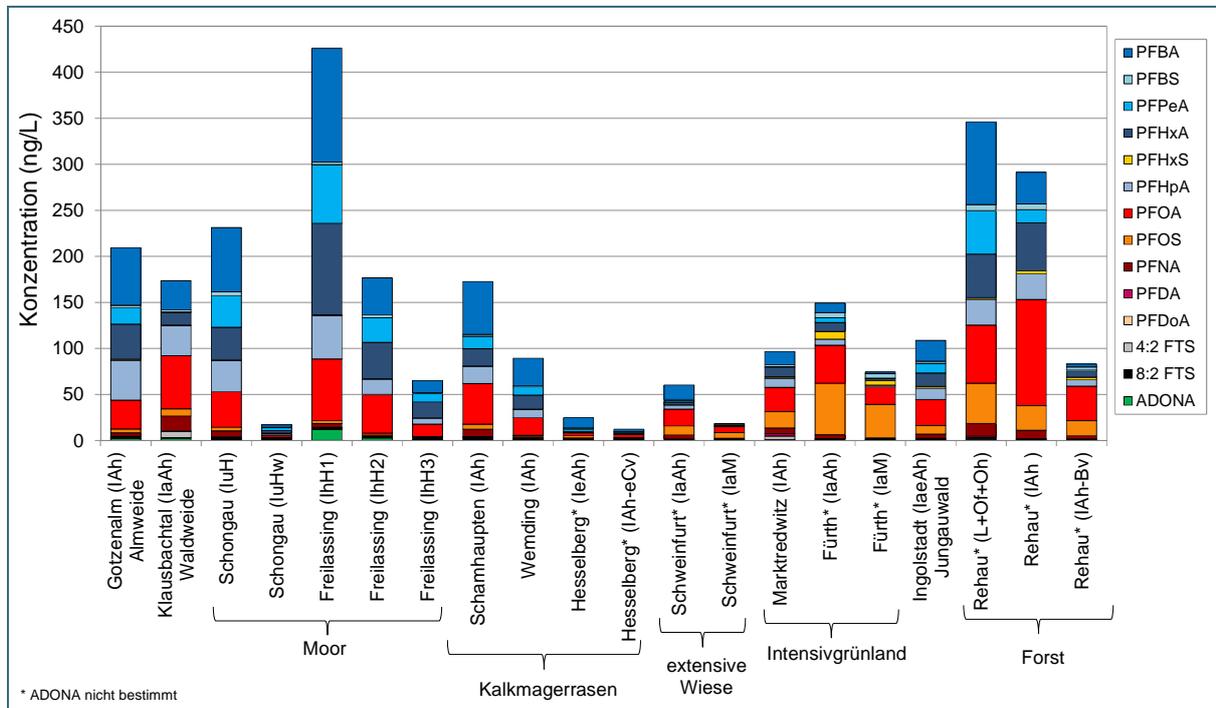


Abb. 29: PFC-Konzentrationen im S4-Eluat des Feinbodens (Korngröße < 2 mm) der Bodendauerbeobachtungsflächen im Jahr 2016

Der Nadelwaldstandort Rehau zeigte in der Humusaufgabe einen PFOA-Gehalt knapp unterhalb des aktuellen Leitwerts (Stufe 1) von 100 ng/L und im Oberboden eine knappe Überschreitung. Hierfür könnten sowohl Auskämmeffekte des Nadelwaldbestandes im Hinblick auf luftgetragenes PFC als auch die Nähe zu regionalen potenziellen Emittenten verantwortlich sein. Daneben wurden auch hohe Konzentrationen am Standort Freilassing, einem leicht entwässertem Hochmoor, nachgewiesen. Die Konzentrationen werden hier wahrscheinlich durch erhöhte Immissionen aufgrund eines hohen Jahresniederschlags verursacht. Zudem könnte auch der hohe organische Kohlenstoffanteil im Hochmoorboden einen erhöhten PFC-Rückhalt im Boden bewirken. An diesem Standort wurde neben den perfluorierten Verbindungen auch der PFOA-Ersatzstoff ADONA in einer Konzentration von 11 ng/L detektiert. Auch an den emissionsfernen Standorten Gotzenalm und Klausbachtal liegt die PFC-Konzentration im Bodeneulat über 150 ng/L. Dies kann sehr wahrscheinlich ebenfalls auf hohe Jahresniederschläge und damit einhergehende hohe Immissionen zurückgeführt werden.

Der Schadstoffeintrag über Deposition wird durch die starke Abnahme der PFC-Gehalte mit zunehmender Tiefe an den Bodendauerbeobachtungstandorten Schongau, Freilassing, Hesselberg, Schweinfurt, Fürth und Rehau deutlich.

Bodendauerbeobachtungsfläche Burghausen

An der BDF Burghausen wurden aufgrund der besonderen Belastungssituation, der Lage im Immissionsbereich des Industrieparks Gendorf, vertiefende Untersuchungen vorgenommen. Anhand von tiefgefrorenen Proben des LfU-Bodenarchivs wurden retrospektiv die PFOA-Gehalte im Feststoff für die BDF Burghausen der Jahre 1987, 1994 und 2007 horizontbezogen analysiert. Diese BDF befindet sich im Immissionsbereich des Industrieparks Gendorf. Auch unter Berücksichtigung von möglicherweise lagerungsbedingten PFOA-Verlusten wird ein Anstieg der PFOA-Gehalte über den Depositionszeitraum deutlich (siehe Abb. 30). Gleichzeitig erfolgt eine deutlich erkennbare Tiefenverlagerung von PFOA-Anteilen von der Bodentiefe 20 cm (IAI-Bv) auf 70 cm (IIIBtv1) unter GOK.

Aufgrund dieser Beobachtungen wurde die BDF Burghausen als sog. Schwerpunktfläche seit 2010 alle drei Jahre horizontbezogen auf PFOA im Feststoff untersucht. Seit der Beendigung des Einsatzes

von PFOA im Jahre 2008 ist ein deutlicher Rückgang, v.a. in den stärker belasteten, oberflächennahen Horizonten zu verzeichnen. Die bereits festgestellte Tiefenverlagerung setzt sich allerdings fort, so dass PFOA 2016 die bodenkundliche Standardbeprobungstiefe von 100 cm unter GOK (IVeIcV) erreicht hat.

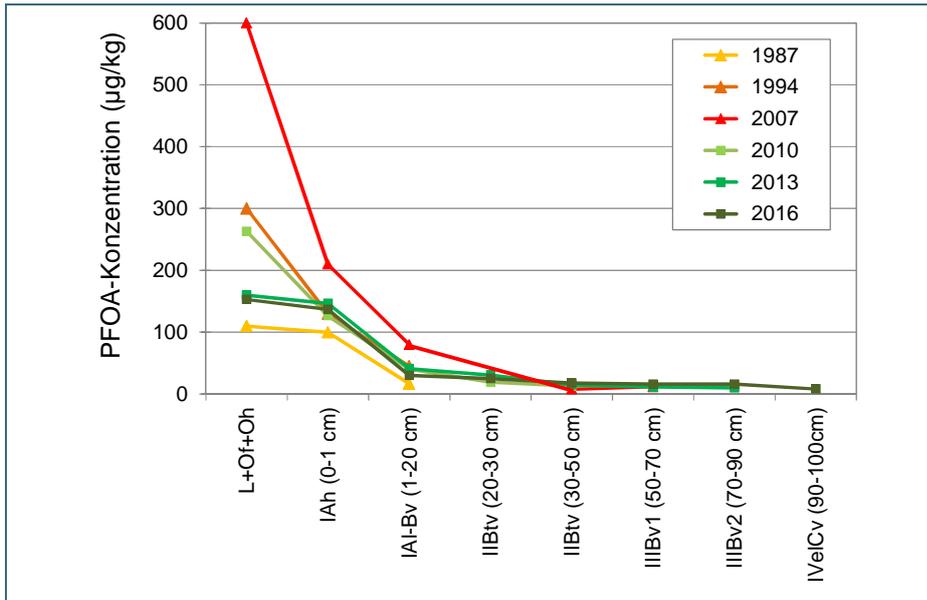


Abb. 30: Zeitverlauf der PFOA-Gehalte im Feststoff am Bodendauerbeobachtungsstandort Burghausen.

Im S4-Eluat vorgenommene Analysen (siehe Abb. 31) zeigen durchweg Gehalte oberhalb des vorläufigen Stufe-2-Werts von 0,4 µg/L und bestätigen die Beobachtungen der Feststoffanalysen mit den höchsten Konzentrationen in den oberflächennahen Horizonten und einer fortschreitenden Tiefenverlagerung. In den oberen Horizonten ist 2016 eine deutliche Abnahme des PFOA-Niveaus erkennbar.

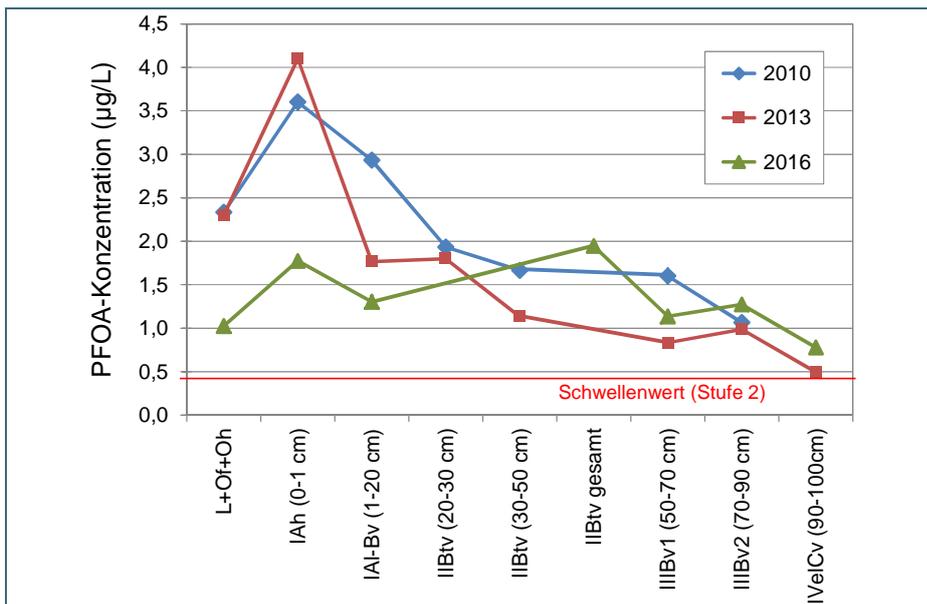


Abb. 31: Zeitverlauf der PFOA-Gehalte im S4-Eluat am Bodendauerbeobachtungsstandort Burghausen.

Seit 2008 wird ADONA als PFOA-Ersatzstoff von der Firma Dyneon eingesetzt, weshalb dieser Stoff seit 2010 auch an der BDF untersucht wird. Abb. 32 zeigt den Verlauf der ADONA-Feststoffkonzentrationen von 2010 bis 2016.

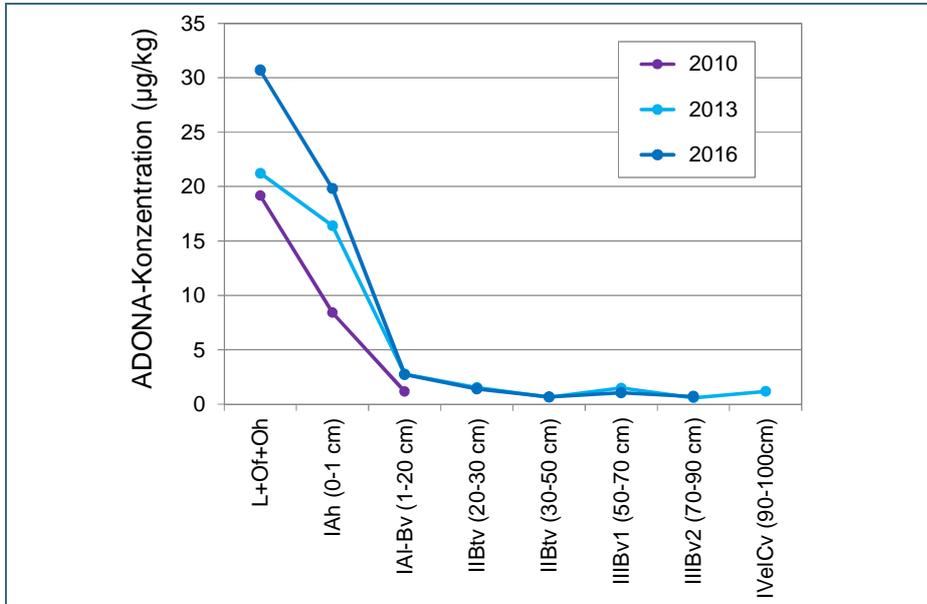


Abb. 32:
Zeitverlauf der
ADONA-Gehalte im
Feststoff am Boden-
dauerbeobach-
tungs-
standort Burghausen.

Analog PFOA finden sich die höchsten ADONA-Konzentrationen in den oberflächennahen Horizonten. Von 2010 bis 2016 ist außerdem eine deutliche Tiefenverlagerung bis 100 cm unter GOK zu beobachten, wenn auch auf sehr niedrigem Konzentrationsniveau.

4 Altlasten und schädliche Bodenveränderungen

4.1 Situation und Datenlage

Die in Bayern vorliegenden Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen mit PFC-Kontaminationen von Boden und Gewässern sind zumeist bedingt durch den langjährigen Einsatz von PFC-haltigen Löschschäumen im Rahmen von regelmäßigen Übungen und Brandeinsätzen von Werk- und Flughafenfeuerwehren. Es handelt sich hierbei v. a. um Flugplätze (Militär- und Zivilflugplätze) und Industriestandorte (Raffinerien, Standorten der chemischen Industrie etc). Als Sonderfall zu nennen ist die großflächige PFOA-Belastung im Bereich Gendorf (siehe unten).

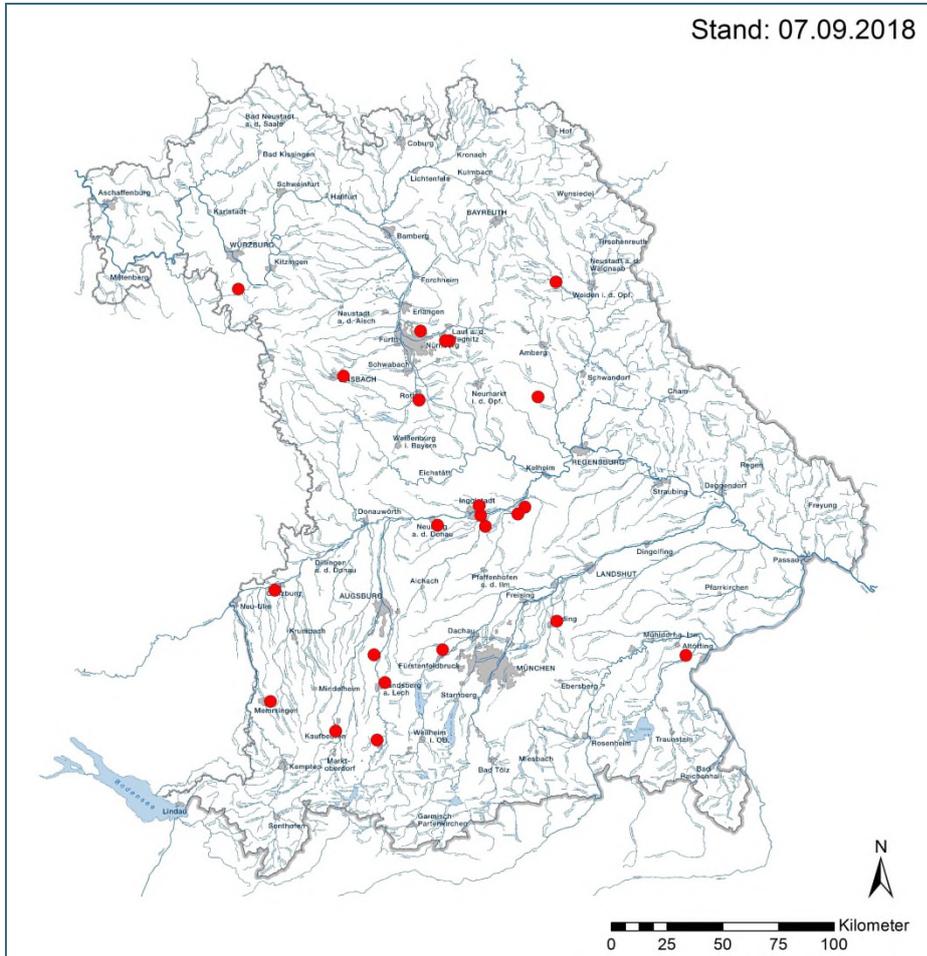
Zum Stand September 2018 sind dem Bayerischen Landesamt für Umwelt 23 Standorte mit PFC-Kontaminationen bzw. mit Verdacht auf PFC bekannt. Diese Fälle befinden sich teils in der Untersuchung, teils bereits in der Sanierung. Ein weiterer Einzelfall im Landkreis Mühldorf a. Inn (Oberbayern) wurde bereits saniert (siehe Steckbriefe in Kapitel 0).

Zur Datenlage beim LfU: vollständige und detaillierte Untersuchungsergebnisse zu den Einzelfällen liegen den jeweils zuständigen Kreisverwaltungsbehörden als untere Bodenschutzbehörden mit den örtlichen Wasserwirtschaftsämtern vor. Das LfU ist nicht bei allen Fällen in die Bearbeitung mit eingebunden. Lediglich bei 16 der im Folgenden angeführten 23 Standorte sind dem LfU Daten zu PFC im Grundwasser und Boden, teilweise auch nur auszugsweise, bekannt.

4.2 Untersuchungen und Ergebnisse

Abb. 33 und Tab. 12 geben einen Überblick über die 23 dem LfU bekannten PFC-Fälle. Die PFC-Kontamination ist in 20 dieser 23 Fälle auf den Einsatz von PFC-haltigen Feuerlöschschäumen bei Löschübungen oder Brandereignissen zurückzuführen. Bei einem Fall handelt es sich um eine Galvanik, in der PFC zum Einsatz kamen. Für einen weiteren Fall ist die PFC-Quelle noch nicht ausreichend geklärt. Einen Sonderfall stellt der Raum Gendorf im Landkreis Altötting dar. Dort liegt durch den langjährigen Einsatz von PFOA als Produktionshilfsstoff in der Fluorpolymerindustrie, bedingt durch Einträge überwiegend über den Luft- und Abwasserpfad, eine großflächige Kontamination von Boden und Grundwasser mit PFOA vor. An diesem Standort soll aktuell die Detailuntersuchung abgeschlossen werden.

Regional betrachtet verteilen sich die 23 Standorte über die Regierungsbezirke Oberbayern (10), Niederbayern (1), Oberpfalz (2), Unterfranken (1), Mittelfranken (5) und Schwaben (4).



Die maximalen PFC-Gehalte in der Tab. 12 sollen einen Einblick in die Situation in Bayern ermöglichen. Auf Grund der nicht abschließenden Datenlage (siehe oben) kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass vereinzelt noch höhere Einzelwerte auftreten oder in der Vergangenheit aufgetreten sind.

In fast allen 15 Einzelfällen, zu denen dem LfU Daten zu PFC-Einzelparametern vorliegen (für einen weiteren Fall nur Summenparameter), wurden Überschreitungen der Schwellenwerte (Grundwasser und/oder Boden-Eluat) für PFOS (13), PFOA (14) und PFHxS (13) festgestellt. Die Überschreitungen bei PFOS und PFHxS waren hierbei in der Regel deutlich höher als bei PFOA. Eine Ausnahme stellt oben genannter Sonderfall PFOA im Landkreis Altötting dar, bei dem andere PFC außer PFOA kaum eine Rolle spielen. Für PFNA wurden die Beurteilungswerte im Grundwasser oder Eluat bei 10 Fällen überschritten. Überschreitungen wurden für alle in den LfU-Leitlinien (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2017) aufgeführten PFC-Einzelparameter erfasst.

Tab. 12: Maximale PFC-Gehalte bei Altlasten, schädliche Bodenveränderung und Verdachtsflächen in Bayern

Legende:**fett:** Überschreitung der vorläufigen Schwellenwerte (Grundwasser) bzw. vorläufigen Stufe-1-Werte (Eluat)

-: keine Daten beim LfU

?: unbekannt

Ausgewertete Datenlage nicht vollständig, siehe Text.

(ehem.) Nutzung	Bezeichnung nach Standort- lage	Grundwasser (µg/L)			Boden-Eluat (µg/L)			Boden-Feststoff (µg/kg)		
		PFOS	PFHxS	PFNA	PFOS	PFHxS	PFNA	PFOS	PFHxS	PFNA
Industriestandort	Burgkirchen a.d. Alz ¹	PFOA: 114			PFOA: 4.091			PFOA: 5.813		
	Ingolstadt 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ingolstadt 2	4,8	1,7	0,012	34	1,4	0,034	840	60	0,88
	Münchsmünster	-	-	-	150	24	< 0,4	322	37	-
	Neustadt a.d. Donau	87	97	0,78	281	22	0,24	15.892	597	46
	Nürnberger Land	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Militärflugplatz	Altenstadt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ansbach	0,52	3,9	0,04	240	27	6,5	-	-	-
	Erding	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fürstenfeld- bruck	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Giebelstadt	0,063	0,15	< 0,01	-	-	-	-	-	-
	Grafenwöhr	20	6,5	0,67	510	3,1	68	-	-	-
	Günzburg	0,32	3,3	0,34	17	10	2,3	670	120	< 10
	Hohenfels ²	Σ (PFOS, PFOA, PFHxS): 0,28			30	26	0,094	370	15	< 10
	Kaufbeuren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Landsberg	0,62	0,29	0,06	140	280	4,4	3.401	202	23
	Lechfeld	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Manching	44	9,4	2,6	180	6,7	9,4	370	-	-
	Neuburg ²	Σ (PFOS, PFOA, PFHxS): 36			-	-	-	-	-	-
Roth	110	39	1,3	-	-	-	22	< 10	< 10	
?	Nürnberger Land	6,8	0,0098	< 0,01	0,35	< 0,05	0,013	13	< 10	< 10
Zivil- flugplatz	Memminger- berg	4,6	2,4	4,8	24	-	5,3	45	-	-
	Nürnberg	1.100	210	0,15	4.200	180	0,96	8.500	720	<25

¹ Weitere PFC nicht relevant² Keine Daten zu Einzelparametern vorhanden

4.3 Steckbriefe ausgewählter Altlasten und schädlicher Bodenveränderung

Die folgenden fünf Steckbriefe geben einen Überblick über schädliche Bodenveränderungen, Altlasten und Verdachtsflächen mit unterschiedlichen PFC-Kontaminationsquellen und unterschiedlichen Bearbeitungsständen wieder.

Militärflugplatz Manching

Ort	Manching, Landkreis Pfaffenhofen an der Ilm
Aktuelle Nutzung	Militärflugplatz
Bearbeitungsstand	Orientierende Untersuchungen; Detailuntersuchung in 3 Teilbereichen
Schadstoff(e)	PFC
Schadstoffquelle	Löschschaum
Kontaminationsgröße Boden Fläche Konzentration	Hauptschadensbereiche (aktueller Stand): ca. 50.000 m ² Eluatkonzentrationen bis 180 µg/L PFOS.
Kontaminationsgröße Grundwasser Fläche Konzentration	6,5 km ² (Schadstofffahne einschließlich Kontaminationsbereiche) In den PFC-Quellbereichen bis 60 µg/L gesamt PFC (Summe der 13 PFC der Leitlinien)

Der Flugplatz Manching wird seit 1960 betrieben. Im Rahmen von Übungen und Löscheinsätzen wurden PFC-haltige Löschsäume verwendet. Bei Untersuchungen des Lindacher Sees durch das Landesamt für Umwelt im Jahre 2012 wurden PFC im Weiherwasser festgestellt. Weitere Recherchen und Untersuchungen erhärteten den Verdacht, dass PFC vom nordöstlichen Bereich des Flugplatzes Manching auf einer Breite von 1.300 m mit dem Grundwasser abströmt. Kontaminiertes Grundwasser verunreinigt die Oberflächengewässer auf der Liegenschaft, die in die Westenhauser Ach abfließen.

Mehrere Verdachtsbereiche befinden sich derzeit in verschiedenen Untersuchungsphasen der Altlastenbearbeitung. An den derzeit bekannten Hauptschadensbereichen besteht aufgrund einer erheblichen Grundwasserverunreinigung und Bodenverunreinigung Handlungsbedarf (siehe Abb. 34). Sanierungsuntersuchungen werden durchgeführt.

Im Grundwasserabstrom des Flugplatzes Manching liegen die Siedlungsbereiche Lindach und Westenhausen. Für diese Siedlungsbereiche wurde durch das Landratsamt Pfaffenhofen im Mai 2018 die erlaubnisfreie Benutzung des Grundwassers und Oberflächenwassers zu Bewässerungszwecken mittels einer Allgemeinverfügung für unzulässig erklärt.

Das Oberflächengewässersystem des Flugplatzes Manching wird durch infiltrierendes Grundwasser stark verunreinigt (Gewässerfolge Westenhauser Ach → Irschinger Ach → kleine Donau → Donau). Der JD-UQN-Wert von 0,65 ng/L für PFOS wird in der mehrere Kilometer entfernt liegenden Irschinger Ach mit einem Messwert von 0,22 µg/L (Stand 08/2018) um ein Vielfaches überschritten.

Im Nahbereich bzw. Abstrombereich des Flugplatzes Manching befinden sich keine Trinkwasser- oder Heilquellenschutzgebiete.

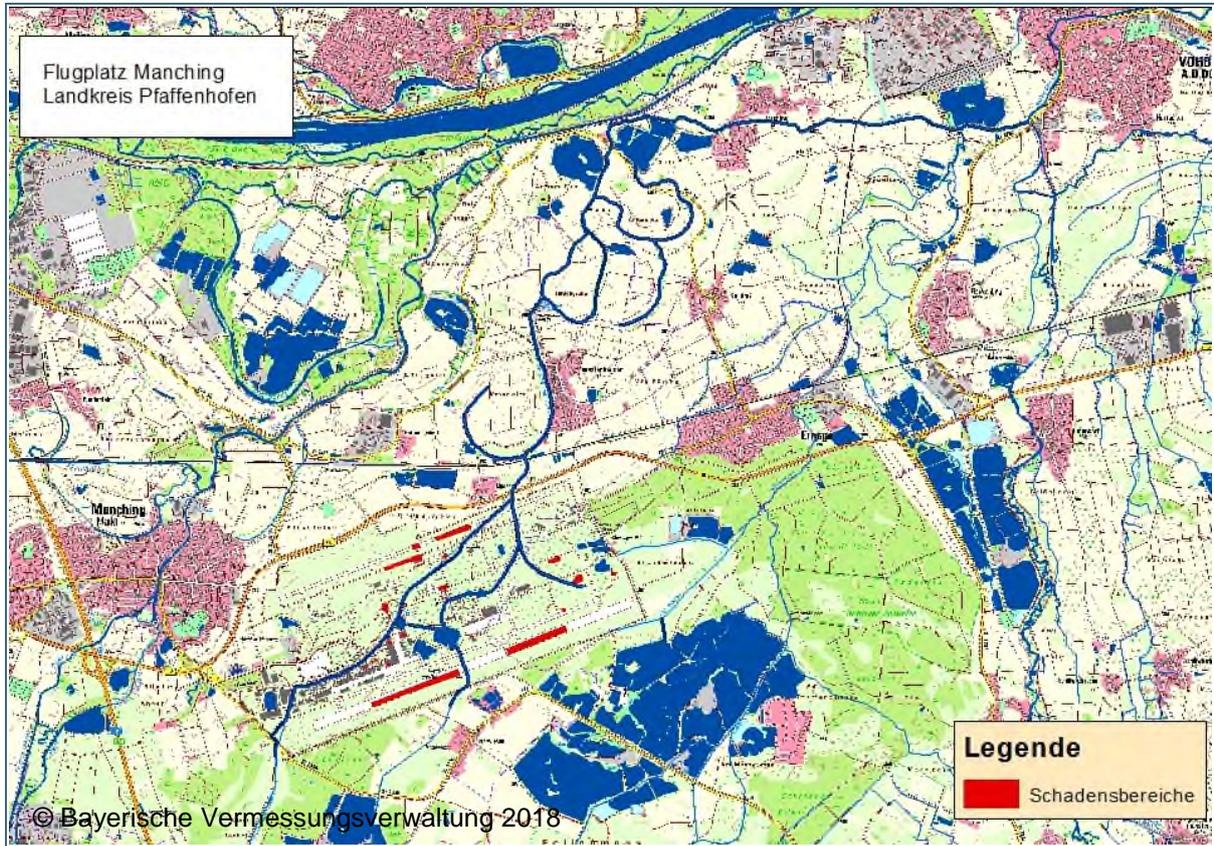


Abb. 34: Schadensbereiche am Militärflugplatz Manching

Industriestandort Neustadt an der Donau

Ort	Neustadt an der Donau, Landkreis Kelheim
Aktuelle Nutzung	Raffinerie
Bearbeitungsstand	Abschluss Detailuntersuchung; Beginn Sanierungsuntersuchung
Schadstoff(e)	PFC, insbesondere PFOS, PFOA, PFHxS
Schadstoffquelle	Löschschaum
Kontaminationsgröße Boden Fläche Konzentration	ca. 1 km ² Vielfache Stufe-2-Wertüberschreitungen
Kontaminationsgröße Grundwasser Fläche Konzentration	ca. 3 km ² Vielfache Stufe-2-Wertüberschreitungen

Auf dem Raffineriegelände wurden über viele Jahre (ca. 1992 – 2005) PFT-haltige Löschschäume im Rahmen von Einsätzen und Übungen eingesetzt. Diese gelangten dadurch in die Umwelt.

In mehreren Schritten wurden ab Dezember 2009 im Auftrag des Raffineriebetreibers auf dem Gelände, im Zu- und Abstrom Bodenproben aus möglichen Eintragsbereichen innerhalb der Raffinerie und Wasserproben aus dem Grundwasser, dem Drainage- und Abwassersystem sowie aus Oberflächengewässern entnommen. Ergänzend wurden Gewässersedimente und Fische untersucht. Auf dem Gelände wurden bisher zehn Verdachtsbereiche identifiziert. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zeigen, dass eine Sanierung erforderlich ist.

Die höchsten Konzentrationen im Boden und Grundwasser treten auf dem Raffineriegelände im Bereich der Verdachtsflächen und deren Abstrom auf. Als nächster Verfahrensschritt erfolgt eine Varianten- und Sanierungsuntersuchung.

Seit Mai 2011 wird das auf dem Raffineriegelände abgeleitete Drainagewasser intern als Brauchwasser verwertet. Eine direkte Einleitung des PFT-haltigen Drainagewassers in den Schallerbach erfolgt nicht mehr. Schwierigkeiten können sich ergeben in der Abgrenzung der Verdachtsbereiche, da großflächig Belastungen vorliegen sowie ggf. in der praktischen Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen im laufenden Raffineriebetrieb (Ex-Bereiche, Leitungen, Bebauung, Gleisverkehr etc.).

Industriestandort Gendorf

Ort	Gendorf, Landkreis Altötting
Aktuelle Nutzung	Chemiepark
Bearbeitungsstand	Abschluss Detailuntersuchung voraussichtlich bis Ende 2018
Schadstoff(e)	PFOA
Schadstoffquelle	Emission und Ableitung aus chemischer Produktion
Kontaminationsgröße Boden Fläche Konzentration	ca. 200 km ² im Oberboden des Hauptdepositionsbereichs bis ca. 4.000 µg/kg, mit zunehmender Entfernung stark abnehmend
Kontaminationsgröße Grundwasser Fläche Konzentration	> 200 km ² Im Abstrom Chemiepark zwischen 1 und 11 µg/L

Im Chemiepark Gendorf (CPG) wurde Perfluorooctansäure (PFOA) von 1968 bis 2003 hergestellt und von 1968 bis 2008 zur Produktion von Fluorpolymeren als Produktionshilfsstoff (Emulgator) verwendet. Durch den langjährigen Einsatz liegen im Umfeld des CPG Belastungen der Umwelt mit PFOA vor, deren Risikopotenzial in den Jahren von 2006 bis 2009 zunächst durch umfangreiche Untersuchungsprogramme der zuständigen Behörden erfasst und vorläufig bewertet wurden. Zur Abklärung der Herkunft und weiteren Entwicklung der PFOA-Konzentrationen in Boden und Grundwasser wurde eine Detailuntersuchung im Auftrag des CPG durchgeführt.

Die PFOA-Belastung im Boden und Grundwasser ist auf drei Eintragspfade zurückzuführen:

- Einleitung von PFOA-haltigem Abwasser aus der betrieblichen Kläranlage in die Alz
- Lokale Einträge von PFOA auf dem Gelände des CPG in den Untergrund
- Großräumiger diffuser Eintrag über Luftdeposition in die ungesättigte Bodenzone

Ergebnisse der bisher durchgeführten Untersuchungen und der Gefährdungsabschätzung:

- Die höchste Konzentration im Grundwasser tritt im Bereich des CPG auf.
- Öttinger Forst: Die Konzentration in Boden und Grundwasser nimmt mit zunehmender Entfernung zum CPG und zunehmender Tiefe ab. In den Trinkwasserbrunnen ist ein ansteigender Trend zu erkennen. Die Maximalkonzentration im Grundwasser wird nach derzeit vorliegender Modellrechnung in etwa 15 Jahren prognostiziert, eine signifikante Abnahme der PFOA-Konzentration wird nicht vor 2050 erwartet.
- Daxenthaler Forst: Die aus der Abwasser-Einleitung in die Alz resultierende Grundwasserverunreinigung klingt voraussichtlich innerhalb weniger Jahre ab. Die Folgen der PFOA-Deposition über den Luftpfad sorgen aber wie im Öttinger Forst auch in den nächsten Jahren für einen noch steigenden PFOA-Eintrag ins Grundwasser. Daher ist auch im Daxenthaler Forst die signifikante Abnahme der PFOA-Konzentration nicht vor 2050 zu erwarten.

Im Rohwasser mehrerer Trinkwasserversorgungen kam es zu geringfügigen Überschreitungen des Leitwertes von 0,1 µg/L. Die betroffenen Trinkwasserversorgungen errichteten bzw. planen die Errichtung von Aktivkohlefiltrationen zur Entfernung der PFOA.

Weitere Informationen können den Internetseiten des Landratsamts Altötting (www.lra-aoe.de/pfoa) und des LfU (www.lfu.bayern.de/altlasten/pfoa_gendorf) entnommen werden.

Verkehrsflughafen Nürnberg

Ort	Nürnberg
Aktuelle Nutzung	Flughafen
Bearbeitungsstand	Sanierungsplan genehmigt, bereits Grundwassersanierung seit 2014
Schadstoff(e)	PFC, insbesondere PFOS, PFHxS
Schadstoffquelle	Löschübungen bei Löschbecken
Kontaminationsgröße Boden Fläche Konzentration	ca. 15 Hektar (> 0,3 µg/L PFC) lokal bis zu 4.200 µg/L im Eluat
Kontaminationsgröße Grundwasser Fläche Konzentration	ca. 50 Hektar (> 0,3 µg/L PFC) 2018 im Schadenszentrum noch ca. 100 - 200 µg/L PFC

Auf dem Flughafengelände wurden über rund drei Jahrzehnte bis zur Inbetriebnahme einer gasbetriebenen Brandsimulationsanlage im Jahr 2003 Löschübungen mit PFC-haltigen Löschschäumen durchgeführt. Dabei kam es zu einer massiven Verunreinigung von Boden und Grundwasser insbesondere beim Löschbecken Ost und dem angrenzenden Biotop Ziegellach, dem Handlöschbecken West sowie der Feuerwehrtellfläche und einer kleineren Fläche im Norden, was erstmals durch Untersuchungen im Jahr 2010 bekannt wurde.

Um eine weitere Ausbreitung von PFC in die Umwelt zu minimieren, wird ab 2019 die Sanierung durch einen verbindlich erklärten Sanierungsplan geregelt und erheblich ausgeweitet. Kontaminierter Boden wird in den verschiedenen Schadensbereichen ausgehoben und im Bereich des Hauptschadenszentrums Löschbecken Ost kontrolliert eingebaut und durch Abdeckung vor Auswaschungen gesichert. Die über eine Adsorptionsanlage unter Einsatz eines optimierten Adsorptionsmittels laufende Grundwassersanierung beim Löschbecken Ost, bei der bislang ca. 5kg PFC ausgetragen wurden, wird optimiert fortgeführt. Ab 2019 soll zusätzlich eine Sanierung der Schadstofffahne vor Übertritt in die Vorflut Bucher Landgraben erfolgen, damit eine weitere Verlagerung von PFC weitgehend verhindert wird.

Die Entwicklung der PFC-Belastungen in der Umwelt wird durch ein umfassendes Monitoringprogramm für das Grundwasser und das Oberflächenwasser kontrolliert, in das auch Gartenbrunnen, Industriebrunnen und landwirtschaftliche Beregnungsbrunnen einbezogen sind. In den Beregnungsbrunnen wurden bislang noch keine relevanten PFC-Verunreinigungen festgestellt. Zusätzlich werden auch immer wieder Boden-, Sediment- und Pflanzenproben untersucht.

Industriestandort Aschau am Inn

Ort	Aschau am Inn, Landkreis Mühldorf am Inn
Aktuelle Nutzung	Chemische Industrie
Bearbeitungsstand	Sanierung abgeschlossen
Schadstoff(e)	PFC
Schadstoffquelle	Löschschaum (Brandereignis)
Kontaminationsgröße Boden Fläche Konzentration	ca. 2.000 m ² maximal 27 mg/kg
Kontaminationsgröße Grundwasser Fläche Konzentration	unbekannt unbekannt

Am 18. Oktober 2015 kam es im Gebäude 226 der Nitrochemie zu einer heftigen Explosion, die einen Brand auslöste. Der Löscheinsatz der Werksfeuerwehr sowie mehrerer Löschzüge aus der Umgebung erforderte den Einsatz großer Mengen an Löschsäumen.

Neben der unmittelbaren Umgebung des Gebäudes kam es zu einer Verbreitung der Schäume, weil diese auf einer abschüssigen Werksstraße in Richtung eines weiteren Gebäudes (616) abflossen, wo sie in einer Grünfläche versickerten.

Obwohl sich im vermuteten Abstrom des Grundwassers nach einigen Monaten keine Anzeichen eines Eintrags von PFC ergab, konnte das zukünftige Eindringen von Schadstoffen trotz eines Flurabstandes von 25 m durch Perkolation nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Zunächst durchgeführte Bodenuntersuchungen zeigten hohe PFC-Konzentrationen im Oberboden. Ein halbes Jahr später war das Eindringen einer Schadstofffront mit den Maximalkonzentrationen bis 0,6 m unter Geländeoberkante erkennbar. Hauptkomponente war PFOS mit über 90 % der Summenkonzentration der PFC. Die beaufschlagten Flächenstreifen wurden durch Bodenaustausch saniert, eine betroffene Freifläche versiegelt.

4.4 Boden- und Grundwassersanierung

In Bayern werden bereits in mehreren Fällen (u. a. Flugplätze, Raffinerien, Brandschadensfälle) Sanierungsmaßnahmen durchgeführt. Vorrangig kommen dabei Bodenaushub und Oberflächenabdichtungen sowie hydraulische Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen und passive hydraulische Maßnahmen zum Einsatz. In den Steckbriefen in Kapitel 0 sind zwei Fälle beschrieben, in denen Sanierungsmaßnahmen aktuell in der Planung sind oder bereits durchgeführt werden.

Projekt zur Aufbereitung von PFC belastetem Grundwasser

An zahlreichen Löschübungsbecken z. B. auf Flughäfen wurden durch den langjährigen Einsatz von ehemals zugelassenen fluorhaltigen Feuerlöschschäumen bei Löschübungen teils erhebliche PFC-Verunreinigungen von Boden, Grundwasser und Oberflächengewässern verursacht. Daher wurde in einem Forschungsprojekt des LfU in Zusammenarbeit mit dem DVGW - Technologiezentrum Wasser (TZW) das bewährte Verfahren der Adsorption sowie die neuen Technologien Membranfiltration und elektrochemischer Abbau auf ihre Eignung zur Entfernung von PFC aus belastetem Grundwasser untersucht. Für die Versuche wurde PFC-belastetes Grundwasser eines realen PFC-Falls, ein ehemaliges Löschübungsbecken auf einem Flughafengelände, verwendet. Für den Modellstandort war besonders zu beachten, dass eine Mischkontamination von PFC und weiteren Schadstoffen – leicht flüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (LHKW) und den aromatischen Kohlenwasserstoffen Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (BTEX) – vorliegt. Da diese leicht flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) auch bei anderen Löschschaumschäden auftreten und die PFC-Abreinigung beeinflussen können, wurden sie bei der Entwicklung der Aufbereitungstechnik mitberücksichtigt.

Tab. 13 fasst das Schadstoffspektrum im direkten Umfeld des ehemaligen Löschübungsbeckens (Grundwassermessstelle GWB 5 und 10) zusammen. Die PFC-Belastung lag an beiden Messstellen über 500 µg/L. PFOS und PFHxS stellten die Hauptkontaminanten dar. In weiteren Grundwassermessstellen im Bereich des Löschbeckens wurden BTEX- bzw. LHKW-Konzentration bis zu 229 µg/L bzw. 136 µg/L nachgewiesen.

Parameter	Einheit	GWB 5	GWB 10
PFBA	µg/L	6,1	8,4
PFBS	µg/L	13	20
PFPeA	µg/L	12	14
PFHxA	µg/L	34	45
PFHxS	µg/L	140	240
PFHpA	µg/L	5,9	6,5
PFOA	µg/L	13	22
PFOS	µg/L	520	270
6:2 FTS	µg/L	16	21
8:2 FTS	µg/L	7,3	< 2,0
Summe PFC	µg/L	767	647
Summe LHKW	µg/L	18	4,6
Summe BTEX	µg/L	38	6,2
Mangan	mg/L	1,1	0,4
Eisen	mg/L	22	64
TOC	mg/L	21	27

Tab. 13: PFC-, LHKW-, BTEX-, Mangan-, Eisen- und TOC (Total Organic Carbon)-Konzentration im Grundwasser der Grundwassermessstellen GWB 5 und GWB 10.

Membranfiltration - Laborversuche

Da PFC als gelöste Substanzen im Grundwasser vorliegen, werden für die Entfernung mittels Membranfiltration Umkehrosmose- bzw. Nanofiltrations-Membranen benötigt. Nanofiltrations-Membranen lassen einwertige Ionen und kleinere Moleküle leichter passieren als die dichteren Umkehrosmose-Membranen. Aufgrund der hohen PFC-Konzentration bei sehr geringen Konzentrationen der Begleitkontaminanten BTEX und Chlorethene wurde das Grundwasser aus GWB 10 für die Membranfiltrations-Versuche in einem Membran-Teststand im Labormaßstab ausgewählt (siehe Tab. 13). Das untersuchte Grundwasser war stark mit Trübstoffen belastet (Kolloid-Index > 5 %/min). Mit beiden Membranen wurden hohe Rückhaltevermögen nachgewiesen, wobei erwartungsgemäß die Umkehrosmose-Membran bessere Werte aufwies als die Nanofiltrations-Membran (siehe Tab. 14). Der Rückgang der Permeabilitäten zeigt eine zunehmende Verblockung der Membranen an, die auch visuell beobachtet wurde. Im Versuchsverlauf lagerte sich PFC-haltiges Material im Inneren des Teststandes ab, wie eine Analyse des Spülwassers nach Versuchsende ergab.

Membran	Nanofiltration	Umkehrosmose
PFC-Konzentration im Permeat	84 µg/L	4,5 µg/L
PFC-Rückhalt	87 – 95 %	99 %
DOC-Konzentration im Permeat	3,1 mg/L	0,74 mg/L
DOC-Rückhalt	94 – 98 %	97 – 99 %
Permeabilität	9 – 13	3,2 – 4,2

Tab. 14: Zusammenfassung der Ergebnisse der Membranfiltrations-Versuche (DOC = Dissolved Organic Carbon).

Beide Membranverfahren sind prinzipiell geeignet, um PFC aus dem Grundwasser weitgehend zu entfernen. Aufgrund der hohen Ausgangskonzentrationen im Grundwasser des Untersuchungsstandorts lagen jedoch im Permeat der Membranfiltration immer noch zu hohe PFC-Werte vor.

Elektrochemischer Abbau - Laborversuche

Das elektrochemische Oxidationsverfahren ist eine vielversprechende Methode zum Schadstoffabbau in wässrigen Systemen. Da sämtliche Oxidationsmittel in situ erzeugt werden, sind der Transport und die Lagerung von Chemikalien überflüssig. Darüber hinaus ist mit dem elektrochemischen Abbau eine vollständige Mineralisierung der PFC möglich. Damit bleiben keine PFC-belasteten Schlämme oder Adsorbentmaterialien übrig, die entsorgt werden müssen. Der Abbau von PFC erfolgt hauptsächlich mittels direkter Oxidation an der Anode (Zhuo et al. 2012; Ochiai et al. 2011; Xiao et al. 2011; Carter u. Farrell 2008).

Mit Bor-dotierten Diamant-Elektroden konnten bis zu 97 % der Summe PFC - sowie auch des DOCs - abgebaut werden (siehe Abb. 35). Für länger-kettige PFC war der Abbaugrad höher als für kürzer-kettige, da die Carbonsäuren beim elektrochemischen Abbau jeweils um ein perfluoriertes Kohlenstoffatom verkürzt werden. Die Sulfonsäuren werden zuerst in – um ein perfluoriertes Kohlenstoffatom verkürzte – Carbonsäuren umgewandelt und dann entsprechend weiter abgebaut (Zhuo et al. 2012).

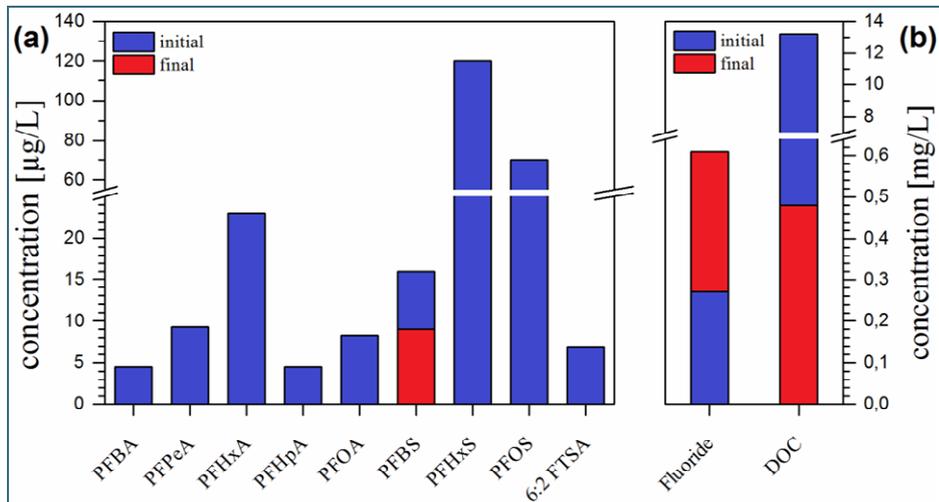


Abb. 35: PFC- (a), DOC- und Fluorid-Konzentration (b)- bei Start und Ende des elektrochemischen Abbaueversuchs mit GWB 5 (Trautmann et al. 2015).

Bei reaktiven Verfahren zur PFC-Entfernung ist die Bildung unerwünschter Nebenprodukte zu beachten. Diese können z. B. unspezifische Oxidationsprodukte von Wasserinhaltsstoffen wie Perchlorat aus Chlorid sein. Zum anderen ist der Nachweis wichtig, dass eine wirkliche Elimination der Organofluor-Belastung stattfindet und nicht nur eine Umwandlung von z. B. längerkettigen in kürzerkettige Verbindungen. Zur Bewertung reaktiver Verfahren sollte daher die Mineralisierung der PFC anhand der Fluorid-Freisetzung gemessen sowie der AOF (Adsorbierbares organisch gebundenes Fluor) als Gruppenparameter für organische Fluorverbindungen betrachtet werden (Willach et al. 2016; Lange et al. 2013; Lange et al. 2014; Wagner et al. 2013).

Die AOF-Gehalte wurden während des elektrochemischen Abbaus sehr stark reduziert. Die Bildung von PFC-Verbindungen, die mit der Stoff-spezifischen Analytik nicht erfasst werden, in relevanten Konzentrationen kann daher ausgeschlossen werden. Es entstand außerdem mehr Fluorid als aus den gemessenen PFC-Einzelstoffen freigesetzt werden kann. Dies zeigt, dass das Grundwasser neben den per Einzelstoff-Analytik identifizierten Verbindungen weitere organische Fluorverbindungen enthält, die durch den elektrochemischen Abbau überwiegend eliminiert wurden.

Bei allen Grundwasserversuchen war die Bildung von Bromat (BrO_3^-), Perchlorat (ClO_4^-) und AOX (Adsorbierbare organisch gebundene Halogene) festzustellen. Für einen praktischen Einsatz dieser Technik sind daher zum einen Aufbereitungsschritte zur Entfernung der Transformationsprodukte notwendig. Zum anderen kann durch Verfahrensanpassungen wie beispielsweise die Modifikation des Elektroden-Materials oder die Reduzierung von Stromstärke/ Spannung die Nebenproduktbildung verringert werden.

Adsorption – Laborversuche

PFC können mittels Aktivkohle oder Ionenaustauschern erfolgreich aus belastetem Wasser entfernt werden (Yu et al. 2009; Senevirathna et al. 2010). Kürzerkettige PFC sind dabei weniger gut adsorbierbar als längerkettige (Ochoa-Herrera u. Sierra-Alvarez 2008; Zhao et al. 2011; Xiao et al. 2012; Senevirathna et al. 2011). Bei der Anwesenheit anderer organischer Verbindungen im Wasser kann es durch die direkte Konkurrenz um Adsorptionsplätze bzw. Verblockung der Poren der Adsorbentmaterialien zu einer deutlichen Adsorptionsabnahme der PFC kommen (Deng et al. 2012; Zhao et al. 2011; Hansen et al. 2010; Yu et al. 2012; Zhou et al. 2010).

Für insgesamt 17 unterschiedliche Sorptionsmaterialien (Aktivkohlen, Ionenaustauscher und synthetische Aktivkohlen) wurde zunächst in Laborversuchen und anschließend an einer Versuchsanlage im halbtechnischen Maßstab die Adsorptionskinetik und Beladungskapazität bestimmt. Einen Überblick über die getesteten Materialien gibt Tab. 15.

Tab. 15: Überblick über die getesteten Sorptionsmaterialien (k.A. = keine Angabe)

Abkürzung	Bezeichnung	Hersteller	Material
AK 1	AquaSorb 5000	Jacobi	Braunkohle
AK 2	AquaSorb 6300	Jacobi	Steinkohle
AK 9	AquaSorb 1000	Jacobi	Steinkohle
IA I	Lewatit K 6362	Lanxess	stark basischer Ionenaustauscher auf Polystyrolbasis
IA II	Lewatit DW 630	Lanxess	stark basischer Ionenaustauscher auf Polystyrolbasis
PA	PerfluorAd	Cornelsen	oberflächenbehandelte nachwachsende Rohstoffe
synth. AK I	synth. AK I	Blücher	synthetische Aktivkohle
AK 3 - 5, AK 7, AK 10-11	k.A.	k.A.	Steinkohle
AK 6	k.A.	k.A.	nicht bekannt
AK 8, AK 12	k.A.	k.A.	Kokosnuss
IA III	k.A.	k.A.	schwach basischer Ionenaustauscher

In Batch-Versuchen im Labormaßstab wurde die Adsorptionsleistung aller 17 Materialien mit dotiertem Leitungswasser (Konzentrationen von PFOS, PFHxS, PFBS entsprechend den Konzentrationen im Original-Grundwasser) und Original-Grundwasser bestimmt. Die prozentuale Abnahme für die Versuche mit dotiertem Leitungswasser lag für alle getesteten Materialien zwischen 92 % und 99 % mit Ausnahme des Materials IA III mit dem nur 43 % der dotierten PFC aus dem Wasser entfernt werden konnten. Bei den Versuchen mit Original-Grundwasser fand eine deutlich geringere Adsorption statt (20 - 74 % Abnahme), was durch konkurrierende Sorption durch den im Grundwasser enthaltenen DOC von 18-20 mg/L erklärt werden kann. Lediglich mit zwei Materialien (IA I und PA) wurde auch mit Original-Grundwasser eine hohe prozentuale Abnahme von über 96 % für die Summe der PFC erreicht.

Anschließend wurden acht Sorptionsmaterialien zur Bestimmung der Adsorptionskinetik im Batch-Versuch mit dotiertem Reinstwasser (Konzentrationen von PFOS, PFHxS, PFBS und PFHxA entsprechend den Konzentrationen im Original-Grundwasser) ausgewählt. Mit den Materialien synth. AK I und IA I trat die maximale Beladung bereits nach zwei Stunden und damit am schnellsten ein. Für die Aktivkohlen wurde diese erst nach vier bis sechs Stunden erreicht. Dies entspricht den aus der Literatur bekannten Werten für Kornaktivkohlen (Senevirathna et al. 2010).

Auf Grundlage der Ergebnisse der Batch-Versuche wurden die sechs Materialien AK 1, AK 2, AK 3, IA I, IA II und synth. AK I zur Bestimmung der Beladungskapazität in Säulenversuchen ausgewählt. Die Versuche wurden mit dotiertem Reinstwasser (Konzentrationen von PFOS, PFHxS, PFBS und PFHxA entsprechend den Konzentrationen im Original-Grundwasser) durchgeführt. Bei den Materialien AK 2 und AK 3 brachen die PFC am schnellsten durch (siehe Abb. 36). Der längste PFC-Rückhalt wurde mit dem Material IA I erreicht.

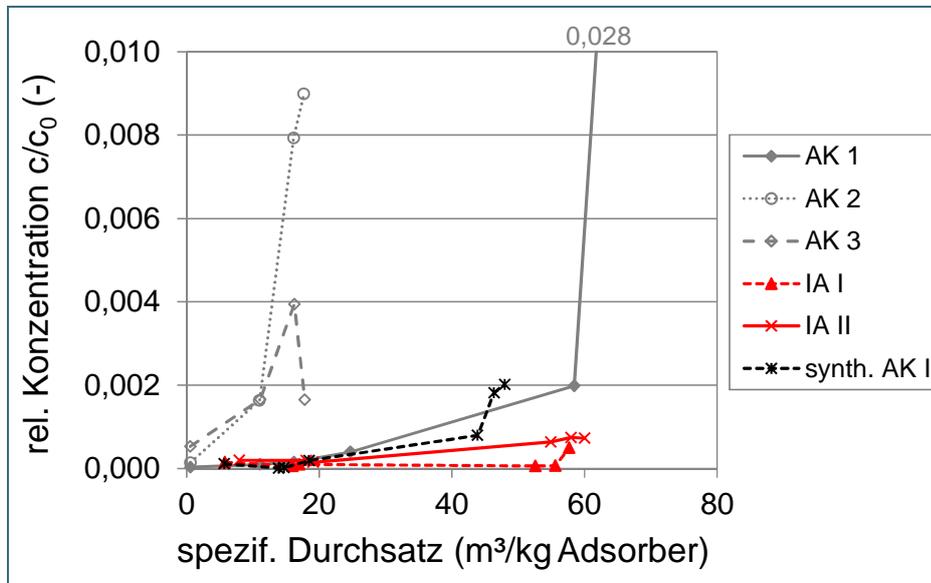


Abb. 36: Durchbruchskurven der verschiedenen Materialien für die PFC-Summe der vier dotierten PFC-Verbindungen. Säulenversuche mit dotiertem Reinstwasser.

Adsorption – Pilotanlage

Für weitere Versuche im halbertechnischen Maßstab wurde eine Pilotanlage am Standort des PFC-Falls errichtet. Auf Basis der bisher erzielten Versuchsergebnisse wurden die Aktivkohle AK 1, der Ionenaustauscher IA I und die synthetische Aktivkohle synth. AK I mit der besten Leistung ausgewählt. Zum Vergleich wurde zusätzlich eine Aktivkohle (AK 4) getestet, die bereits bei anderen PFC-Sanierungen in Deutschland eingesetzt wird.

Die Pilotanlage bestand aus einem Belüftungsbecken mit anschließendem Sandfilter, einem Vorfilter, den Testsäulen und einem Nachfilter. Im Belüftungsbecken findet eine Oxidation der gelösten Fe(II)-Ionen statt, die als rötlichbraune Eisenoxide und -hydroxide ausfallen. Die Belüftung bewirkt zusätzlich eine Strippung der VOC, die als Begleitkontaminanten im Grundwasser vorliegen. Die mit den flüchtigen Schadstoffen belastete Abluft wird über Luftaktivkohle gereinigt. Im rückspülbaren Sandfilter werden die Eisenoxide, -hydroxide und andere Feststoffe abfiltriert. Der anschließende Vorfilter enthält Aktivkohle und dient neben der Verringerung der TOC-Konzentration dazu, die in der Wasserphase verbliebenen VOC zurück zu halten. Nach dem Vorfilter wird das Grundwasser über die Testsäulen A und B geleitet. Die Säulen haben einen Durchmesser von 15 cm und können bis zu einer Schütthöhe von 1 m mit Sorptionsmaterial befüllt werden. Der Nachfilter enthält die Aktivkohle AK 4, die bereits bei PFC-Sanierungen eingesetzt wird, und stellt sicher, dass bei einem Schadstoffdurchbruch an den Testsäulen die PFC weiter zurückgehalten werden. Da nur zwei Materialien zeitgleich eingesetzt werden konnten, wurden in einem ersten Versuchslauf IA I und synth. AK I und in einem zweiten Lauf AK 1 und AK 4 getestet. Die Filtergeschwindigkeit wurde auf 10 m/h festgelegt.

In Abb. 37 ist der zeitliche Konzentrationsverlauf der PFC an den verschiedenen Probenahmestellen der Pilotanlage dargestellt. Im Zulauf betrug die PFC-Konzentration während des ersten Versuchslaufs im Mittel 750 µg/L, während des zweiten Versuchslaufs lag sie im Mittel bei 610 µg/L.

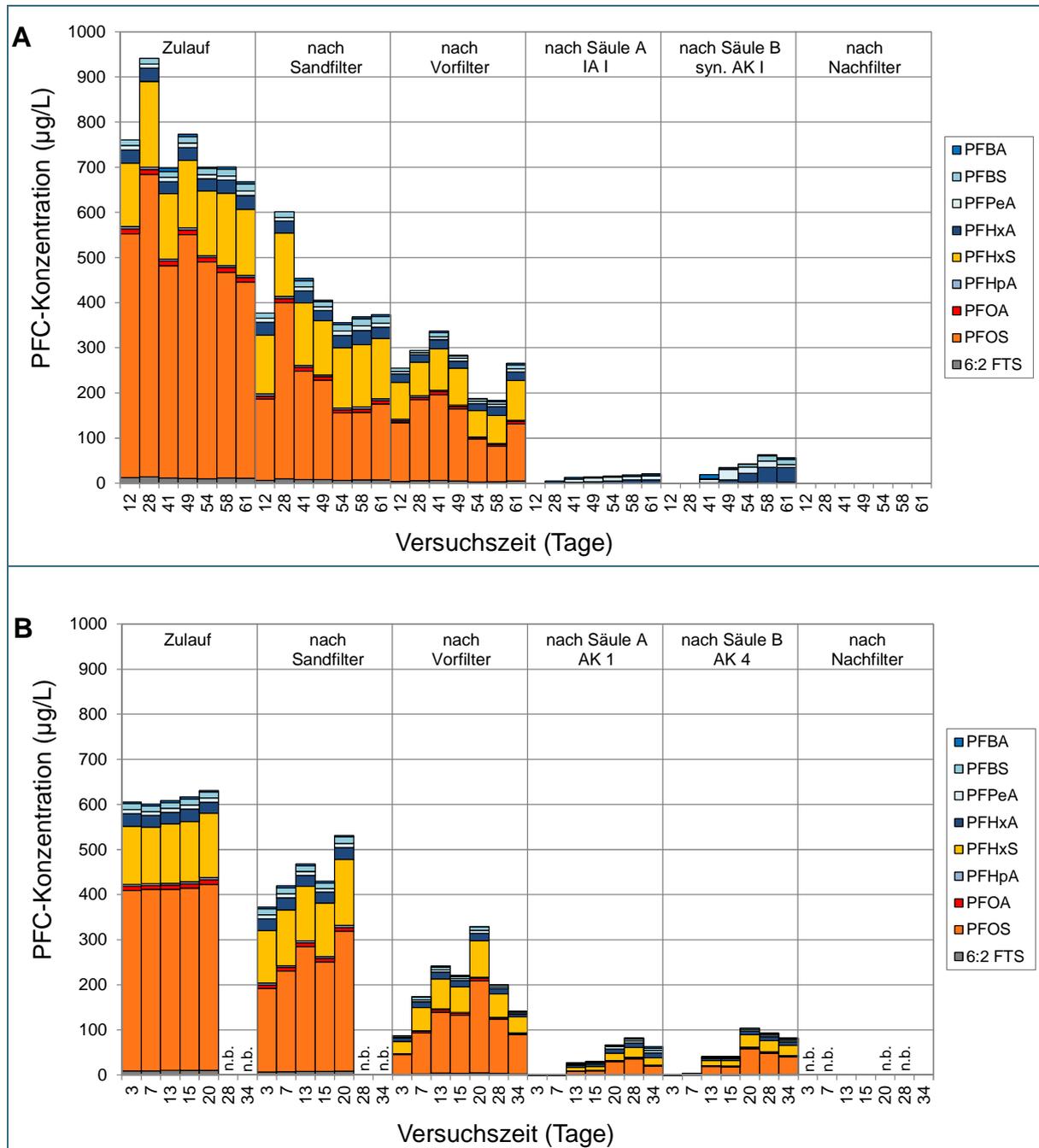


Abb. 37: Zeitlicher Verlauf der PFC-Summenkonzentration an den Probenahmestellen der Pilotanlage während des ersten (A) und zweiten (B) Versuchslaufs (n.b.= nicht bestimmt).

Bei beiden Versuchsläufen ist bereits nach dem Sandfilter eine deutliche Abnahme der PFOS-Konzentration zu erkennen. PFOS kann an die Eisenoxide und -hydroxide gebunden werden (Johnson et al. 2007), die bei der Belüftung ausfallen und im Sandfilter zurückgehalten werden. Im getrockneten Schlamm konnten PFC-Konzentrationen im mg/kg-Bereich nachgewiesen werden. Diese hochbelasteten Schlämme müssen entsprechend den länderspezifischen Grenzwerten entsorgt werden. Auch im Vorfilter wurden PFC zurückgehalten. In den Testsäulen fand ein weiterer starker Rückhalt der PFC statt, wobei die Ablauf-Konzentrationen erwartungsgemäß mit zunehmender Versuchslaufzeit deutlich anstiegen. Nach dem Nachfilter konnten keine PFC-Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze von 4 ng/L für die jeweilige Einzelsubstanz nachgewiesen werden.

In Abb. 38 sind die Durchbruchkurven der vier in der Pilotanlage getesteten Sorptionsmaterialien dargestellt. Die kurzkettigen PFC-Verbindungen können am besten mit AK 1 zurückgehalten werden. An der synth. AK I findet nach einem spezifischen Durchsatz von ca. 9 m³/kg eine Desorption der kurzkettigen PFC statt. Dadurch nimmt deren Konzentration im Säulenablauf gegenüber dem Säulenzulauf zu. Hier werden die bereits adsorbierten kurzkettigen PFC aufgrund ihrer geringen Sorptionsneigung von der Adsorberoberfläche verdrängt und in das Wasser abgegeben, dagegen werden die langkettigen PFC weiter zurückgehalten. Innerhalb der Versuchslaufzeit wurde kein bzw. nur ein geringer Durchbruch der langkettigen PFC bei IA I und synth. AK I verzeichnet.

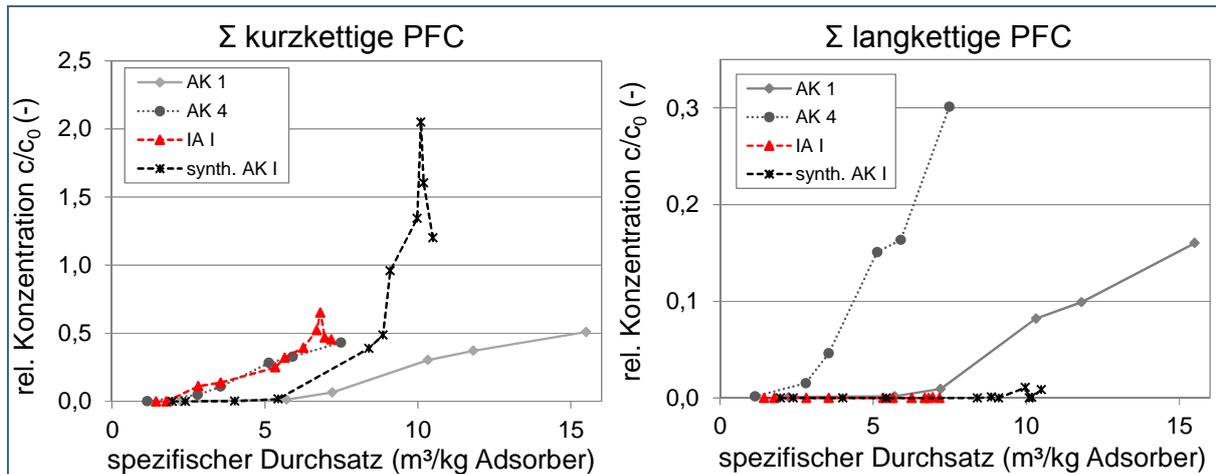


Abb. 38: Durchbruchkurven der verschiedenen Sorptionsmaterialien für die Summe der kurz- (links) und langkettigen (rechts) PFC-Verbindungen in der Pilotanlage.

Tab. 16 gibt einen Überblick über die PFC-Beladung (in Gewichtsprozent) für die kurz- und langkettigen PFC-Verbindungen und die Summe aller untersuchter PFC. Für die Berechnung der Beladung wurde die jeweilige Durchflusssumme herangezogen bei der das vorläufige Aufbereitungsziel von 0,3 µg/L für die langkettigen bzw. 1,0 µg/L für die kurzkettigen PFC überschritten wurde. Bei der Berechnung der Beladung für die Summe aller PFC gilt der Ablauf-Grenzwert, der zuerst überschritten wird. Die höchste Beladung von 0,02 Gew.- % für die kurzkettigen PFC wurde mit der synth. AK I und AK 1 erreicht. Die höchste Beladung für die langkettigen PFC wurde mit der synth. AK I erzielt (0,21 Gew.- %). Da für den IA I bei Versuchsende die Summenkonzentration der langkettigen PFC mit 0,1 µg/L noch unterhalb des Grenzwerts von 0,3 µg/L lag, muss die tatsächliche Beladung größer 0,17 Gew.- % sein. Mit der AK 1 konnte sowohl für die langkettigen als auch für die kurzkettigen PFC eine deutlich höhere Beladung erreicht werden als mit AK 4. Die Beladungen zeigen, dass sich die Adsorptionsleistung der untersuchten Materialien deutlich voneinander unterscheidet.

Tab. 16: PFC-Beladung (in Gew.- %) der verschiedenen Adsorbentmaterialien berechnet für die Summe der kurz- (Grenzwert von 1,0 µg/L) und langkettigen PFC (Grenzwert von 0,3 µg/L) und für die Summe aller untersuchten PFC.

Sorptionsmaterial	Beladung (Gew.- %) Σ kurzkettige PFC Grenzwert 1,0 µg/L	Beladung (Gew.- %) Σ langkettige PFC Grenzwert 0,3 µg/L	Beladung (Gew.- %) Σ PFC Grenzwert 0,3 bzw. 1,0 µg/L
AK 1	0,02	0,11	0,12
AK 4	0,01	0,02	0,03
IA I	0,01	> 0,17	0,05
synth. AK I	0,02	0,21	0,15

Die insgesamt geringen PFC-Beladungen deuten an, dass die Hintergrundbelastung mit TOC und anderen Wasserinhaltsstoffen aufgrund der Konkurrenz um Sorptionsplätze und der Verblockung der

Adsorberoberflächen zu einem stark verringerten PFC-Rückhalt führt. Während der Versuchsläufe betrug die TOC-Konzentration nach dem Vorfilter zwischen 7 und 11 mg/L. Damit lag die TOC-Konzentration vor den Testsäulen noch im mg/L-Bereich und damit eine Größenordnung höher als die PFC-Konzentration. Für alle vier getesteten Materialien konnte ein deutlicher TOC-Rückhalt festgestellt werden. Die Beladungen der einzelnen Materialien mit TOC reichen von 1,1 bis 8,0 Gew.-% und betragen damit ein Vielfaches der erreichten PFC-Beladungen.

Die mittlere Eisenkonzentration von 27 mg/L im Zulauf ist für Grundwässer sehr hoch. Nach der Belüftungsstufe und dem Sandfilter ging die Eisenkonzentration deutlich zurück auf im Mittel 0,4 mg/L. Auch die Testsäulen trugen zur Eisen-Entfernung bei. Damit besteht die Gefahr, dass bei längeren Filterstandzeiten eine Verblockung der Sorptionsmaterialien eintritt. Durch eine erhöhte Belüftung konnte die Eisenkonzentration nach dem Sandfilter auf im Mittel 0,1 mg/L verringert werden.

Die Mangan-Messdaten zeigen, dass in den Festbettfiltern der Pilotanlage kein Mangan zurückgehalten wurde. Damit wird die Gefahr eine Verblockung durch Mangandioxid für den Standort als gering eingestuft.

Bereits nach dem Sandfilter fand eine deutliche VOC-Konzentrationsabnahme um im Mittel 80 % statt (siehe Abb. 39).

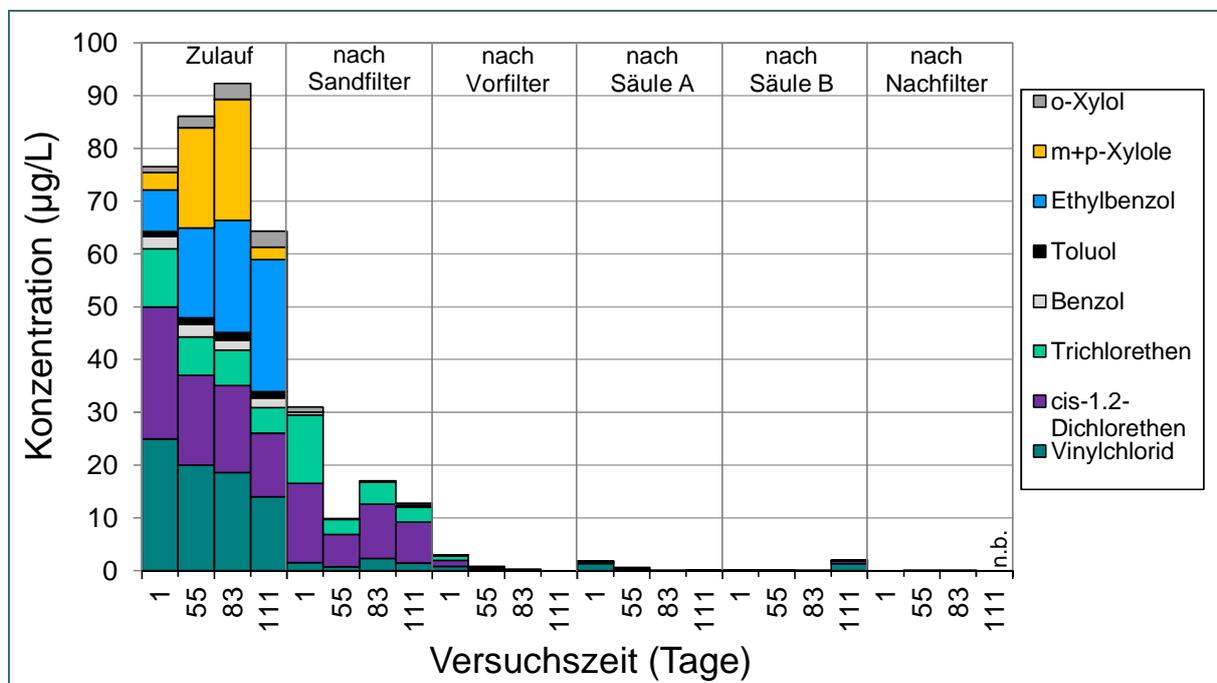


Abb. 39: VOC-Konzentration an den jeweiligen Probenahmestellen der Pilotanlage über den gesamten Versuchszeitraum.

Dies lässt sich damit erklären, dass die VOC durch die Aerobisierung des Grundwassers im ersten Belüftungsbecken in die Gasphase übergehen bzw. an den Eisenoxid-/hydroxidschlamm adsorbieren. Die im Grundwasser verbleibenden VOC wurden im Vorfilter und zu einem geringen Teil durch das Sorptionsmaterial in den Testsäulen aus dem Wasser entfernt. Aufgrund der niedrigen Konzentrationen (wenige µg/L) vor den Testsäulen spielten die VOC beim Konkurrenzeffekt um Sorptionsplätze auf den Adsorberoberflächen der Testsäulen wahrscheinlich nur eine untergeordnete Rolle.

Aus den berechneten Beladungen und den Materialkosten ergeben sich die in Tab. 17 angegebenen spezifischen Kosten (in € pro m³ aufbereiteten Grundwasser) bezogen auf den Verbrauch an Sorpti-

onsmitteln. Die Materialkosten wurden für eine Abnahmemenge von 1 t angegeben, die tatsächlichen Kosten hängen von der jeweiligen Abnahmemenge ab.

Sorptionsmaterial	Materialkosten (€/kg)	spezifische Kosten (€/m ³)
AK 1	2,0	0,4
AK 4	2,6	2,3
IA I	8,8	3,9
synth. AK I	80,0	12,9

Tab. 17: Materialkosten (bei einer Abnahmemenge von 1 t) und kalkulierte spezifische Kosten für die an der Pilotanlage getesteten Sorptionsmaterialien.

Obwohl mit der synth. AK I die höchsten Beladungen (sowohl für die kurzkettingen als auch für die langkettingen PFC) erreicht wurden, liegen die spezifischen Kosten aufgrund der hohen Materialkosten deutlich über denen der anderen Materialien. Für den untersuchten Standort stellt damit AK 1 aufgrund der vergleichsweise niedrigen Materialkosten ein gut geeignetes und wirtschaftliches Sorptionsmittel für die PFC-Entfernung dar.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass mit den drei untersuchten Verfahren Membranfiltration, elektrochemischer Abbau und Adsorption PFC aus belasteten Grundwässern entfernt werden können. Der Einsatz einer Membranfiltrationsstufe wird jedoch bei den vorliegenden Randbedingungen als unwirtschaftlich eingestuft, da die Ergebnisse der Pilotanlage zeigen, dass mit der Aktivkohlefiltration allein eine ausreichende Entfernung der PFC gelingt. Für einen praktischen Einsatz der elektrochemischen Oxidation sind noch Verfahrensanpassungen notwendig, um die Bildung unerwünschter Transformationsprodukte zu vermeiden.

Die Adsorption an Aktivkohle zeigte die aus der Literatur bekannten vergleichsweise niedrigen Beladungen und den damit erforderlichen regelmäßigen Wechsel der Aktivkohle, um die geforderten länderspezifischen Grenzwerte einzuhalten. Die AK 1 zeigte sich als ein im Verhältnis zu anderen Sorptionsmaterialien gut geeignetes und kostengünstiges Produkt für die PFC-Entfernung.

Damit stellt zum jetzigen Zeitpunkt die Sorptionstechnik die wirtschaftlichste und effizienteste Methode zur Sanierung von PFC-Kontaminationen im Grundwasser dar. Die erzielten PFC-Beladungen sind jedoch vergleichsweise gering und hängen stark von der Grundwasserzusammensetzung ab. Die endgültige Anlagenkonzeption ist abhängig von dem je nach Schadensfallsituation erforderlichen Anlagendurchsatz und den Möglichkeiten zur Ableitung des gereinigten Wassers sowie den dazu einzuhaltenden länderspezifischen Grenzwerten.

5 Verhalten in der Umwelt

Seit 2008 werden neben den Monitoring-Programmen am LfU auch Labor- und Freilandversuche mit PFC durchgeführt, um vertiefte Erkenntnisse zum Verhalten dieser Substanzen in der Umwelt zu erhalten. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

5.1 Ökotoxikologische Bewertung ausgewählter PFC

Bislang liegen kaum oder nur unvollständige Untersuchungen zur ökotoxikologischen Wirkung der Verbindungen PFHxS und 6:2 FTS vor. Diese beiden Substanzen werden beispielsweise als Ersatzstoffe für PFOS in fluorhaltigen Löschmitteln eingesetzt. Auch zu den kürzerkettigen perfluorierten Carbonsäuren PFBA und PFPeA liegt keine ausreichende Datengrundlage vor, um eine ökotoxikologische Risikoabschätzung vornehmen zu können. Deshalb wurde die ökotoxikologische Wirkung dieser vier Substanzen auf aquatische Organismen mit Hilfe von standardisierten Testverfahren untersucht. Die Daten dieser ökotoxikologischen Untersuchungen wurden im Rahmen des vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz geförderten Projektes: "Aufkonzentrierung von Umweltproben – UQN" zur Verfügung gestellt.

Gemäß „Technical guidance document for environmental quality standards“ (TGD-EQS, EU 2011b) wurden genormte Testverfahren mit Organismen aus verschiedenen trophischen Ebenen ausgewählt. Die Testorganismen stammten aus laborinterner Zucht mit bekannter Herkunft. Die statistischen Auswertungen und Berechnungen der toxikologischen Kenngrößen NOEC (no observed effect concentration) und EC_x (Konzentration bei der x % Effekt beobachtet werden) erfolgten mit Hilfe der Statistiksoftware ToxRatMon 2.10 bzw. ToxRatProXT 2.10 (chronischer Daphnientest). Nach Vortests auf Varianzhomogenität und Normalverteilung wurde die NOEC mit einem multiplen t-Test (Dunnnett, Williams) auf einem Signifikanzniveau von 0,05 ermittelt. Die EC_x-Werte wurden anhand der Konzentration-Wirkungskurven mittels Probitanalyse berechnet. Die eingesetzten Wirkkonzentrationen wurden analytisch überprüft.

Algentest: Akute (EC₅₀) und chronische (NOEC, EC₁₀) Schädwirkungen der Testsubstanzen gegenüber der Grünalge *Desmodesmus subspicatus* wurden mit dem 72 h Wachstumshemmtest nach DIN EN ISO 8692:2012 in 24-well-Mikrotiterplatten ermittelt. Zur Erfassung der Zelldichte wurde der korrelierende Parameter Chlorophyllfluoreszenz mit einem Mikrotiterplattenreader (TECAN Infinite M200) gemessen.

Daphnientest: Mit dem 48 h Immobilisationstest nach DIN EN ISO 6341:2013 wurden die akuttoxischen Wirkungen der Testsubstanzen auf *Daphnia magna* Straus bestimmt (EC₅₀). Die chronische Wirkung wurde im 21 d Daphnia-Reproduktionstest nach OECD 211 (2012) ermittelt (NOEC, EC₁₀).

Fischartest: Zur Bestimmung der akuten Fischtoxizität wurden letale Effekte der Testsubstanzen gegenüber Embryonen des Zebraärlblings *Danio rerio* im 48 h Fischartest untersucht (nach DIN EN ISO 15088:2009, EC₅₀).

Die Prüfsubstanzen PFHxS und PFPeA wurden von der Firma Sigma-Aldrich mit einem Reinheitsgrad von 98 % bzw. von 97 % bezogen, die Substanzen 6:2 FTS und PFBA von der Firma abcr mit einer Reinheit von 98 % bzw. 99 %. Von jeder Substanz wurde eine Stammlösung hergestellt und diese entsprechend der gewünschten Wirkkonzentrationen verdünnt. Zur Herstellung der Stammlösungen und zur Verdünnung der Wirkkonzentrationen wurden die Testmedien verwendet (Algennährlösung für den Algentest, ISO-Wasser für den akuten Daphnien- und Fischartest, M4-Medium für den chronischen Daphnientest). Die tatsächlich eingesetzte Testkonzentration wurde nach Versuchsende analytisch überprüft.

Tab. 18 fasst die Ergebnisse der für PFHxS, 6:2 FTS, PFBA und PFPeA durchgeführten Wirktests zusammen. Die EC_{50} -, EC_{10} - und NOEC-Werte liegen für alle getesteten Substanzen im mg/L-Bereich und damit im Konzentrationsbereich der Literaturwerte für PFOS (EC_{50} (Alge) = 48,2 - 120 mg/L; NOEC (Alge) = 5,3 - 53 mg/L; EC_{50} (Daphnia magna) = 4 - 48 mg/L; NOEC (Daphnia magna) = 7-12 mg/L (EU 2011a).

Tab. 18: Ergebnisse der ökotoxikologischen Wirktests zu PFHxS, 6:2 FTS, PFBA und PFPeA. Bei einer Abweichung der analytischen Ergebnisse von > 20 % der Nominalwerte werden die Effektivkonzentrationen verwendet. Grau hinterlegt sind die Werte, die für die PNEC-Ableitung verwendet wurden.

Testorganismus	Norm	Endpunkt-Testdauer	PFHxS (mg/L)	6:2 FTS (mg/L)	PFBA (mg/L)	PFPeA (mg/L)
Alge <i>Desmodesmus subspicatus</i>	OECD 211	Wachstum 72h akut	E_rC_{50} : > 80 (Nominalwert als Säure)	E_rC_{50} : > 56 (Effektivwert)	E_yC_{50} : 139 E_rC_{50} : 1234 (Nominalwerte)	E_yC_{50} : 704 E_rC_{50} : > 4000 (Effektivwerte)
		Wachstum 72h Chronisch	E_rC_{10} : > 80 NOEC: \geq 80 mg/L (Nominalwerte als Säure)	E_rC_{10} : > 56 NOEC: \geq 56 mg/L (Effektivwerte)	E_yC_{10} : 17 E_rC_{10} : 125 NOEC _r : 10 (Nominalwerte)	E_yC_{10} : 57 E_rC_{10} : 266 NOEC _r : 88 (Effektivwerte)
Daphnia <i>Daphnia magna</i>	DIN EN ISO 6341	Immobilisierung 48h	EC_{50} : > 65 (Effektivwert als Säure)	EC_{50} : > 83 (Effektivwert)	EC_{50} : > 11865 (Effektivwert)	EC_{50} : > 5280 (Effektivwerte)
	OECD 211	Reproduktion 21d	EC_{10} : 29 NOEC: 12 (Effektivwerte als Säure)	EC_{10} : > 95 NOEC: \geq 95 (Effektivwerte)	EC_{10} : > 1000 NOEC: \geq 1000 (Nominalwerte)	EC_{10} : > 1000 NOEC: \geq 1000 (Nominalwerte)
Fischei <i>Danio rerio</i>	DIN EN ISO 15088	Fischembryo- letalität 48h	EC_{50} : > 100 NOEC: \geq 100 (Nominalwerte als Säure)	EC_{50} : > 100 NOEC: \geq 100 (Nominalwerte)	LC_{50} > 4000	LC_{50} > 4000 mg/L
Fisch <i>Ornithochus mykiss</i>	OECD 210	Zeitpunkt Ei- ablage		NOEC: 8,7 ^a		
SF			50	10	50	50
PNEC			0,24 mg/L	0,87 mg/L	0,2 mg/L	1,76 mg/L

^a Hoke et al. 2015

Für den jeweils empfindlichsten Testorganismus wurden entsprechend der Vorgaben der TGD-EQS PNEC-Werte (predicted no effect concentration) mit einem Sicherheitsfaktor (SF) von 50 abgeleitet. Für 6:2 FTS konnte der SF auf 10 herabgesetzt werden, da für die Ableitung die Ergebnisse des chronischen Fischtests nach OECD 210 (1992) aus der Studie von Hoke et al. 2015 berücksichtigt wurden.

Die PNEC-Werte liegen für alle vier Substanzen mit größer gleich 0,2 mg/L deutlich über den in Oberflächengewässern nachgewiesenen Umweltkonzentrationen (siehe Kapitel 3.1). Damit wird die Gefahr einer akuten und chronischen Toxizität der getesteten Stoffe für aquatische Organismen als gering eingestuft.

5.2 PFC im Boden

Im Boden werden PFC mit dem Sickerwasser ausgetragen (Moody et al. 2003; Zareitalabad et al. 2013). Dabei gelangen die kurzkettingen Verbindungen schneller in das Grundwasser als die langkettigen, da sie eine geringere Sorptionsneigung aufweisen (Gellrich et al. 2012; Sepulvado et al. 2011). Neben der Kettenlänge beeinflussen auch die funktionelle Kopfgruppe der PFC und der TOC-Gehalt des Bodens das Austragsverhalten dieser Substanzen in Boden und Sediment (Higgins u. Luthy 2006; Gellrich et al. 2012). Zur genaueren Charakterisierung des Elutionsverhaltens von PFC-belasteten Böden und daraus möglicherweise resultierenden Boden- und/ oder Grundwasserbelastungen wurden am LfU verschiedene Versuche im Labor-, Halbtechnikums- und Technikumsmaßstab durchgeführt. Für die Versuche wurden verschiedene hochbelastete PFC-Standorte in Bayern ausgewählt und beprobt.

5.2.1 Lysimeterversuche

Um das Transportverhalten von PFC im Boden unter weitgehend realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen wurden Lysimeterversuche durchgeführt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen dabei insbesondere der Pfad Boden-Grundwasser sowie ein möglicher Transfer in die Pflanze. Dazu wurden zwei Lysimeter von Ackerflächen entnommen, die über mehrere Jahre mit der zulässigen Höchstmenge an Klärschlamm beaufschlagt worden waren. Drei weitere Lysimeter stammen von Wald- und Grünlandflächen mit Belastungen aus industriellen PFC-Emissionen des Chemieparks Gendorf. Dort wurde seit den 60er Jahren PFOA hergestellt, verarbeitet und über den Luft- und Abwasserpfad emittiert. Dadurch liegen im Umfeld des Industrieparks Belastungen der Umwelt, insbesondere des Bodens, mit PFOA vor. Auch im Grundwasser in der Umgebung finden sich erhöhte PFOA-Werte über dem gesundheitlichen Orientierungswert (GOW) für Trinkwasser von 0,1 µg/L. Seit der Einführung des Ersatzstoffes ADONA im Jahr 2008 wird PFOA im Chemiepark Gendorf nicht mehr verwendet.

Die monolithischen Bodenkörper der Lysimeter haben eine Fläche von 1 m² und eine Höhe von 2 m. Durch die Beprobung des Sickerwassers nach der Bodenpassage von 2 m kann eine mögliche Verlagerung von Stoffen mit dem versickernden Niederschlagswasser erfasst werden. Im Vergleich mit den Gehalten dieser Stoffe im Boden können so Vorhersagen über mögliche Grundwasserkontaminationen gemacht werden. Ziel der Untersuchungen war es, Kenntnisse über das Mobilitätsverhalten der PFC und daraus möglicherweise resultierende Kontaminationspfade (Grundwasser, Pflanze) zu gewinnen.

Material und Methoden

Für die Lysimeterentnahme wurde ein Stahlzylinder mit einer speziellen Bodenfräse an den ausgewählten Standorten in den Boden getrieben. Durch die spezielle Technik werden die Bodenmonolithe dabei nicht deformiert. Nach der Entnahme wurden die Lysimeter gedreht, um die Unterseite mit einem dreischichtigen Filter aus gestuften Quarzsandkörnungen zu befüllen. Dadurch wird die hydraulische Anbindung des Bodens an den Sickerwasserauslauf gewährleistet. An den Probenahmestandorten erfolgten anschließend die Bodenansprache und eine horizontbezogene Bodenprobenahme für die Gesamtstoff- und Korngrößenanalyse. Anschließend wurden die Bodenmonolithe in der Lysimeteranlage Wielenbach aufgestellt und unter natürlichen Niederschlagsverhältnissen betrieben. Die Lysimeter stehen auf je drei Wägezellen und eine berührungslose Ablaufvorrichtung führt das anfallende Sickerwasser zur Quantifizierung über Kippwaagen in die Probebehälter. Die Bodenproben wurden einmalig und das Sickerwasser in regelmäßigen Abständen auf folgende 13 PFC-Einzelverbindungen untersucht: PFBA, PFPeA, PFBS, PFHxA, PFHpA, PFHxS, PFOA, PFNA, PFOS, PFOSA, PFDA, PFUnA, PFDoA.

Die Bewirtschaftung der Acker- und Grünlandstandorte (Fruchtart/Schnitthäufigkeit, Klärschlamm- bzw. Gülledüngung, Aussaat-, Erntetermine etc.) in der Lysimeteranlage erfolgte soweit wie möglich parallel zum Herkunftsort.

Standortcharakterisierung und PFC-Gesamtstoffgehalte im Boden

Detaillierte Informationen zur Bodencharakterisierung und –eigenschaften der einzelnen Böden finden sich bei Hübner et al. 2011. Tab. 19 fasst die PFC-Feststoffgehalte der fünf untersuchten Böden zusammen. PFOSA, PFBS, PFHxS und PFDS konnte in keinen der Böden in Konzentrationen größer der Bestimmungsgrenze (BG) nachgewiesen werden.

Die erste für die Lysimeterentnahme ausgewählte Ackerfläche (Lysimeter Klärschlamm 1) wurde 2007 (März 1,6 t TM/ha, August 4,1 t TM/ha) mit einem hoch mit PFC belasteten Klärschlamm beaufschlagt (7.000 µg PFOS /kg TS). Eine landwirtschaftliche Verwertung mit diesen PFC-Gehalten ist seit 2008 in Bayern nicht mehr erlaubt. Bei dem zum Zeitpunkt der Entnahme mit Mais bepflanzten Ackerboden handelt es sich um eine Braunerde – Pseudogley aus Gneiszersatz.

PFOS kann im Boden nur in der obersten Horizontschicht in relativ geringer Konzentration nachgewiesen werden (siehe Tab. 19). Für die übrigen PFC-Verbindungen lagen die Nachweise unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze. Um weitere Aussagen zum Austragsverhalten von PFC treffen zu können, wurde 2010 nach den Vorgaben der Abfallklärschlammverordnung (AbfKlärV, 1992) eine weitere Aufbringung von Klärschlamm (0,5 kg TM/m²) aus derselben Kläranlage ausschließlich auf die Lysimeterfläche vorgenommen. Die PFOS-Gehalte in diesem Klärschlamm waren mit 2.900 µg/kg TM nunmehr deutlich geringer.

Der zweite Ackerboden (Lysimeter Klärschlamm 2) wurde seit 1996 nach den Vorgaben der AbfKlärV mit den maximal möglichen Mengen an Klärschlamm (5 t je ha in drei Jahren) einer ortsnahen Kläranlage (max. 200 µg PFC/kg TS) gedüngt. Zur Zeit der Entnahme war die Fläche mit Gerste bepflanzt. Der Ackerstandort ist eine Braunerde aus Lößlehm auf risszeitlicher Grundmoräne. Auch hier konnte PFOS im Boden nur in der obersten Horizontschicht in sehr geringer Konzentration nachgewiesen werden. Im Unterboden liegen die PFOS-Gehalte unter der Bestimmungsgrenze von 0,5 µg/kg TM.

Tab. 19: Horizontabhängige PFC-Gesamtstoffgehalte (in µg/kg TM) der für die Lysimeterversuche ausgewählten Böden.

Lysimeter	Horizonttiefe	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFOS	PFNA	PFDA	PFDoA	Σ PFC
Klärschlamm 1	0-45 cm	< 2,0	< 2,0	< 2,0	16	< 2,0	< 2,0	< 2,0	16
	45-90 cm	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< BG
	90-130 cm	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< BG
	130-180 cm	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< BG
	> 180 cm	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< BG
Klärschlamm 2	0-30 cm	< 0,5	< 0,5	< 0,5	3,8	< 0,5	< 0,5	< 0,5	3,8
	30-85 cm	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< BG
	85-120 cm	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< BG
	> 120 cm	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< BG
Nadelwald	0-10 cm	5	4,4	164	2,5	3,3	7,9	3,7	191
	10-40 cm	< 1,5	2,1	54	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	57
	40-70 cm	< 1,5	3	23	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	26
	70-90 cm	< 0,5	< 0,5	2,6	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	2,6
	> 90 cm	< 0,5	< 0,5	5,1	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	5,1
Mischwald	0-10 cm	4,5	< 2,0	51	< 1,0	< 2,0	6,2	< 2,0	62
	10-25 cm	6,3	2,1	55	< 0,5	< 1,0	< 1,0	< 0,5	63
	25-65 cm	< 2,0	< 1,0	31	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	31
	65-110 cm	< 1,0	< 0,5	17	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	17
	> 110 cm	< 0,5	< 0,5	7	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	7
Grünland	0-10 cm	< 1,5	< 0,5	57	2,1	< 0,5	< 2,0	< 0,5	59
	10-40 cm	3	2	61	2,1	< 1,0	< 1,0	< 0,5	68
	40-70 cm	< 0,5	< 0,5	7,2	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	7,2
	C	< 0,5	< 0,5	3,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	3,5

Die Lysimeter mit Böden aus dem Bereich industrieller Emissionen zeigen deutlich erhöhte PFOA-Gehalte, die mit zunehmender Bodentiefe rasch abnehmen (siehe Tab. 19). Darüber hinaus sind in den oberen Horizonten geringfügige Spuren weiterer PFC zu finden.

Beim Boden des im Nadelwaldstandort entnommen Lysimeters handelt es sich um eine Parabraunerde aus älteren Terrassenschottern der Alz mit in der Mächtigkeit stark schwankender, aber gut erkennbarer Verlehmung (40–70 cm). Das Ausgangssubstrat sind sandige Kiese und kiesige Sande, überwiegend aus kalkalpinem Material mit untergeordnetem Kristallinanteil. Aufgrund des zunehmenden Kiesanteils im Unterboden, konnte der Lysimeter nicht bis in die vorgesehene Tiefe von 2 m vorgetrieben werden. Bei ca. 1,70 m wurde der Monolith vom Untergrund abgeschnitten und auf der Unterseite nach Drehung des Zylinders mit Material vom Unterboden händisch aufgefüllt. Der PFOA-Gesamtstoffgehalt im Oberboden mit ca. 160 µg/kg TM ist sehr hoch und kann durch den Auskämmeffekt des Nadelwaldes erklärt werden. In der zweiten Horizontschicht ist der Gehalt mit etwa 50 µg/kg TM bereits deutlich geringer und mit zunehmender Tiefe nehmen die PFOA-Gehalte weiterhin ab.

Der im Mischwald entnommene Lysimeter liegt im Abluftbereich östlich des Industriestandortes. Der Boden ist eine Parabraunerde aus jüngeren Terrassenschottern der Alz, allerdings ohne Verlehmung mit zur Tiefe hin abnehmendem Schluffanteil. Auch an diesem Standort ist es nicht gelungen den

Stahlzylinder bis in die vorgesehene Tiefe vorzutreiben. Hier wurde ebenfalls nach Drehung des Zylinders Material aus dem Unterboden eingefüllt. Beim Drehen des Zylinders wurde die Gefügestruktur stark gestört. Die PFOA-Gesamtstoffgehalte liegen im Oberboden bei ca. 50 µg/kg TM und nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Es ist allerdings eine stärkere Tiefenverlagerung gegenüber Lysimeter Nadelwald zu beobachten.

Der Lysimeter Grünland wurde im Abluftbereich südöstlich des Industriebetriebes entnommen. Der Boden lässt sich als im Übergangsbereich von Pararendzina zur Braunerde auf einer jungen Schotterterrasse der Alz beschreiben. Der kalkalpine Materialanteil ist dominierend, mit deutlich untergeordnetem Kristallinanteil. Im Unterschied zu den Schottersubstraten der Entnahmestandorte im Nadel- und Mischwald treten in diesem Bodenprofil deutliche Wasserstandsmarken auf, die anzeigen, dass hier schwankende Grundwasserstände vorkommen. Bei der Entnahme des Bodenkörpers war aber kein Grundwasserzutritt zu beobachten. Die PFOA-Gesamtstoffgehalte liegen in den oberen beiden Horizontschichten um die 60 µg/kg TM, in den unteren Horizonten sind deutlich geringere Gehalte zu verzeichnen.

Damit weisen alle Lysimeter aus dem Bereich Gendorf erhöhte PFOA-Gehalte auf, die mit zunehmender Bodentiefe abnehmen. Dabei haben die Lysimeter Mischwald und Grünland in den oberen beiden Horizontschichten ähnliche PFOA-Gehalte von 50 bis 60 µg/kg TM. Das Lysimeter Nadelwald weist mit ca. 160 µg PFOA/kg TM den höchsten ermittelten Gehalt auf.

PFC-Konzentration im Sickerwasser der Lysimeter

Die mit Klärschlamm beaufschlagten Lysimeter wurden von Mitte 2008 bis Frühjahr 2012 betrieben, die Lysimeter aus dem Bereich Gendorf über einen Zeitraum von über sieben Jahren von Mitte 2008 bis Ende 2015. Für die Untersuchung des Sickerwassers wurde jeweils eine ausgewählte Wochenmischprobe innerhalb eines Monats analysiert. Um mögliche Konzentrationsänderungen feststellen zu können wurden bei erhöhtem Sickerwasseranfall teils häufiger Analysen durchgeführt. Bei Lysimeter Klärschlamm 2 wurde der Abstand zwischen den Analysen vergrößert, da die Konzentrationen der untersuchten PFC im Sickerwasser meist unter der BG lagen bzw. nicht nachweisbar waren.

Tab. 20 fasst Mittelwert, Minimum und Maximum- Konzentrationen der PFC-Einzelverbindungen zusammen, die im Sickerwasser der jeweiligen Lysimeter in Konzentrationen größer der Bestimmungsgrenze nachgewiesen werden konnten. Für die Berechnung wurden Werte kleiner der Nachweisgrenze mit 0 und Werte kleiner der Bestimmungsgrenze mit dem halben Wert der Bestimmungsgrenze berücksichtigt.

Lysimeter	Substanz	Mittelwert (ng/L)	Minimum (ng/L)	Maximum (ng/L)
Klärschlamm 1	PFBA	5	0	24
	PFBS	1	0	6
	PFPeA	2	0	14
	PFHxA	3	0	11
	PFHpA	3	0	32
	PFOA	11	3	45
	PFOS	130	0	450
	PFNA	1	0	5
Klärschlamm 2	PFBA	1	0	9
	PFPeA	0	0	2
	PFHxA	0	0	2
	PFOA	1	0	10
Nadelwald	PFBA	5	0	26
	PFPeA	1	0	5
	PFHxA	14	0	40
	PFHpA	188	30	470
	PFOA	1.122	150	4.300
Mischwald	PFBA	50	0	200
	PFPeA	28	0	250
	PFHxA	207	0	590
	PFHpA	218	67	400
	PFOA	4.792	1.500	10.000
Grünland	PFBA	16	0	270
	PFPeA	4	0	20
	PFHxA	17	0	50
	PFHpA	89	39	180
	PFOA	2.201	320	4.600

Tab. 20: Mittelwert, Minimum und Maximum der im Sickerwasser der untersuchten Lysimeter gemessenen PFC-Verbindungen.

Im Sickerwasser von Lysimeter Klärschlamm 1 (beaufschlagt mit hoch kontaminiertem Klärschlamm) wurden neben PFOS auch Spuren von PFOA und weiteren PFC nachgewiesen (siehe Tab. 20). Es besteht nur ein geringer Zusammenhang zwischen Sickerwassermenge und Konzentration (Bestimmtheitsmaß = 0,4). Abb. 40 zeigt den zeitlichen Verlauf der PFOS-Konzentration im Sickerwasser und die Niederschlags- und Sickerwassermenge. Auffällig ist der schnelle Anstieg der PFOS-Konzentration nach der erneuten Klärschlammaufgabe im Mai 2010 mit einem hoch belasteten Schlamm. Diese fallen jedoch nach gut zwei Monaten bereits wieder ab. Der kurzfristige, schnelle Anstieg der PFOS-Konzentrationen im Sickerwasser nach erneuter Klärschlammaufbringung zeigt, dass ein Teil der PFOS sehr schnell in die unteren Bodenschichten verfrachtet wird, was für einen zumindest teilweise partikelgebundenen Transport und/ oder Makroporenfluss spricht. Lysimeter Klärschlamm 1 hat von Anfang an eine sehr deutliche Trübung des Sickerwassers gezeigt, die bei erhöhtem Sickerwasserfluss besonders stark ausgeprägt ist.

Mit der Klärschlammaufbringung 2010 sind etwa weitere 1,45 mg PFOS in den Bodenkörper eingetragen worden. Der Gesamtaustrag von Juli 2008 bis März 2012 von PFOS im Sickerwasser liegt bei 0,3 mg und entspricht damit ca. 3 % der im Lysimeter vorhandenen PFOS-Gesamtmenge.

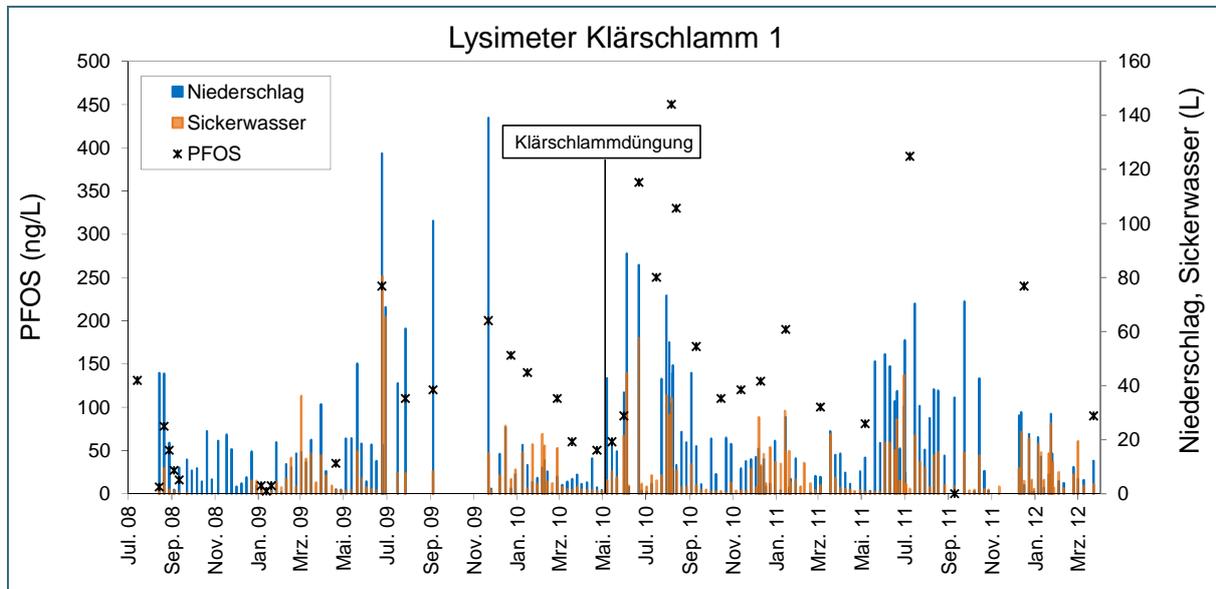


Abb. 40: Zeitlicher Verlauf der PFC-Konzentration im Sickerwasser des Lysimeters Klärschlamm 1 und Niederschlags- und Sickerwassersumme.

Im Sickerwasser des Lysimeters Klärschlamm 2 lag die PFOA-Konzentration überwiegend unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze. Die PFOS-Konzentration im Sickerwasser lag über den gesamten Untersuchungszeitraum unterhalb der Bestimmungsgrenze (siehe Tab. 20). Auch nach der erneuten Aufgabe von Klärschlamm mit 180 µg PFOS/kg TM konnte kein Anstieg der PFC-Konzentrationen im Sickerwasser verzeichnet werden. Im gesamten Untersuchungszeitraum wurden im Sickerwasser kaum PFC-Konzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen.

Die Standorte mit den durch Luftimmissionen verursachten PFC-Belastungen (Lysimeter Nadelwald, Mischwald und Grünland) weisen im Vergleich zu den Ackerstandorten deutlich höhere PFC-Konzentrationen im Sickerwasser auf (siehe Tab. 20). Dabei handelt es sich vorwiegend um die Verbindungen PFHxA, PFHpA und vor allem PFOA. In geringeren Konzentrationen wurden jedoch auch PFBA und PFPeA gemessen. Die Carbonsäuren mit höherer Kettenlänge (PFNA, PFDA, PFUdA und PFDoA) liegen zum Großteil unter der Nachweisgrenze. Im Sickerwasser des Lysimeter Mischwald wurden höhere Konzentrationen nachgewiesen als in den andere beiden Lysimetern. Diese erhöhte Freisetzung kann sehr wahrscheinlich auf die Störung des Bodengefüges während der Lysimeterentnahme zurückgeführt werden. Bei Lysimeter Nadelwald sind die Konzentrationen insgesamt am niedrigsten. Offenbar wird durch die mehrere Dezimeter mächtige Verlehmungslage zwischen Oberboden und dem kiesig-sandigen Substrat bei Lysimeter Nadelwald eine Verlagerung der PFC in den Unterboden verzögert.

Die Abbildungen Abb. 41 bis Abb. 43 zeigen für die einzelnen Lysimeter den Verlauf der PFOA-Konzentration und die Niederschlags- und Sickerwassermenge. Bei Lysimeter Nadelwald schwanken die Konzentrationen der PFOA-Konzentration in den ersten beiden Versuchsjahren in einem Bereich von 350 bis 750 ng/L (siehe Abb. 41). Besonders niedrig ist die Konzentration mit 180 ng/L nach der langen Sickerwasserpause zwischen September 2009 und Januar 2010. Ab September 2010 ist ein kontinuierlicher Anstieg der PFOA-Konzentrationen bis 4.500 ng/L zu verzeichnen.

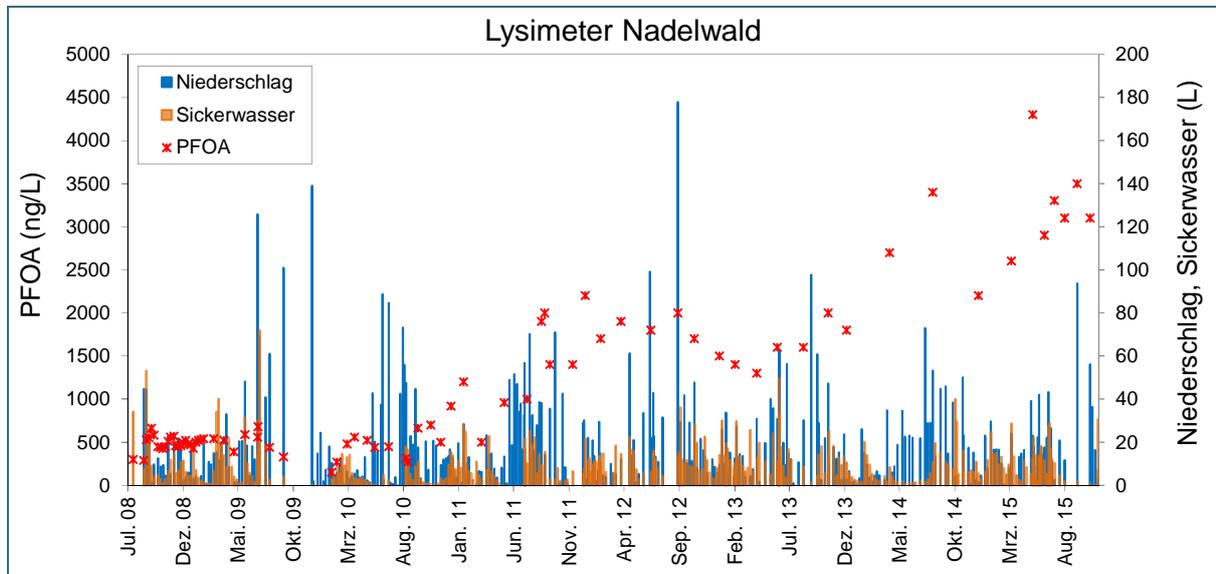


Abb. 41: Zeitlicher Verlauf der PFOA-Konzentration im Sickerwasser des Lysimeters Nadelwald und Niederschlags- und Sickerwassersumme.

Bei Lysimeter Mischwald schwanken die PFC-Konzentrationen während der engen Beprobung bis Januar 2009 um 4.000 ng/L, nachfolgend werden die Schwankungsbreiten deutlich größer und das Konzentrationsniveau insgesamt höher (siehe Abb. 42). Die maximal gemessene PFOA-Konzentration im Sickerwasser liegt bei 10.000 ng/L. Ab Dezember 2011 nimmt die Konzentration bis zum Sommer 2013 kontinuierlich ab und schwankt bis zum Versuchsende wieder um einen Wert von 4.000 ng/L.

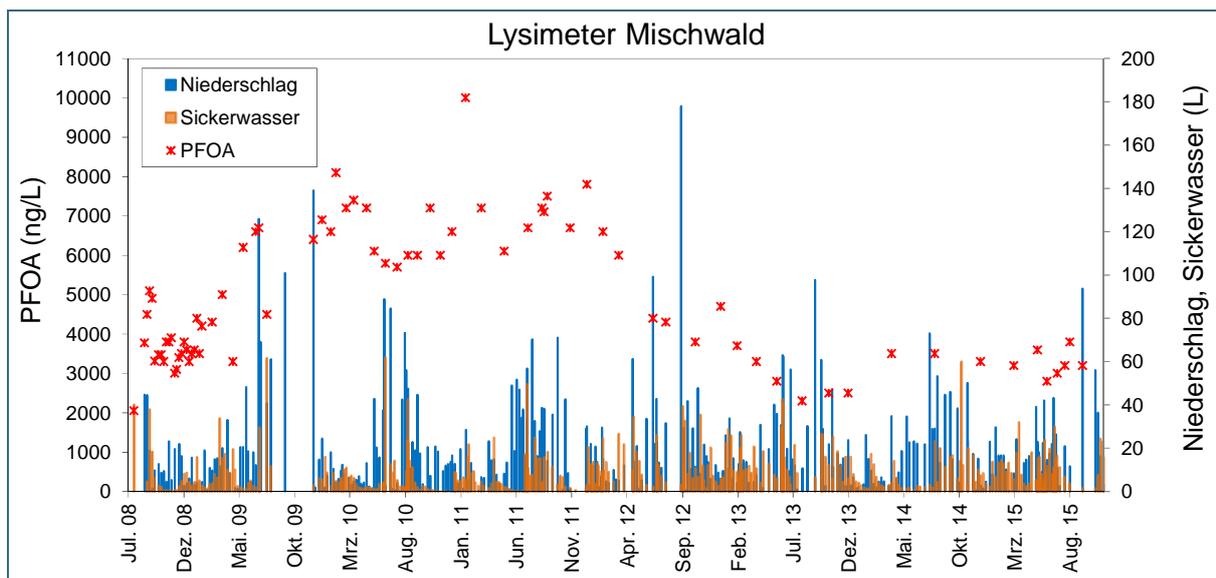


Abb. 42: Zeitlicher Verlauf der PFOA-Konzentration im Sickerwasser des Lysimeters Mischwald und Niederschlags- und Sickerwassersumme.

Der PFOA-Konzentrationsverlauf im Sickerwasser des Lysimeters Grünland ähnelt dem des Lysimeters Mischwald (siehe Abb. 43). Die Konzentrationen im Sickerwasser sind aber deutlich niedriger. Bei Lysimeter Grünland ist eine Zunahme der Konzentrationen bis zum ersten Quartal 2010 zu verzeichnen, ab dann schwanken die Gehalte zwischen 2.500 und 5.000 ng/L. Ab September 2011 gehen die Konzentrationen im Sickerwasser deutlich zurück. Von Oktober 2012 bis März 2017 liegen die PFOA-Sickerwasserkonzentrationen sehr konstant zwischen 1.500 und 2.000 ng/L (mit Ausnahme einer erhöhten Freisetzung im Sommer/Herbst 2015).

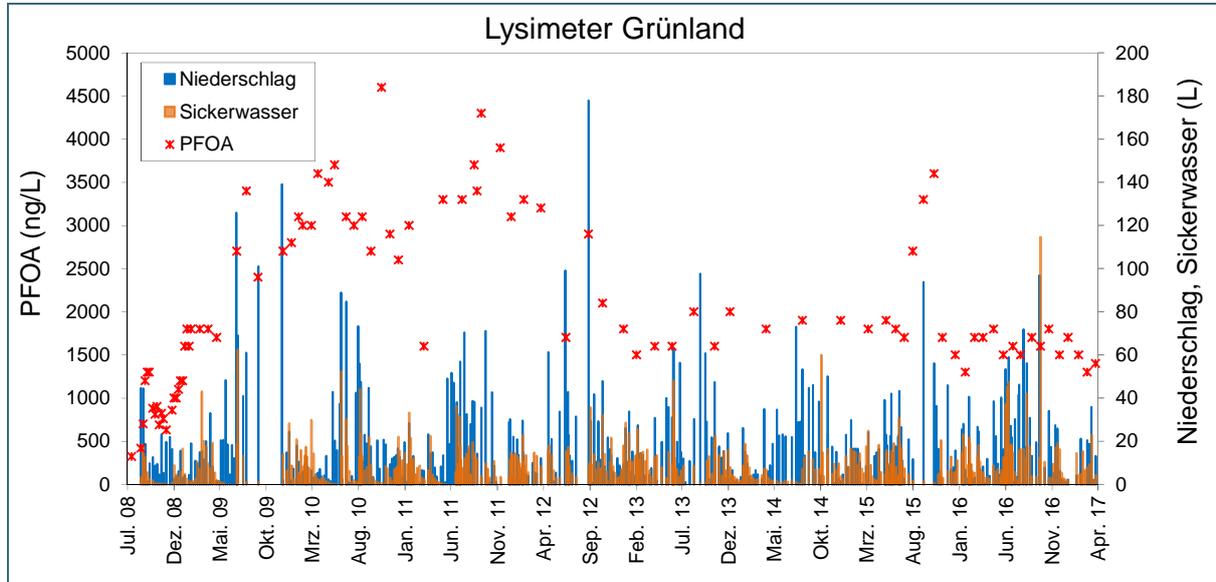


Abb. 43: Zeitlicher Verlauf der PFOA-Konzentration im Sickerwasser des Lysimeters Grünland und Niederschlags- und Sickerwassersumme.

Der Lysimeter Nadelwald weist über die gesamte Versuchslaufzeit einen zunehmenden Trend im PFOA-Konzentrationsverlauf auf. Im Sickerwasser der Lysimeter Mischwald und Grünland gehen die PFOA-Konzentrationen dagegen seit Herbst bzw. Winter 2011 kontinuierlich zurück. Wobei für den Lysimeter Grünland für die letzten drei Messwerte wieder ein deutlicher Konzentrationsanstieg zu verzeichnen ist. Es konnten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen Niederschlags- bzw. Sickerwassermenge und PFC-Konzentrationen festgestellt werden. Auch die Trübung als Hinweis auf einen möglichen partikelgebundenen Transport weist keine Korrelation zu den Konzentrationen auf.

Für die Lysimeter aus dem Raum Gendorf wurde zusätzlich der Mobilisierungsgrad für PFOA und die Summe der PFC berechnet. Tab. 21 fasst die Gesamtgehalte, den Austrag mit dem Sickerwasser und den daraus berechneten Mobilisierungsgrad für die Lysimeter Nadelwald, Mischwald und Grünland zusammen. Die Gesamtgehalte für PFOA und Summe PFC wurden über Gesamtgewicht und Trockengehalt der Lysimeter beim Einbau, PFC-Gesamtstoffgehalte der einzelnen Horizonte, deren Dichte und Mächtigkeit berechnet. Da die PFC im Boden inhomogen verteilt sind, können die berechneten Werte lediglich als Abschätzung betrachtet werden.

Tab. 21: Gesamtgehalt, Frachtaustrag mit dem Sickerwasser und daraus berechneter Mobilisierungsgrad von PFOA und der Summe der nachgewiesenen PFC. Berechnet für die Versuchslaufzeit von Mitte 2008 bis Ende 2015.

Lysimeter	berechneter Gesamtgehalt im Lysimeterkörper		Austrag mit Sickerwasser		Mobilisierungsgrad	
	PFOA (mg)	Σ PFC (mg)	PFOA (mg)	Σ PFC (mg)	PFOA (%)	Σ PFC (%)
Nadelwald	25	26	5,2	6,1	21	23
Mischwald	23	25	14,5	15,9	63	64
Grünland	20	22	7,5	7,9	37	36

Die Gesamtgehalte an PFOA und Summe PFC in den drei Lysimetern unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Jedoch wurde aus dem Lysimeter Mischwald mit einem Mobilisierungsgrad von 63 % für PFOA und 64 % für die Summe PFC deutlich höhere Schadstoffmengen freigesetzt als aus den anderen beiden Lysimetern. Die erhöhte Freisetzung kann sehr wahrscheinlich auf das während der Lysimeterentnahme gestörte Bodengefüge zurückgeführt werden.

Gesamtstoffgehalte in Pflanzen

Die Bodenmonolithen wurden zusammen mit dem jeweiligen Bewuchs in die Lysimeterzylinder eingebracht. Geerntetes Pflanzenmaterial wurde vom Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) auf PFC-Verbindungen und den Ersatzstoff für PFOA (ADONA) untersucht. Nachfolgende Tab. 22 stellt die Ergebnisse dar.

Tab. 22: Ergebnisse der Pflanzenuntersuchungen auf PFC von 2008, 2009 und 2010 (KS = Klärschlamm; n.n.=nicht nachweisbar; Bestimmungsgrenze (BG) =0,5 µg/kg, Nachweisgrenze (NG)=0,12 µg/kg). Bestimmung mit internem Standard für PFHxA, PFOA und PFOS. Bestimmung ohne internen Standard für PFHpA, ADONA (gelten als Orientierungswerte).

Lysimeter	angebaute Pflanzen	Ernte	PFHxA (ng/g)	PFHpA (ng/g)	PFOA (ng/g)	PFOS (ng/g)	ADONA (ng/g)
Klärschlamm 1	Maispflanze	Okt. 08	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Maispflanze	Okt. 09	n.n.	n.n.	n.n.	0,61	n.n.
	Maispflanze	Okt. 10	n.n.	n.n.	n.n.	< BG	n.n.
Klärschlamm 2	Gerstenkörner	Jul. 08	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Gerstenkörner ohne KS	Jul. 08	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Gersten-Stroh	Jul. 08	0,46	n.n.	0,13	Spur	n.n.
	Gersten-Stroh ohne KS	Jul. 08	1,01	n.n.	0,22	n.n.	n.n.
	Raps-Stroh	Juli 09	n.n.	n.n.	< BG	n.n.	n.n.
	Raps-Stroh ohne KS	Juli 09	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Raps-Korn	Juli 09	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Raps-Korn ohne KS	Juli 09	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Winterweizen - Stroh ohne KS	Jul. 10	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Winterweizen - Korn ohne KS	Jul. 10	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Winterweizen - Stroh mit KS	Jul. 10	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Winterweizen - Korn mit KS	Jul. 10	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Grünland	Wiese Schnitt 1	Jul. 08	n.n.	0,25	6,57	n.n.	0,15
	Wiese Schnitt 2	Aug. 08	n.n.	0,36	10,49	n.n.	0,16
	Wiese Schnitt 3	Sep. 08	n.n.	0,21	3,77	n.n.	0,06
	Wiese Schnitt 1	Jun. 09	n.n.	n.n.	1,75	n.n.	n.n.
	Wiese Schnitt 2	Jul. 09	n.n.	n.n.	2,34	n.n.	n.n.
	Wiese Schnitt 3	Sep. 09	n.n.	n.n.	2,64	n.n.	n.n.
	Wiese Schnitt 1	Jun. 10	n.n.	n.n.	0,74	n.n.	n.n.
	Wiese Schnitt 2	Aug. 10	n.n.	n.n.	2,80	n.n.	n.n.

Auf der Ackerfläche 1 (Lysimeter Klärschlamm 1) wurde in allen Jahren Mais angebaut. Während im Jahr 2008 kein PFC im Pflanzenmaterial nachgewiesen wurde, konnten 2009 erstmals Spuren von PFOS festgestellt werden, die 2010 jedoch wieder unter der Bestimmungsgrenze lagen.

Auf der Ackerfläche 2 (Lysimeter Klärschlamm 2) wurde im Jahr 2008 Gerste angebaut und im Spätsommer 2008 Winterraps angesät, der 2009 geerntet wurde. Danach erfolgte der Anbau von Winterweizen. Das Pflanzenmaterial konnte aufgrund zu geringer Mengen in allen Fällen nicht direkt vom Lysimeter verwendet werden und wurde deshalb vom ursprünglichen Standort der Versuchsflächen der LfL entnommen. Parallel dazu wurde Gerste, Raps bzw. Weizen einer unbehandelten Vergleichsfläche zur Untersuchung eingeschickt.

2008 wurden geringe Gehalte von PFHxA und PFOA im Gerstenstroh gefunden, diese sind jedoch bei den klärschlammbehandelten Flächen niedriger als die der unbehandelten Versuchsflächen. Nachdem im Raps (2009) und im Weizen (2010) keine Auffälligkeiten mehr festzustellen waren, geht man auch in Anbetracht der sehr niedrigen Konzentrationen im Bereich der Nachweisgrenze davon aus,

dass der Eintrag durch PFC-haltige Pflanzenschutzmittel oder über Verfrachtung durch die Luft stattgefunden hat, zumal der zur Düngung verwendete Klärschlamm kein PFOA enthielt.

Die Pflanzen des Grünlandstandortes (Lysimeter Grünland) aus dem Bereich Gendorf wiesen 2008 deutliche Gehalte v. a. an PFOA auf. Daneben konnten PFHpA und bereits der PFOA-Ersatzstoff ADONA in geringeren Konzentrationen nachgewiesen werden. 2009 und 2010 waren die PFOA-Gehalte bereits deutlich geringer, ADONA und andere PFC-Verbindungen waren 2009 und 2010 nicht mehr nachweisbar, jedoch waren Nachweis- und Bestimmungsgrenzen in diesen Jahren durch unterschiedliche Aufarbeitung des Pflanzenmaterials und Messverfahren höher als 2008. Auffällig ist der Anstieg der PFOA-Konzentrationen 2009 und 2010 innerhalb des jeweiligen Jahres. Eine mögliche Erklärung ist eine erhöhte Wasseraufnahme im Sommer und damit auch eine erhöhte Aufnahme von PFC, die sich im Blatt anreichern.

Fazit

Die beiden klärschlammgedüngten Ackerböden der Lysimeter Klärschlamm 1 und Klärschlamm 2 weisen in der obersten Horizontschicht geringfügig PFOS auf, die anderen PFC-Verbindungen liegen unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze. Der Ackerboden des Lysimeters Klärschlamm 1 wurde 2007 mit PFC belastetem Klärschlamm beaufschlagt (7.000 µg PFOS /kg TS) und zusätzlich 2010 auf der Lysimeterstation Wielenbach mit Klärschlamm derselben Kläranlage (2.900 µg PFOS /kg TS). Der Ackerboden 2 (Lysimeter Klärschlamm 2) wurde zuletzt auf der Lysimeterstation Anfang August 2008 mit Klärschlamm beaufschlagt (180 µg PFOS/kg TS).

Im Sickerwasser von Lysimeter Klärschlamm 1 sind PFC-Konzentrationen von maximal 450 ng/L für die Hauptkontaminante PFOS nachgewiesen worden. Nach Aufbringung des Klärschlammes stiegen die Messwerte kurzfristig deutlich an. Der Mittelwert für PFOS liegt bei 130 ng/L und die bis Versuchsende ausgetragene Fracht bei ca. 0,3 mg. Das entspricht etwa 3 % des im gesamten Boden enthaltenen PFOS-Gehaltes. Bei Lysimeter Klärschlamm 2 liegen die PFOS-Werte im Sickerwasser unter der Bestimmungsgrenze. Der Austrag von PFOS ist bei den im Vergleich zu den immissionsbeeinflussten Standorten deutlich weniger belasteten Ackerböden relativ gering. Das liegt zum einen natürlich an den geringeren Gehalten im Boden und zum anderen daran, dass PFOS ein unterschiedliches Mobilitätsverhalten gegenüber den perfluorierten Carbonsäuren aufweist. Bei einer geringeren Löslichkeit ist das Transportverhalten in den Untergrund deutlich langsamer.

Die Böden der Standorte mit der industriellen PFC-Immissionsbelastung haben erwartungsgemäß erhöhte PFOA-Gehalte, die mit zunehmender Bodentiefe abnehmen. Darüber hinaus sind in den oberen Horizonten geringfügig Spuren anderer perfluorierter Verbindungen zu finden. Die bisherigen Ergebnisse der Sickerwasseruntersuchungen zeigen z. T. beträchtliche PFC-Konzentrationen. Bei Lysimeter Nadelwald sind die Konzentrationen insgesamt am geringsten. Der Mittelwert für PFOA liegt hier bei 1.122 ng/L. Lysimeter Mischwald weist die höchsten PFOA-Konzentrationen auf, hier liegt der Mittelwert bei 4.792 ng/L, bei Lysimeter Grünland sind es 2.201 ng/L. Der Lysimeter Nadelwald weist über die gesamte Versuchslaufzeit einen zunehmenden Trend im PFOA-Konzentrationsverlauf auf. Im Sickerwasser der Lysimeter Mischwald und Grünland gehen die PFOA-Konzentrationen dagegen seit Herbst bzw. Winter 2011 kontinuierlich zurück. Wobei für den Lysimeter Grünland für die letzten drei Messwerte wieder ein deutlicher Konzentrationsanstieg zu verzeichnen war.

Der Frachtaustrag verhält sich parallel zu den Sickerwasser-Konzentrationen, mit ca. 21 % (5,2 mg) vom PFOA-Gesamtstoffgehalt des Bodenkörpers bei Lysimeter Nadelwald am niedrigsten und etwa 63 % (14,5 mg) bei Lysimeter Mischwald am höchsten. Bei Lysimeter Grünland beträgt der bisherige Elutionsgrad für PFOA um die 37 % (7,5 mg).

Die Untersuchung des 2008 geernteten Pflanzenmaterials der Lysimeter ergab bei den verschiedenen Schnitten der Wiese (Lysimeter Grünland) vor allem erhöhte PFOA-Gehalte. Außerdem konnte bereits der Ersatzstoff ADONA in Spuren nachgewiesen werden. 2009 und 2010 waren die PFOA-Konzentrationen in den Wiesenschnitten geringer und die weiteren Verbindungen verhielten sich unauffällig. Der Ersatzstoff ADONA konnte nicht mehr nachgewiesen werden. Mit der Entnahme der Lysimeter wurde der Eintrag von PFOA unterbrochen. Die Gehalte im Pflanzenmaterial sind deshalb 2009 deutlich zurückgegangen. Die noch gemessenen geringen PFOA-Gehalte stammen dann entsprechend aus der Aufnahme über den Boden.

Auf der klärschlammgedüngten Ackerfläche¹ (Lysimeter Klärschlamm 1) konnte 2009 erstmals PFOS im Pflanzenmaterial nachgewiesen werden, welches jedoch 2010 wieder unter der Bestimmungsgrenze lag.

5.2.2 Lysimeterversuch zur Untersuchung des natürlichen Austragsverhaltens von ADONA

Seit 2008 wird im Chemiepark Gendorf der PFOA-Ersatzstoff ADONA (Ammoniumsalz der 4,8-Dioxa-3H-Perfluorononansäure) eingesetzt. Dieser hat nach bisherigen Kenntnissen deutlich günstigere (öko)toxikologische Eigenschaften als PFOA. In Untersuchungen des LfU ließen sich keine endokrinen Effekte von KDONA bei Fischen nachweisen (Schwaiger et al. 2011b). Informationen zur aktuellen gesundheitlichen Bewertung von ADONA finden sich bei Fromme et al. 2016.

Die hier vorliegenden Untersuchungen haben zum Ziel das Transportverhalten von ADONA bzw. DONA (4,8-Dioxa-3H-Perfluorononansäure) im Boden zu untersuchen. Dazu wurden die Lysimeter, die 2008 im Bereich des Chemieparks Gendorf entnommen (Lysimeter Nadelwald, Mischwald und Grünland, siehe Kapitel 5.2.1) und seitdem in der Lysimeteranlage Wielenbach betrieben wurden, ab Juli 2011 mit DONA (in Form vom Kaliumsalz KDONA) beaufschlagt. Die aufgetragene Menge von $1 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ wurde in Anlehnung an die in unmittelbarer Werksnähe maximal ermittelte Depositionsraten für DONA festgelegt. Die manuelle ADONA-Aufgabe erfolgte einmal wöchentlich mit $7 \mu\text{g}$ pro Lysimeter. Ab diesem Zeitpunkt wurden die regelmäßigen Analysen des Sickerwassers um den Parameter DONA erweitert.

Die Konzentrationen im Sickerwasser der Lysimeter Nadelwald und Grünland lagen bis zwei Jahre nach der ersten manuellen ADONA-Aufgabe unter der Nachweisgrenze, danach im einstelligen ng/L-Bereich. Den Verlauf der ADONA-Konzentration im Sickerwasser des Grünlandlysimeters zeigt Abb. 44.

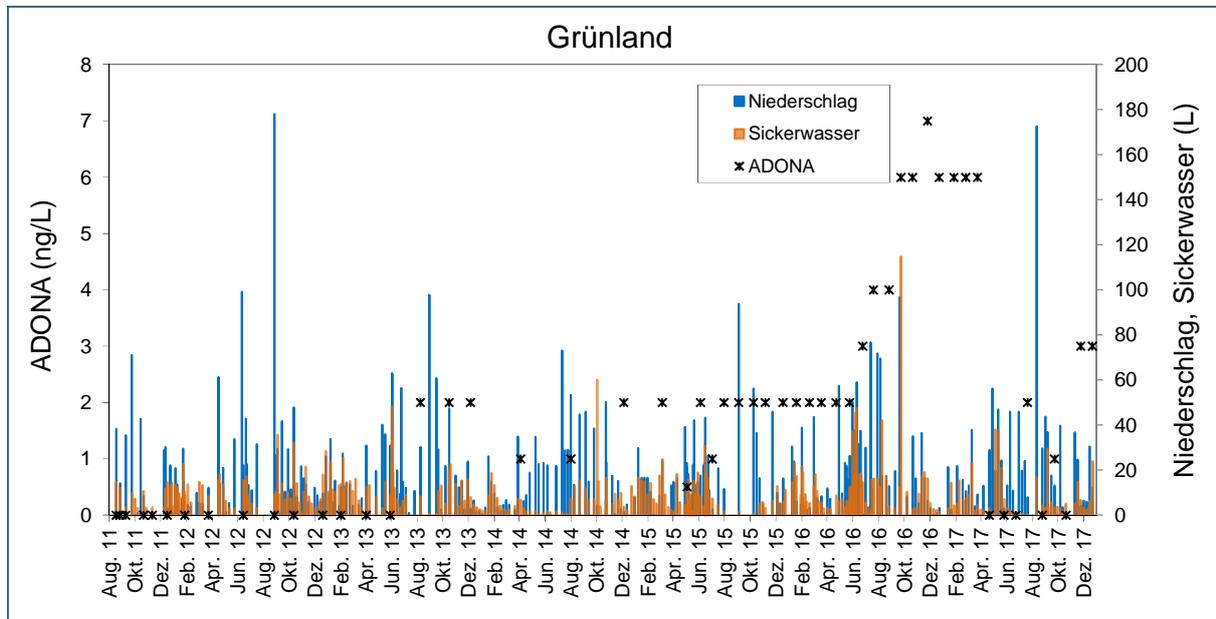


Abb. 44: Zeitlicher Verlauf der ADONA-Konzentration im Sickerwasser des Lysimeters Grünland und Niederschlags- und Sickerwassersumme.

Im Sickerwasser des Mischwaldstandorts (Mischwald), der bei der Lysimeterentnahme nur gestört gewonnen werden konnte, wodurch bereits eine erhöhte PFOA-Freisetzung in das Sickerwasser nachgewiesen wurde (siehe Kapitel 5.2.1), wurden ADONA-Konzentrationen zwischen 20 und 59 ng/L gemessen. Bereits vor der manuellen Aufgabe im Juli 2011 war ADONA im Sickerwasser nachweisbar (Daten nicht gezeigt). Dies ist darauf zurückzuführen, dass alle drei Lysimeter bereits vor der Entnahme einer ADONA-Immission ausgesetzt waren, da dieser Stoff schon vor 2008 zu Testzwecken in Gendorf eingesetzt wurde.

5.2.3 Kleinlysimeterversuche

Da bislang keine Informationen über einen möglichen Mobilisierungseffekt der PFC bei Bodenbewegungen vorliegen, wurden am LfU Kleinlysimeterversuche durchgeführt. Ziel der Versuche war es Informationen zum Transport- und Mobilisierungsverhalten der PFC in gestörten und ungestörten Böden zu erhalten.

Material und Methoden

Für die Entnahme der Kleinlysimeter (Klly) wurden zwei Standorte ausgewählt deren Böden aufgrund des Einsatzes fluorhaltiger Feuerlöschschäume eine hohe PFC-Belastung aufweisen. Beim Boden des Standorts A handelt es sich um eine etwa 50 Jahre alte Auffüllung aus humosem Material gemischt mit Bauschutt. Am Standort B liegt ein Auenboden vor. Detaillierte Informationen zu den charakteristischen Bodenparametern fasst Tab. A8 im Anhang zusammen. Aus den durch die Entnahme der Kleinlysimeter entstandenen Aufschlüssen erfolgte eine horizontweise Entnahme von Bodenmaterial bis zur gleichen Tiefe. Aus diesem nach der Entnahme horizontübergreifend homogenisierten Bodenmaterial wurden die entsprechenden gestörten Kleinlysimeter manuell aufgebaut. Die Bodensäulen haben einen Durchmesser von 30 bzw. 20 cm und eine Höhe von 60 cm. Die Bodenmenge in den gestörten Kleinlysimetern ist sehr viel geringer als in den gestochenen, ungestörten Kleinlysimetern, da durch das manuelle Befüllen der gestörten Kleinlysimeter nicht die Lagerungsdichte des natürlichen Bodens erreicht werden kann. Die TOC-Feststoffgehalte sind am Standort A mit 14 mg/kg TM um mehr als das Dreifache höher als am Standort B.

Die Kleinlysimeter des Standorts A wurden unter konstanten Versuchsbedingungen (Kühlraum bei $10 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) über insgesamt 6 Monate mit einer Beregnungsintensität von 0,5 – 1 mL/min (= 10 bis 20 mm/d) bis zu einer Gesamtmenge von 2200 mm/Klly betrieben. Der Betrieb der ungestörten Kleinlysimeter des Standorts B erfolgte über insgesamt 4 Monate mit einer Beregnungsintensität von 0,7 – 1 mL/min (=14 bis 20 mm/d). Im letzten Versuchsmonat wurde die Beregnungsmenge deutlich erhöht, damit für eine bessere Vergleichbarkeit mit den Laborelutionen ein WF-Verhältnis von 2 erreicht wurde (Gesamtmenge 2100 mm/Klly). Die gestörten Kleinlysimeter des Standorts B mit dem geringeren Durchmesser wurden etwa 3 Monate mit einer Intensität von 0,4 - 0,5 mL/min (18 bis 23 mm/d) betrieben (Gesamtmenge 1570 mm/Klly). Aufgrund der hohen Beregnungsintensität können die Kleinlysimeter damit nur eine Annäherung an die Wirklichkeit darstellen, in diesem Bezug aber als worst-case-Abschätzung durchaus sinnvolle Hinweise geben.

Zusätzlich wurden Trockenperioden und Starkregenereignisse simuliert, um deren Einfluss auf die PFC-Konzentration im Sickerwasser zu untersuchen. Der Niederschlag wurde als vollentsalztes Wasser aufgegeben. Das Sickerwasser wurde aufgefangen und in regelmäßigen Abständen auf PFC analysiert. Tab. 23 zeigt die PFC-Feststoffgehalte der zwei untersuchten Böden. Am Standort B liegt eine deutlich höhere Belastung als am Standort A vor. PFOS und PFHxS stellen an beiden Standorten die Hauptkontaminanten dar. Nur an Standort B konnte 6:2 FTS in hohen Konzentrationen in der Bodenmatrix nachgewiesen werden.

Substanz ($\mu\text{g}/\text{kg TM}$)	Standort A Horizont Ah	Standort B	
		Horizont Ah	Horizont B
PFBA	3	12	<2,0
PFBS	<1,0	2,1	0
PFPeA	7,8	28	3,6
PFHxA	5,2	22	6,7
PFHxS	30	33	11
PFHpA	<1,0	2,7	<2,0
PFOA	8,6	8,1	4,1
PFOS	751	460	1.800
PFNA	6,4	<2,0	<2,0
PFDA	<1,0	2,1	<2,0
PFUnA	<1,0	3,4	0
6:2 FTS	<1,0	110	26
8:2 FTS	<1,0	7,6	4,3

Tab. 23: PFC-Konzentrationen im Feststoff der untersuchten Böden der Standorte A und B.

Ergebnisse und Diskussion

Abb. 45 zeigt die Konzentrationsverläufe von PFOS und PFHxS im Sickerwasser der ungestörten und gestörten Kleinlysimeter des Standorts A. Zusätzlich ist der Beginn der Beregnungspausen angegeben. Die erste betrug 3 Tage, die zweite 5 Tage.

Im Sickerwasser beider Kleinlysimeter liegt die PFOS-Konzentration deutlich über der PFHxS-Konzentration. Dies kann durch die unterschiedlich hohen Feststoffgehalte erklärt werden. Zu Beginn steigt die PFOS-Konzentration im Sickerwasser der ungestörten Bodensäule auf ca. 90 $\mu\text{g}/\text{L}$ an und nimmt ab einem W/F-Verhältnis von 0,2 langsam auf ca. 40 $\mu\text{g}/\text{L}$ ab. Die PFHxS-Konzentration beträgt zu Versuchsbeginn 40 $\mu\text{g}/\text{L}$ und lässt sich ab einem W/F-Verhältnis von 1,3 nicht mehr im Sickerwasser nachweisen.

Im Sickerwasser der gestörten Kleinlysimeter setzt die PFOS- und PFHxS-Mobilisierung mit einer zeitlichen Verzögerung ein. Die PFOS-Konzentration nimmt bis zu einem W/F-Verhältnis von 0,4 zu und

schwankt über den restlichen Versuchszeitraum um 40 µg/L. Der PFHxS-Konzentrationsverlauf steigt bis zum W/F-Verhältnis von 0,6 auf ca. 25 µg/L an und nimmt danach ab.

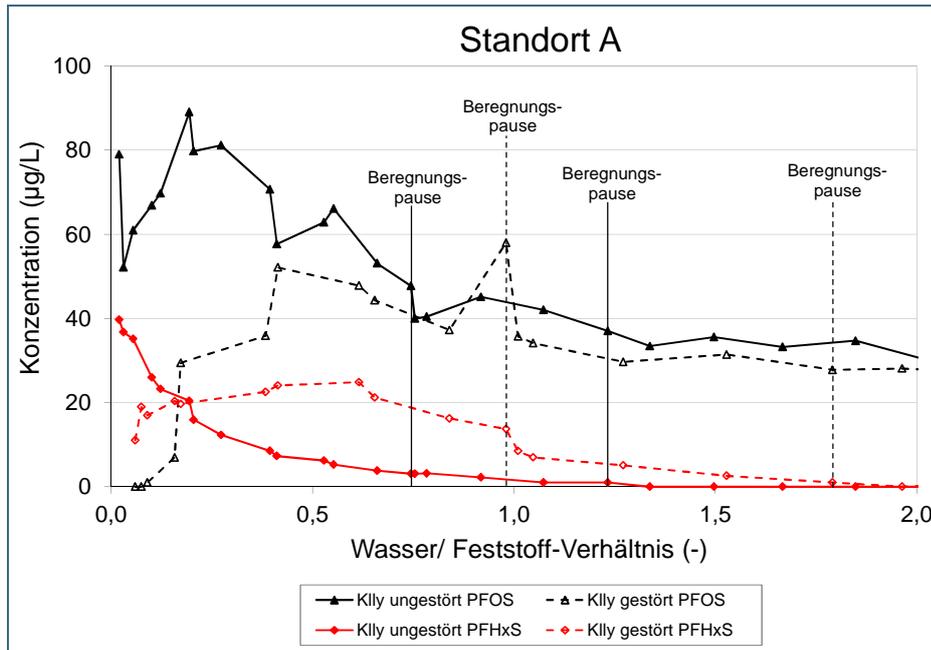


Abb. 45: Verlauf der PFOS- und PFHxS-Konzentration im Sickerwasser der ungestörten und gestörten Kily von Standort A mit zunehmendem W/F-Verhältnis. Die schwarzen Linien kennzeichnen die Beregnungspausen der ungestörten Kily, die unterbrochenen Linien die Beregnungspausen der gestörten Kily.

Die Beregnungspausen haben keinen Einfluss auf den Verlauf der PFOS- und PFHxS-Konzentrationen im Sickerwasser der ungestörten und gestörten Kleinlysimeter. Die kurzkettigen Carbonsäuren werden sehr schnell mit dem Sickerwasser des ungestörten und gestörten Kleinlysimeters ausgetragen und liegen bereits ab einem W/F-Verhältnis von ca. 0,6 unterhalb der Bestimmungsgrenze (siehe Abb. A1 im Anhang).

In Abb. 46 ist der Konzentrationsverlauf der PFOS, PFHxS und 6:2 FTS im Sickerwasser der ungestörten und gestörten Kleinlysimeter des Standorts B dargestellt. Zusätzlich sind der Beginn der Beregnungspause (Dauer 10 Tage) und der Zeitpunkt der Starkregensimulation (50 mm in 2 Stunden) eingetragen.

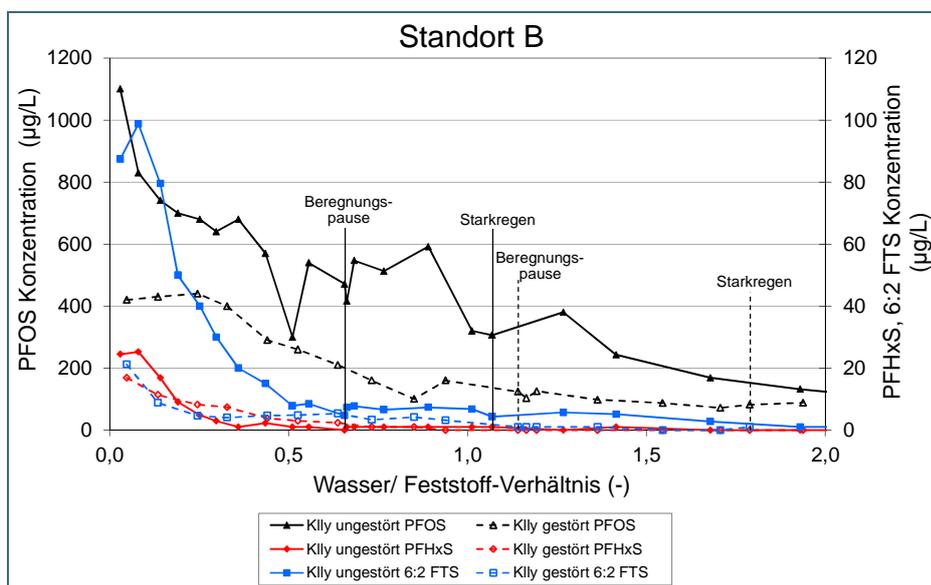


Abb. 46: Verlauf der PFOS-, PFHxS- und 6:2 FTS-Konzentration im Sickerwasser der ungestörten und gestörten Kily von Standort B mit zunehmendem W/F-Verhältnis. Die schwarzen Linien kennzeichnen die Beregnungspause und Starkregensimulation des ungestörten Kily, die unterbrochenen Linien kennzeichnen die Beregnungspause und Starkregensimulation des gestörten Kily.

Auch am Standort B liegen die PFOS-Konzentrationen mit anfangs über 1.000 µg/L (ungestörtes Killy) bzw. 400 µg/L (gestörtes Killy) weit über den PFHxS- und 6:2 FTS-Konzentrationen, die bei Versuchsbeginn zwischen 20 (gestörtes Killy) und 100 µg/L (ungestörtes Killy) liegen. Dies lässt sich erneut mit dem deutlich höheren PFOS-Feststoffgehalt erklären.

Die PFOS-Konzentration im Sickerwasser des ungestörten Kleinlysimeters sinkt während des Versuchslaufs von 1000 auf 100 µg/L ab. Auch am Standort B wird PFOS aus dem gestörten Boden mit einer zeitlichen Verzögerung in das Sickerwasser abgegeben. Über den gesamten Versuchszeitraum liegt die PFOS-Konzentration dabei deutlich unter der PFOS-Konzentration des ungestörten Lysimeters.

Die 6:2 FTS-Konzentration im Sickerwasser der ungestörten Bodensäule hat bereits bei dem W/F-Verhältnis von 0,5 um den Faktor 10 abgenommen (von 100 auf 10 µg/L). Die 6:2 FTS-Konzentration des gestörten Kleinlysimeters liegt deutlich unter der Konzentration des ungestörten. Im Vergleich zu Standort A ist der Konzentrationsverlauf der PFHxS der gestörten und ungestörten Kleinlysimeter sehr ähnlich. Die kurzkettigen perfluorierten Carbonsäuren und PFOA werden aus beiden Killy sehr schnell mit dem Sickerwasser ausgetragen (siehe Abb. A2 im Anhang). Auch im Sickerwasser der Kleinlysimeter des Standorts B hatten weder das simulierte Trockenwetterereignis noch das Starkregenereignis einen signifikanten Einfluss auf den Konzentrationsverlauf der PFC.

Tab. 24 fasst die PFC-Frachtausträge (berechnet bis W/F 2) aus den untersuchten Kleinlysimetern zusammen. Der PFOS-Austrag ist bei dem ungestörten Kleinlysimeter des Standorts A deutlich höher als bei dem gestörten. Der Frachtaustrag von PFHxS zeigt dagegen eine etwas andere Tendenz, hier ist der Austrag aus dem gestörten Kleinlysimeter höher. Am Standort B ist der Austrag von PFOS, PFHxS und 6:2 FTS aus dem Boden des ungestörten Kleinlysimeters um das Drei- bis Fünffache höher als aus dem gestörten Boden.

Tab. 24: Kumulierter Frachtaustrag (in µg) von PFHxS, PFOS und 6:2 FTS mit dem Sickerwasser aus den untersuchten ungestörten und gestörten Killy. Berechnet bis zu einem W/F-Verhältnis von 2.

Parameter	Standort A		Standort B	
	Killy ungestört	Killy gestört	Killy ungestört	Killy gestört
PFHxS	560	820	310	100
PFOS	5780	2490	38020	7310
6:2 FTS	-	-	1700	470

Vergleicht man die beiden Standorte miteinander, zeigt sich, dass aus dem gestörten Boden des Standorts A bis zum W/F 2 9 % des insgesamt im Boden enthaltenen PFOS ausgetragen wurden. Dagegen wurden aus dem ungestörten Boden des Standorts B bis W/F 2 bereits 17 % ausgetragen. Möglicherweise wird am Standort B aufgrund des deutlich niedrigeren TOC-Gehalts PFOS schlechter im Boden zurückgehalten.

Fazit

Durch die spezifischen Transporteigenschaften bedingt, stellen sich je nach Bodeneigenschaften und Schadstoffbelastung für die untersuchten PFC Lösungsgleichgewichte ein, die sich auch durch unterschiedliche Beregnungsintensitäten und Trockenphasen nicht wesentlich beeinflussen lassen.

Für die untersuchten Böden konnte gezeigt werden, dass die PFC in der Bodenmatrix über das Sickerwasser in unterschiedlichem Ausmaß ausgetragen werden. Wie bereits aus der Literatur bekannt ist, adsorbieren die kürzerkettigen Verbindungen weniger gut an die Bodenmatrix und werden deshalb schneller mit dem Sickerwasser ausgetragen (Gellrich et al. 2012; Sepulvado et al. 2011). Für beide Standorte konnte keine erhöhte Freisetzung der Hauptkontaminante PFOS aus den gestörten verglichen mit dem ungestörten Boden nachgewiesen werden. Möglicherweise werden durch die Störung

des Bodengefüges neue Bindungsplätze geschaffen, die den Austrag von PFOS verringern. Am Standort B verringerte sich auch der PFHxS- und 6:2 FTS-Austrag durch die Störung des Bodengefüges. Dagegen konnten im Sickerwasser des gestörten Kleinlysimeters von Standort A höhere Frachten von PFHxS gemessen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Bodenaushub im Zuge einer Bodensanierung im Allgemeinen keine deutlich erhöhte PFC-Mobilisierung eintritt.

5.2.4 Säulen- und Batchversuche

Um zu beurteilen, welche Gefahr von belastetem Bodenmaterial ausgeht, werden bislang in den unterschiedlichen Rechtsbereichen von Abfall, Bodenschutz und Grundwasserschutz verschiedene Elutionsverfahren angewendet. Die Verfahren haben das Ziel den mobilen bzw. mobilisierbaren Schadstoffanteil im Boden zu bestimmen. Um diese verschiedenen Verfahren auf ihre Vergleichbarkeit bezüglich PFC zu überprüfen, wurden belastete Bodenproben mit Hilfe ausgewählter standardisierter Laborverfahren untersucht. Folgende Elutionsverfahren wurden angewendet: Säulenversuch nach DIN 19528:2009-01 (Säule), Schüttelversuch mit W/F-Verhältnis 10:1 nach DIN 38414-14:2011-08 (Schüttel 10:1) und 2:1 nach DIN 19527:2012 (Schüttel 2:1) und LfU-2:1-Extraktion (Extraktion 2:1, nach (Scheithauer et al. 2003)). Die Ergebnisse dieser Verfahren wurden anschließend mit den Ergebnissen der Kleinlysimeterstudien (siehe Kapitel 5.2.3) verglichen.

Für den direkten Vergleich zwischen den Ergebnissen der Batchversuche und der Säulen- bzw. Kleinlysimeterversuche muss auf die Momentankonzentration im Säuleneluat bzw. Sickerwasser zurückgerechnet werden. Die Momentankonzentration wird dabei aus der kumulierten PFOS-Fracht und dem Wasservolumen zum jeweiligen W/F-Verhältnis berechnet (siehe auch DIN 19528:2009-01).

Abb. 47 zeigt für die untersuchten Standorte A und B die PFOS-Konzentration im Sickerwasser der ungestörten und gestörten Kleinlysimeter im Vergleich zu den Eluat-Konzentrationen, die mit den verschiedenen Laborverfahren für unterschiedliche W/F-Verhältnisse ermittelt wurden.

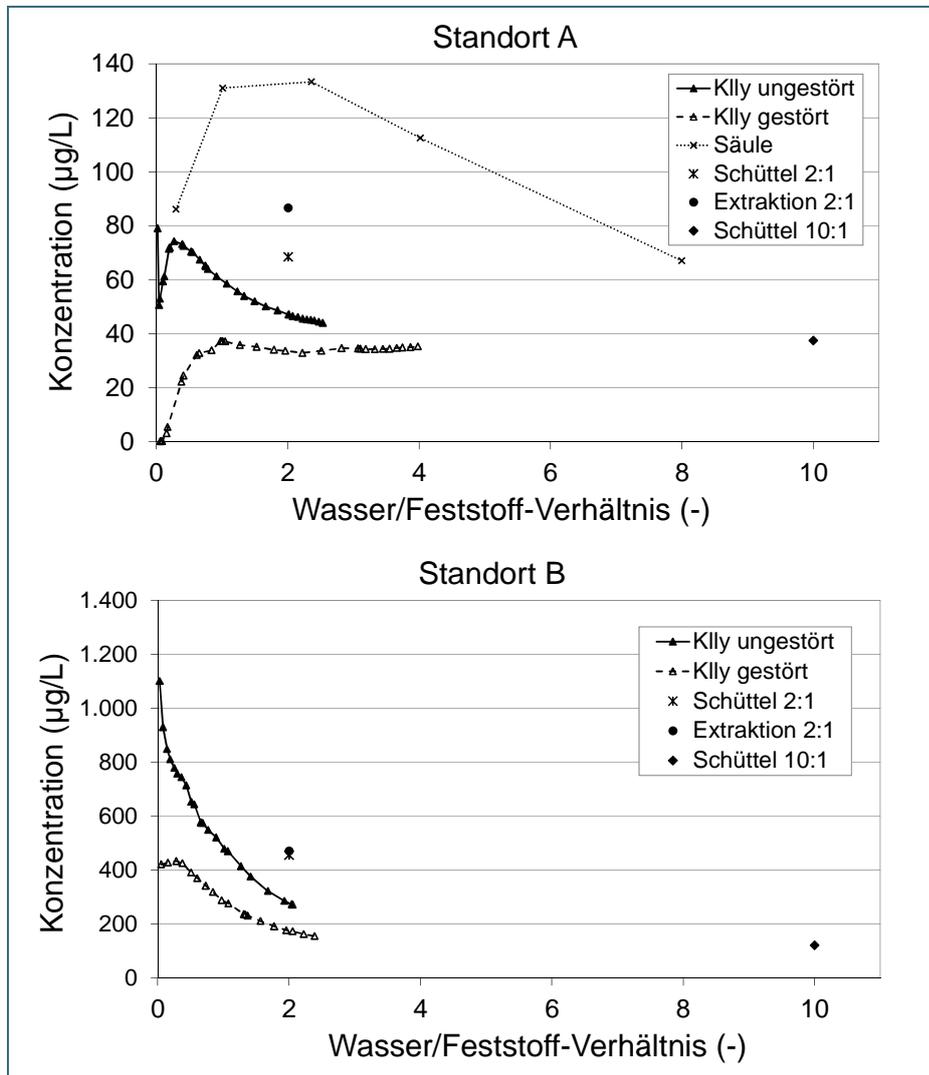


Abb. 47: Vergleich der PFOS-Konzentrationen, die mit den unterschiedlichen Elutionsverfahren bzw. Kleinlysime-terversuch ermittelt wurden.

Es zeigte sich, dass bei einem W/F-Verhältnis von 2:1 die PFOS-Konzentrationen im Sickerwasser der ungestörten und gestörten Kleinlysime-ter deutlich unterhalb der Konzentrationen liegen, die mittels der Batch-Verfahren Schüttel 2:1 und Extraktion 2:1 ermittelt wurden. Die erhöhte Freisetzung in den Laborversuchen lässt sich mit den gesättigten Versuchsbedingungen erklären, die bewirken können, dass ein höherer Schadstoffanteil mobilisiert wird.

Bei Versuchsende der Kleinlysime-terversuche liegen die PFOS-Konzentrationen im Sickerwasser der ungestörten und gestörten Kily auf dem Niveau der Ergebnisse des Schüttel-10:1-Versuchs. Dieser scheint damit geeignet, die langfristig zu erwartende PFOS-Belastung im Sickerwasser anzuzeigen. Die mittels Säulenversuch ermittelte PFOS-Konzentration (nur für den Standort A durchgeführt) liegt deutlich über den Konzentrationen der anderen Verfahren. Aber auch hier nimmt die PFOS-Konzentration mit zunehmenden W/F ab und nähert sich an das Konzentrationsniveau der Sickerwä-sser der Kily bzw. des Schüttel-eluats W/F 10 an.

Tab. 25 zeigt die Mobilisierungsgrade für PFOS, PFHxS und 6:2 FTS der Laborverfahren im Vergleich zu den Kleinlysime-tern bei W/F 2. Zur Berechnung der Gesamtgehalte der ungestörten Kily wird eine homogene Verteilung der PFC im Boden angenommen. PFHxS und 6:2 FTS werden erwartungsgemäß deutlich besser mobilisiert als PFOS. Mittels Laborversuchen wird ein höherer Mobilisierungsgrad für PFOS und PFHxS erreicht. Dies kann damit erklärt werden, dass die Laborelutionsverfahren unter gesättigten Bedingungen durchgeführt werden. Zusätzlich wird das Bodenmaterial bei den

Schüttelversuchen mechanisch beansprucht, was eine erhöhte Schadstofffreisetzung aufgrund von Abrieb verursachen kann. Das alle Laborversuche bei Raumtemperatur durchgeführt werden, und nicht wie der Betrieb der Killy bei 10°C, kann ebenfalls zu höheren Mobilisierungsgraden beitragen.

Tab. 25: PFOS-, PFHxS- und 6:2 FTS-Mobilisierungsgrad (in %) der einzelnen Laborverfahren sowie der Kleinlysimiterversuche bei W/F 2.

Standort	Substanz	Killy ungestört	Killy gestört	Schüttel	Extrakt	Säule
Standort A	PFHxS	30	72	57	59	62
	PFOS	13	9	18	23	42
Standort B	PFHxS	41	42	96	134	
	PFOS	31	17	51	52	
	6: 2 FTS	96	78	58	89	

Für den Standort A liegt der PFHxS- Mobilisierungsgrad des gestörten Kleinlysimeters auf etwa gleichem Niveau wie die Laborversuche, aus dem ungestörten Kleinlysimeters wird nur etwa die Hälfte an PFHxS freigesetzt. Für den Standort B liegen die Mobilisierungsgrade für PFHxS zwischen 96 und 134 %. Der Mobilisierungsgrad von über 100 % kann damit erklärt werden, dass die PFHxS-Feststoffgehalte relativ gering sind und damit bei einer Messtoleranz von ± 30 % bei der Berechnung der Mobilisierungsgrade große Fehler auftreten können. Auch die inhomogene Stoffverteilung in der Probe macht gerade niedrige Konzentrationen bei der Gehaltsbestimmung im Feststoff sehr fehleranfällig.

Der Vergleich von Schüttel- und Extraktionsversuchen bei W/F 2 zeigt für PFOS und PFHxS keine auffälligen Konzentrationsunterschiede. Somit scheint die versuchsbedingt unterschiedliche mechanische Materialbeanspruchung keinen Einfluss auf das Elutionsverhalten dieser beiden Substanzen zu haben. Auf Grund der meist inhomogenen Verteilung der Schadstoffe im Boden ist bei allen Prognosen Vorsicht geboten. Eine flächen- und tiefenübergreifende Erfassung einer Kontamination kann mit vertretbarem Aufwand aber nur durch einfache Laborversuche wie z. B. Schüttelversuche realisiert werden. Für eine Abschätzung auf einer größeren zeitlichen Skala haben die Vergleiche der Kleinlysimeter mit dem Batchversuch bei W/F 10 gezeigt, dass damit eine längerfristig zu erwartende Konzentration abgeschätzt werden kann.

6 Literatur

- Abwasserverordnung (1997): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer. (AbwV).
- Ahrens, L. (2011): Polyfluoroalkyl compounds in the aquatic environment: a review of their occurrence and fate. *Journal of Environmental Monitoring* 13, 1/2011, S. 20–31.
- Alder, A. C., J. van der Voet (2015): Occurrence and point source characterization of perfluoroalkyl acids in sewage sludge. *Chemosphere* 129, 0/2015, S. 62–73.
- Alsmeyer, Y. W., W. V. Childs, R. M. Flynn, G. G. I. Moore, J. C. Smeltzer (1994): Electrochemical Fluorination and Its Applications. In: Banks, R. E., B. E. Smart, J. C. Tatlow (Hrsg.): *Organofluorine Chemistry*. Springer US, S. 121–143.
- Armstrong, D. L., N. Lozano, C. P. Rice, M. Ramirez, A. Torrents (2016): Temporal trends of perfluoroalkyl substances in limed biosolids from a large municipal water resource recovery facility. *J. Environ. Manage.* 165, 2016, S. 88–95.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017): Leitlinien zur vorläufigen Bewertung von PFC-Verunreinigungen in Wasser und Boden. Abrufbar unter www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/doc/leitlinien_vorlaufbewertung_pfc_verunreinigungen.pdf.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007): PFC-Belastung von Fischen und Muscheln. Untersuchungszeitraum 2005 - 2007, Augsburg. Abrufbar unter www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/per_polyfluorierte_chemikalien/pfc_belastung_fische/doc/pfc_belastung_fisch_muschel_2006_2007.pdf.
- Blepp, M., M. Willand, R. Weber (2015): Berichterstattung an die Europäische Kommission nach Artikel 12 der EU-POP-Verordnung (EU-POP-VO).
- Bossi, R., J. Strand, O. Sortkjær, M. M. Larsen (2008): Perfluoroalkyl compounds in Danish wastewater treatment plants and aquatic environments. *Environ. Int.* 34, 4/2008, S. 443–450.
- Boulanger, B., J. D. Vargo, J. L. Schnoor, K. C. Hornbuckle (2005): Evaluation of Perfluorooctane Surfactants in a Wastewater Treatment System and in a Commercial Surface Protection Product. *Environ. Sci. Technol.* 39, 15/2005, S. 5524–5530.
- Buck, R. C., J. Franklin, U. Berger, J. M. Conder, I. T. Cousins, P. de Voogt, J. A. Astrup, K. Kannan, S. A. Mabury, S. P.J. van Leeuwen (2011): Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins. *Integrated Environmental Assessment and Management* 7, 4/2011, S. 513–541.
- Buck, R. C., Murphy C. M., M. Pabon (2012): Chemistry, Properties, and Uses of Commercial Fluorinated Surfactants. In: Knepper, T. P., F. T. Lange (Hrsg.): *Polyfluorinated Chemicals and Transformation Products*. The Handbook of Environmental Chemistry, S. 1–24.
- Carter, K. E., J. Farrell (2008): Oxidative Destruction of Perfluorooctane Sulfonate Using Boron-Doped Diamond Film Electrodes. *Environmental Science & Technology* 42, 16/2008, S. 6111–6115.
- Deng, S., Q. Zhang, Y. Nie, H. Wei, B. Wang, J. Huang, G. Yu, B. Xing (2012): Sorption mechanisms of perfluorinated compounds on carbon nanotubes. *Environmental Pollution* 168, 2012, S. 138–144.
- DIN 19527:2012: Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg. Deutsches Institut für Normung e. V.

DIN 19528:2009-01: Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen. Deutsches Institut für Normung e. V.

DIN 38407-42:2011-03: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) - Teil 42: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Wasser - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) nach Fest-Flüssig-Extraktion (F 42). Deutsches Institut für Normung e. V.

DIN 38414-14:2011-08: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Teil 14: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Schlamm, Kompost und Boden - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS). Deutsches Institut für Normung e. V.

DIN 38414-4:1984: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4). Deutsches Institut für Normung e. V.

DIN EN ISO 15088:2009: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der akuten Toxizität von Abwasser auf Zebrafisch-Eier (*Danio rerio*). Deutsches Institut für Normung e. V.

DIN EN ISO 6341:2013: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Hemmung der Beweglichkeit von *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) - Akuter Toxizitäts-Test. Deutsches Institut für Normung e. V.

DIN EN ISO 8692:2012: Wasserbeschaffenheit - Süßwasseralgen-Wachstumshemmtest mit einzelligen Grünalgen. Deutsches Institut für Normung e. V.

Dreyer, A., R. Ebinghaus (2009): Polyfluorinated compounds in ambient air from ship- and land-based measurements in northern Germany. *Atmospheric Environment* 43, 8/2009, S. 1527–1535.

EU (2011a): PFOS EQS dossier. Abrufbar unter <https://circabc.europa.eu/sd/a/027ff47c-038b-4929-a84c-da3359acecee/PFOS%20EQS%20dossier%202011.pdf>.

EU (2011b): Technical Guidance for Deriving Environmental Quality Standards (TGD-EQS). Guidance Document No. 27.

Fricke, M., U. Lahl (2005): Risikobewertung von Perfluortensiden als Beitrag zur aktuellen Diskussion zum REACH-Dossier der EU-Kommission. *UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox.* 17, 1/2005, S. 36–49.

Fromme, H., E. Roscher, W. Völkel (2016): Sachstandsbericht ADONA und perfluorierte Substanzen. Abrufbar unter www.lgl.bayern.de/downloads/gesundheit/arbeitsplatz_umwelt/doc/adona_sachstandsbericht.pdf.

Fujii, S., C. Polprasert, S. Tanaka, N. P. H. Lien, Y. Qiu (2007): New POPs in the water environment. distribution, bioaccumulation and treatment of perfluorinated compounds - a review paper. *J. Water Supply Res. T.* 56, 5/2007, S. 313–326.

Gellrich, V. (2014): Sorption und Verbreitung per- und polyfluorierter Chemikalien (PFAS) in Wasser und Boden, Gießen.

Gellrich, V., T. Stahl, T. P. Knepper (2012): Behavior of perfluorinated compounds in soils during leaching experiments. *Chemosphere* 87, 9/2012, S. 1052–1056.

- Guerra, P., M. Kim, L. Kinsman, T. Ng, M. Alaei, S. A. Smyth (2014): Parameters affecting the formation of perfluoroalkyl acids during wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials* 272, 0/2014, S. 148–154.
- Guo, R., W.-J. Sim, E.-S. Lee, J.-H. Lee, J.-E. Oh (2010): Evaluation of the fate of perfluoroalkyl compounds in wastewater treatment plants. *Water Res* 44, 11/2010, S. 3476–3486.
- Hansen, M., M. Børresen, M. Schlabach, G. Cornelissen (2010): Sorption of perfluorinated compounds from contaminated water to activated carbon. *Journal of Soils and Sediments* 10, 2/2010, S. 179–185.
- Higgins, C. P., J. A. Field, C. S. Criddle, R. G. Luthy (2005): Quantitative Determination of Perfluorochemicals in Sediments and Domestic Sludge. *Environ. Sci. Technol.* 39, 11/2005, S. 3946–3956.
- Higgins, C. P., R. G. Luthy (2006): Sorption of Perfluorinated Surfactants on Sediments. *Environ. Sci. Technol.* 40, 23/2006, S. 7251–7256.
- Hohenblum, P., S. Scharf, A. Sitka (2003): Perfluorierte anionische Tenside in österreichischen Industrieabwässern. *Vom Wasser* 101, 2003, S. 155–164.
- Hoke, R. A., B. D. Ferrell, T. Ryan, T. L. Sloman, J. W. Green, D. L. Nabb, R. Mingoia, R. C. Buck, S. H. Korzeniowski (2015): Aquatic hazard, bioaccumulation and screening risk assessment for 6:2 fluorotelomer sulfonate. *Chemosphere* 128, 2015, S. 258–265.
- Houde, M., A. O. de Silva, D. C. G. Muir, R. J. Letcher (2011): Monitoring of Perfluorinated Compounds in Aquatic Biota. An Updated Review. *Environ. Sci. Technol.* 45, 19/2011, S. 7962–7973.
- Hübner, G., M. Gierig, U. Rast, Sengl M. (2011): Analyse und Verteilungsverhalten von perfluorierten Chemikalien und anderen persistenten organischen Spurenstoffen in Klärschlamm und Boden, Augsburg.
- Huset, C. A., A. C. Chiaia, D. F. Barofsky, N. Jonkers, H.-P. E. Kohler, C. Ort, W. Giger, J. A. Field (2008): Occurrence and Mass Flows of Fluorochemicals in the Glatt Valley Watershed, Switzerland. *Environ. Sci. Technol.* 42, 17/2008, S. 6369–6377.
- Jahnke, A., U. Berger, R. Ebinghaus, C. Temme (2007): Latitudinal gradient of airborne polyfluorinated alkyl substances in the marine atmosphere between Germany and South Africa (53 degrees N-33 degrees S). *Environ. Sci. Technol.* 41, 9/2007, S. 3055–3061.
- Johnson, R., A. J. Anschutz, J. M. Smolen, M. F. Simcik, P. R. Lee (2007): The adsorption of perfluorooctane sulfonate onto sand, clay and iron oxide surfaces. *Journal of chemical and engineering data* 52, 4/2007, S. 1165–1170.
- Klärschlammverordnung (2017): Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm. (AbfKlärV).
- Klärschlammverordnung (1992). (AbfKlärV).
- Körner, W., M. Klein, M. Sengl (2016): Untersuchungen zur Akkumulation verschiedener persistenter Schadstoffe in terrestrischen Wildtieren., Augsburg.
- Lange, F. T., A. Wagner, E. Worch, S. Willach, H.-J. Brauch (2013): Bestimmung von adsorbierbarem organisch gebundenem Fluor (AOF) in der aquatischen Umwelt. Wie viel Organofluor ist über die PFC-Einzelsubstanzanalytik erklärbar? *Vom Wasser* 111/3, 2013, S. 75–77.
- Lange, F. T., S. Willach, H.-J. Brauch (2014): Adsorbierbares organisch gebundenes Fluor (AOF) – ein weiterentwickelter Wasserqualitätsparameter zum Aufspüren von PFC-Hotspots. *energie | wasser-praxis* 9, 2014, S. 66–69.
- Lau, C., K. Anitole, C. Hodes, D. Lai, A. Pfahles-Hutchens, J. Seed (2007): Perfluoroalkyl Acids. A Review of Monitoring and Toxicological Findings. *Toxicological Sciences* 99, 2/2007, S. 366–394.

- LAWA (2017): Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser - Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC).
- LAWA-AO (2016): Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. Ausschuss Oberirdische Gewässer und Küstengewässer. Rahmenkonzeption Monitoring, Teil B Bewertungsgrundlagen und Methodenbeschreibungen. Arbeitspapier IV.3 Konzeption für Biota-Untersuchungen zur Überwachung von Umweltqualitätsnormen gemäß RL 2008/105/EG, geändert durch 2013/39/EU.
- Moody, C. A., G. N. Hebert, S. H. Strauss, J. A. Field (2003): Occurrence and persistence of perfluorooctanesulfonate and other perfluorinated surfactants in groundwater at a fire-training area at Wurtsmith Air Force Base, Michigan, USA. *Journal of Environmental Monitoring* 5, 2003, S. 341–345.
- Oberflächengewässerverordnung (2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2016 Teil I Nr. 28 (OGewV).
- Oberflächengewässerverordnung (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2011 Teil I Nr. 37. (OGewV).
- Ochiai, T., Y. Iizuka, K. Nakata, T. Murakami, D. A. Tryk, A. Fujishima, Y. Koide, Y. Morito (2011): Efficient electrochemical decomposition of perfluorocarboxylic acids by the use of a boron-doped diamond electrode. *Diamond and Related Materials* 20, 2/2011, S. 64–67.
- Ochoa-Herrera, V., R. Sierra-Alvarez (2008): Removal of perfluorinated surfactants by sorption onto granular activated carbon, zeolite and sludge. *Chemosphere* 72, 10/2008, S. 1588–1593.
- OECD (2018): Toward a new comprehensive global database of Per- and Polyfluoralkyl Substances (PFASs). Summary report on updating the OECD 2007 list of Per- and Polyfluoralkyl Substances (PFASs). OECD Environment, Health and Safety Publications, Series on Risk Management.
- OECD (2013): Synthesis paper on per- and polyfluorinated chemicals (PFCs). Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD. OECD/UNEP Global PFC Group.
- OECD 210 (1992): Fish, Early-Life Stage Toxicity Test. OECD Publishing.
- OECD 211 (2012): Daphnia magna Reproduction Test. OECD Publishing.
- Olofsson, U., A. Bignert, P. Haglund (2012): Time-trends of metals and organic contaminants in sewage sludge. *Water Research* 46, 15/2012, S. 4841–4851.
- Posner, S. (2012): Perfluorinated Compounds: Occurrence and Uses in Products. In: Knepper, T. P., F. T. Lange (Hrsg.): *Polyfluorinated Chemicals and Transformation Products. The Handbook of Environmental Chemistry*, 25-39.
- Prevedouros, K., I. T. Cousins, R. C. Buck, S. H. Korzeniowski (2006): Sources, Fate and Transport of Perfluorocarboxylates. *Environ. Sci. Technol.* 40, 1/2006, S. 32–44.
- Richtlinie 2000/60/EG: Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Wasserrahmenrichtlinie (WRRL).
- Richtlinie 2008/105/EG: Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien des Rates 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG.
- Richtlinie 2010/75/EU: Richtlinie des Europäischen Parlaments und Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen, L 334/17 – L 334/119 (IED).

Richtlinie 2013/39/EU: Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik.

Scheithauer, M., M. Gierig, L. Erhard, U. Rexer (2003): Auswertung und Durchführung von Sickerwasser-, Eluat- und Bodenuntersuchungen zur Ableitung von Prüfwerten zur Emissionsabschätzung bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser.

Schultz, M. M., C. P. Higgins, C. A. Huset, R. G. Luthy, D. F. Barofsky, J. A. Field (2006): Fluorochemical Mass Flows in a Municipal Wastewater Treatment Facility. *Environ. Sci. Technol.* 40, 23/2006, S. 7350–7357.

Schwaiger, J., H. Ferling, M. Gerst, C. Römer (2011a): Auswirkungen der Perfluorsulfonsäure (PFOS) auf Regenbogenforellen. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben 76e 040100 94.

Schwaiger, J., H. Ferling, M. Gerst, U. Rucker, C. Römer (Hrsg.) (2011b): Chronische Wirkungen von PFOS und einem PFOA-Ersatzstoff auf Fische.

Senevirathna, S.T.M.L.D., S. Tanaka, S. Fujii, C. Kunacheva, H. Harada, B. H. Ariyadasa, B. R. Shivakoti (2010): Adsorption of perfluorooctane sulfonate (n-PFOS) onto non ion-exchange polymers and granular activated carbon. Batch and column test. *Desalination* 260, 1–3/2010, S. 29–33.

Senevirathna, S.T.M.L.D., S. Tanaka, S. Fujii, C. Kunacheva, H. Harada, B. R. Shivakoti, H. Dinh, T. Ariyadasa (2011): Adsorption of four perfluorinated acids on non ion exchange polymer sorbents. *Water Science & Technology* 63, 10/2011, S. 2106–2113.

Sepulvado, J. G., A. C. Blaine, L. S. Hundal, C. P. Higgins (2011): Occurrence and Fate of Perfluorochemicals in Soil Following the Land Application of Municipal Biosolids. *Environmental Science & Technology* 45, 19/2011, S. 8106–8112.

Silva, A. O. de, D. C. G. Muir, S. A. Mabury (2009): Distribution of perfluorocarboxylate isomers in select samples from the north american environment. *Environmental Toxicology and Chemistry* 28, 9/2009, S. 1801–1814.

Sinclair, E., K. Kannan (2006): Mass Loading and Fate of Perfluoroalkyl Surfactants in Wastewater Treatment Plants. *Environ. Sci. Technol.* 40, 5/2006, S. 1408–1414.

Sun, H., A. C. Gerecke, W. Giger, A. C. Alder (2011): Long-chain perfluorinated chemicals in digested sewage sludges in Switzerland. *Environmental Pollution* 159, 2/2011, S. 654–662.

Trautmann, A. M., H. Schell, K. R. Schmidt, K.-M. Mangold, A. Tiehm (2015): Electrochemical degradation of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in groundwater. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 71, 10/2015, S. 1569–1575.

Ulman, M., M. Sengl, W. Körner, K. Horst (2012): Medienübergreifende Umweltanalytik persistenter Perfluortenside und Bestimmung (semi)flüchtiger Vorläuferverbindungen, Augsburg.

Verordnung (EG) Nr. 1907/2006: Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006. Berichtigte Fassung vom 29. Mai 2007 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission. REACH-Verordnung.

Verordnung (EG) Nr. 850/2004: Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über persistente organische Schadstoffe und zur Änderung der Richtlinie 79/117/EWG. POP-Verordnung.

Verordnung (EU) 2017/1000: Verordnung der Kommission vom 13. Juni 2017 zur Änderung von Anhang XVII der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) betreffend Perfluorooctansäure (PFOA), ihre Salze und PFOA-Vorläuferverbindungen.

Verordnung (EU) Nr. 757/2010: Verordnung der Kommission vom 24. August 2010 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 850/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates über persistente organische Schadstoffe hinsichtlich der Anhänge I und III.

Vierke, L., A. Möller, S. Klitzke (2014): Transport of perfluoroalkyl acids in a water-saturated sediment column investigated under near-natural conditions. *Environmental Pollution* 186, 0/2014, S. 7–13.

Wagner, A., B. Raue, H.-J. Brauch, E. Worch, F. T. Lange (2013): Determination of adsorbable organic fluorine from aqueous environmental samples by adsorption to polystyrene-divinylbenzene based activated carbon and combustion ion chromatography. *Journal of Chromatography A* 1295, 0/2013, S. 82–89.

Wang, Y., P. Zhang (2011): Photocatalytic decomposition of perfluorooctanoic acid (PFOA) by TiO₂ in the presence of oxalic acid. *Journal of Hazardous Materials* 192, 3/2011, S. 1869–1875.

Wang, Z., I. T. Cousins, M. Scheringer, K. Hungerbühler (2013): Fluorinated alternatives to long-chain perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCAs), perfluoroalkane sulfonic acids (PFSA) and their potential precursors. *Environ. Int.* 60, 0/2013, S. 242–248.

Wasserhaushaltsgesetz (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. Juli. (WHG).

Willach, S., H.-J. Brauch, F. T. Lange (2016): Contribution of selected perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances to the adsorbable organically bound fluorine in German rivers and in a highly contaminated groundwater. *Chemosphere* 145, 2016, S. 342–350.

Xiao, F., K. J. Davidsavor, S. Park, M. Nakayama, B. R. Phillips (2012): Batch and column study. Sorption of perfluorinated surfactants from water and cosolvent systems by Amberlite XAD resins. *Journal of Colloid and Interface Science* 368, 1/2012, S. 505–511.

Xiao, H., B. Lv, G. Zhao, Y. Wang, M. Li, D. Li (2011): Hydrothermally Enhanced Electrochemical Oxidation of High Concentration Refractory Perfluorooctanoic Acid. *The Journal of Physical Chemistry A* 115, 47/2011, S. 13836–13841.

Yamashita, N., K. Kannan, S. Taniyasu, Y. Horii, G. Petrick, T. Gamo (2005): A global survey of perfluorinated acids in oceans. *Mar. Pollut. Bull.* 51, 8-12/2005, S. 658–668.

Yu, J., L. Lv, P. Lan, S. Zhang, B. Pan, W. Zhang (2012): Effect of effluent organic matter on the adsorption of perfluorinated compounds onto activated carbon. *Journal of Hazardous Materials* 225–226, 2012, S. 99–106.

Yu, Q., R. Zhang, S. Deng, J. Huang, G. Yu (2009): Sorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on activated carbons and resin. Kinetic and isotherm study. *Water Research* 43, 4/2009, S. 1150–1158.

Zareitalabad, P., J. Siemens, M. Hamer, W. Amelung (2013): Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) in surface waters, sediments, soils and wastewater – A review on concentrations and distribution coefficients. *Chemosphere* 91, 6/2013, S. 725–732.

Zhang, C., H. Yan, F. Li, X. Hu, Q. Zhou (2013): Sorption of short- and long-chain perfluoroalkyl surfactants on sewage sludges. *Journal of Hazardous Materials* 260, 0/2013, S. 689–699.

Zhao, D., J. Cheng, C. D. Vecitis, M. R. Hoffmann (2011): Sorption of perfluorochemicals to granular activated carbon in the presence of ultrasound. *J. Phys. Chem. A* 115, 11/2011, S. 2250–2257.

Zhou, Q., S. Deng, Q. Zhang, Q. Fan, J. Huang, G. Yu (2010): Sorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on activated sludge. *Chemosphere* 81, 4/2010, S. 453–458.

Zhuo, Q., S. Denga, B. Yangc, J. Huanga, B. Wangd, T. Zhanga, G. Yua (2012): Degradation of perfluorinated compounds on a boron-doped diamond electrode. *Electrochimica Acta* 77, 2012, S. 17–22.

7 Anhang

Tab. A1: Ergebnisse der Sonderuntersuchungen von 20 bayerischen Oberflächengewässern und Trinkwassertalsperren auf PFC in der Wasserphase im Jahr 2006.

Probenahmestelle	Probe- be- nahme- datum	PFBS* (ng/L)	PFHxA (ng/L)	PFHxS* (ng/L)	PFHpA (ng/L)	PFOA (ng/L)	PFOS (ng/L)	PFNA (ng/L)	PFDA (ng/L)	PFUnA (ng/L)	PFDoA (ng/L)	HPFHpA*§ (ng/L)	6:2 FTS* (ng/L)
Trinkwassertalsperre Mauthaus	18.9.06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Trinkwassertalsperre Frauenau	19.9.06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Alzkanal, Brücke oberhalb Mündung	15.9.06	< BG	1	< BG	2	17	1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	7
Alz, Alte Brücke Hohenwarth	15.9.06	11	500	< BG	250	7.500	1	34	24	7	1	110	5
Inn, Simbach Brücke	18.9.06	4	6	< BG	4	110	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Donau, Jochenstein	18.9.06	3	3	< BG	3	52	3	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Donau, Dillingen	19.9.06	< BG	< BG	< BG	< BG	1	3	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Donau, Bad Abbach	18.9.06	< BG	1	< BG	< BG	2	3	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Illerkanal bei Ludwigsfeld	19.9.06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	2	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Lechkanal, Kraftwerk Langweid	26.9.06	3	1	< BG	1	2	3	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	2
Paar, Brücke Groß-mehring	18.9.06	< BG	2	5	< BG	2	2	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Naab, Heitzenhofen	18.9.06	< BG	< BG	< BG	< BG	2	2	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Isar, Plattling	20.9.06	3	2	2	2	5	15	< BG	2	< BG	< BG	< BG	< BG
Schöllnacher Ohe, Außernzell	19.9.06	10	3	7	2	6	4	< BG	2	< BG	< BG	< BG	< BG
Main, Hallstadt	18.9.06	2	1	< BG	< BG	4	3	2	1	< BG	< BG	< BG	< BG
Main, Schweinfurt	18.9.06	4	1	< BG	< BG	3	11	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Main, Kahl a.M.	20.9.06	6	2	< BG	1	3	12	< BG	1	< BG	< BG	< BG	< BG
Regnitz, Hausen	27.9.06	7	2	< BG	1	6	42	< BG	2	< BG	< BG	< BG	< BG
Sächsische Saale, Joditz	18.9.06	13	3	< BG	3	14	2	7	8	1	< BG	< BG	< BG
Speichersee München, Ablauf Fisch- teiche	18.9.06	8	7	< BG	7	19	14	1	2	< BG	< BG	< BG	24
BG		2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2

* nicht vollständig validierte Parameter

§7H-Dodecafluorheptanoat

Tab. A2: Anzahl der Untersuchungen, Mittelwerte (MW) und Maximalkonzentration (Max) in der Wasserphase der 2007/08 und 2015 – 2017 untersuchten Fließgewässer.

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Altmühl, Dietfurt	PFBA				3	1,0	2
Altmühl, Dietfurt	PFBS	4	<BG	<BG	3	<BG	1
Altmühl, Dietfurt	PFPeA				3	<BG	<BG
Altmühl, Dietfurt	PFHxA	4	<BG	<BG	3	1,0	2
Altmühl, Dietfurt	PFHxS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Altmühl, Dietfurt	PFHpA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Altmühl, Dietfurt	PFOA	4	1,5	2,2	3	1,7	2
Altmühl, Dietfurt	PFOS	4	<BG	<BG	3	1,2	2
Altmühl, Dietfurt	PFNA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Altmühl, Dietfurt	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Altmühl, Dietfurt	PFOA				3	<BG	<BG
Altmühl, Dietfurt	PFOA				3	<BG	<BG
Altmühl, Dietfurt	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Altmühl, Dietfurt	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFBA				3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFBS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFPeA				3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFHxA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFHxS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFHpA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFOA	4	<BG	<BG	3	<BG	1
Ammer, Fischen	PFOS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFNA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFOA				3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	PFOA				3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Ammer, Fischen	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Amper, Inkofen	PFBA				4	<BG	<BG
Amper, Inkofen	PFBS	4	<BG	<BG	4	<BG	1
Amper, Inkofen	PFPeA				4	1,0	2
Amper, Inkofen	PFHxA	4	<BG	1,6	4	<BG	<BG
Amper, Inkofen	PFHxS	4	<BG	2,8	4	<BG	1
Amper, Inkofen	PFHpA	4	<BG	<BG	4	<BG	1
Amper, Inkofen	PFOA	4	3,4	7,4	4	1,5	2
Amper, Inkofen	PFOS	4	<BG	4	4	1,9	3
Amper, Inkofen	PFNA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Amper, Inkofen	PFDA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Amper, Inkofen	PFOA				3	<BG	<BG

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Amper, Inkofen	PFDoA				4	<BG	<BG
Amper, Inkofen	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Amper, Inkofen	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	PFBA				3	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	PFBS	4	<BG	1,1	3	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	PFPeA				3	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	PFHxA	4	<BG	1,3	3	<BG	1
Donau, Bad Abbach	PFHxS	4	<BG	2,1	3	<BG	1
Donau, Bad Abbach	PFHpA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	PFOA	4	<BG	2	3	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	PFOS	4	2,8	5	3	2,3	4
Donau, Bad Abbach	PFNA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	PFOA				2	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	PFDoA				2	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Donau, Bad Abbach	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	PFBA				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	PFBS				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	PFPeA				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	PFHxA				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	PFHxS				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	PFHpA				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	PFOA				5	1,4	2
Donau, Bittenbrunn	PFOS				5	2,1	4
Donau, Bittenbrunn	PFNA				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	PFDA				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	PFOA				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	PFDoA				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	4:2 FTS				5	<BG	<BG
Donau, Bittenbrunn	8:2 FTS				5	<BG	<BG
Donau, Böfinger Halde	PFBA				4	<BG	1
Donau, Böfinger Halde	PFBS	4	<BG	<BG	4	<BG	1
Donau, Böfinger Halde	PFPeA				4	<BG	1
Donau, Böfinger Halde	PFHxA	4	<BG	1	4	<BG	1
Donau, Böfinger Halde	PFHxS	4	<BG	1	4	<BG	<BG
Donau, Böfinger Halde	PFHpA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Donau, Böfinger Halde	PFOA	4	<BG	1,2	4	<BG	1
Donau, Böfinger Halde	PFOS	4	2,1	6	4	2,5	3
Donau, Böfinger Halde	PFNA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Donau, Böfinger Halde	PFDA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Donau, Böfingener Halde	PFOA				4	<BG	<BG
Donau, Böfingener Halde	PFDaA				3	<BG	<BG
Donau, Böfingener Halde	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Donau, Böfingener Halde	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	PFBA				3	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	PFBS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	PFPeA				3	<BG	1
Donau, Deggendorf	PFHxA	4	<BG	1,4	3	1,2	2
Donau, Deggendorf	PFHxS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	PFHpA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	PFOA	4	2,1	2,7	3	2,0	2
Donau, Deggendorf	PFOS	4	<BG	3	3	2,7	3
Donau, Deggendorf	PFNA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	PFOA				3	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	PFDaA				3	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	6:2 FTSA				3	<BG	<BG
Donau, Deggendorf	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Donau, Dillingen	PFBA				4	1,3	2
Donau, Dillingen	PFBS	4	<BG	<BG	4	<BG	1
Donau, Dillingen	PFPeA				4	<BG	1
Donau, Dillingen	PFHxA	4	<BG	1,1	3	<BG	<BG
Donau, Dillingen	PFHxS	4	<BG	1,3	4	<BG	1
Donau, Dillingen	PFHpA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Donau, Dillingen	PFOA	4	1,6	1,9	4	<BG	1
Donau, Dillingen	PFOS	4	2,4	4	4	1,9	3
Donau, Dillingen	PFNA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Donau, Dillingen	PFDA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Donau, Dillingen	PFOA				3	<BG	<BG
Donau, Dillingen	PFDaA				4	<BG	<BG
Donau, Dillingen	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Donau, Dillingen	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Donau, Jochenstein	PFBA				5	2,0	4
Donau, Jochenstein	PFBS	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Donau, Jochenstein	PFPeA				5	3,2	4
Donau, Jochenstein	PFHxA	4	<BG	2,1	5	1,1	2
Donau, Jochenstein	PFHxS	4	<BG	<BG	5	<BG	1
Donau, Jochenstein	PFHpA	4	<BG	1,5	5	<BG	<BG
Donau, Jochenstein	PFOA	4	18,7	31	5	3,4	5
Donau, Jochenstein	PFOS	4	<BG	3	5	1,6	4

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Donau, Jochenstein	PFNA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Donau, Jochenstein	PFDA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Donau, Jochenstein	PFUnA				4	<BG	<BG
Donau, Jochenstein	PFDoA				3	<BG	<BG
Donau, Jochenstein	4:2 FTS				5	<BG	<BG
Donau, Jochenstein	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Donau, Kelheim	PFBS	4	<BG	1,4			
Donau, Kelheim	PFHxA	4	<BG	1,3			
Donau, Kelheim	PFHxS	4	<BG	1,7			
Donau, Kelheim	PFHpA	4	<BG	<BG			
Donau, Kelheim	PFOA	4	<BG	2,1			
Donau, Kelheim	PFOS	4	<BG	2			
Donau, Kelheim	PFNA	4	<BG	<BG			
Donau, Kelheim	PFDA	4	<BG	<BG			
Donau, Niederalteich	PFBA				5	<BG	1
Donau, Niederalteich	PFBS	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Donau, Niederalteich	PFPeA				5	<BG	1
Donau, Niederalteich	PFHxA	4	<BG	1,1	5	<BG	1
Donau, Niederalteich	PFHxS	4	<BG	1,1	5	<BG	1
Donau, Niederalteich	PFHpA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Donau, Niederalteich	PFOA	4	2,4	4,1	5	1,2	2
Donau, Niederalteich	PFOS	4	3,3	6	5	2,4	3
Donau, Niederalteich	PFNA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Donau, Niederalteich	PFDA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Donau, Niederalteich	PFUnA				5	<BG	<BG
Donau, Niederalteich	PFDoA				3	<BG	<BG
Donau, Niederalteich	4:2 FTS				5	<BG	<BG
Donau, Niederalteich	8:2 FTS				5	<BG	<BG
Donau, Schäfstall	PFBA				4	<BG	2
Donau, Schäfstall	PFBS				4	<BG	1
Donau, Schäfstall	PFPeA				4	1,1	2
Donau, Schäfstall	PFHxA				4	1,4	2
Donau, Schäfstall	PFHxS				4	<BG	<BG
Donau, Schäfstall	PFHpA				4	<BG	<BG
Donau, Schäfstall	PFOA				4	1,8	2
Donau, Schäfstall	PFOS				4	7,5	13
Donau, Schäfstall	PFNA				4	1,3	3
Donau, Schäfstall	PFDA				4	<BG	1
Donau, Schäfstall	PFUnA				4	<BG	<BG
Donau, Schäfstall	PFDoA				4	<BG	<BG
Donau, Schäfstall	4:2 FTS				4	<BG	<BG

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Donau, Schäfstall	6:2 FTSA				3	<BG	<BG
Donau, Schäfstall	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Fränkische Saale, Gemünden	PFBA				4	1,3	2
Fränkische Saale, Gemünden	PFBS	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Fränkische Saale, Gemünden	PFPeA				4	<BG	1
Fränkische Saale, Gemünden	PFHxA	4	<BG	<BG	4	1,0	2
Fränkische Saale, Gemünden	PFHxS	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Fränkische Saale, Gemünden	PFHpA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Fränkische Saale, Gemünden	PFOA	4	2,0	3,4	4	1,5	3
Fränkische Saale, Gemünden	PFOS	4	<BG	<BG	4	1,3	2
Fränkische Saale, Gemünden	PFNA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Fränkische Saale, Gemünden	PFDA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Fränkische Saale, Gemünden	PFUnA				4	<BG	<BG
Fränkische Saale, Gemünden	PFDoA				4	<BG	<BG
Fränkische Saale, Gemünden	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Fränkische Saale, Gemünden	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Iller, Wiblingen	PFBA				4	<BG	1
Iller, Wiblingen	PFBS	4	<BG	<BG	4	<BG	1
Iller, Wiblingen	PFPeA				4	<BG	<BG
Iller, Wiblingen	PFHxA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Iller, Wiblingen	PFHxS	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Iller, Wiblingen	PFHpA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Iller, Wiblingen	PFOA	4	<BG	1	4	<BG	1
Iller, Wiblingen	PFOS	4	<BG	3	4	1,0	2
Iller, Wiblingen	PFNA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Iller, Wiblingen	PFDA	4	<BG	2	4	<BG	<BG
Iller, Wiblingen	PFUnA				4	<BG	<BG
Iller, Wiblingen	PFDoA				3	<BG	<BG
Iller, Wiblingen	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Iller, Wiblingen	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	PFBA				3	<BG	1
Ilz, Kaltenecke	PFBS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	PFPeA				3	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	PFHxA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Ilz, Kaltenecke	PFHxS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	PFHpA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	PFOA	4	<BG	2	3	<BG	1
Ilz, Kaltenecke	PFOS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	PFNA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	PFUnA				3	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	PFDoA				3	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Ilz, Kaltenecke	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	PFBA				7	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	PFBS	4	<BG	2,1	7	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	PFPeA				7	<BG	1
Inn, Eschelbach	PFHxA	4	<BG	<BG	7	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	PFHxS	4	<BG	<BG	7	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	PFHpA	4	<BG	<BG	7	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	PFOA	4	<BG	1,1	7	<BG	1
Inn, Eschelbach	PFOS	4	<BG	<BG	7	1,7	9
Inn, Eschelbach	PFNA	4	<BG	<BG	7	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	PFDA	4	<BG	<BG	7	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	PFUnA				7	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	PFDoA				7	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	4:2 FTS				7	<BG	<BG
Inn, Eschelbach	8:2 FTS				7	<BG	<BG
Inn, Kirchdorf	PFBA				4	<BG	1
Inn, Kirchdorf	PFBS	4	<BG	1,9	4	<BG	<BG
Inn, Kirchdorf	PFPeA				3	<BG	1
Inn, Kirchdorf	PFHxA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Inn, Kirchdorf	PFHxS	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Inn, Kirchdorf	PFHpA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Inn, Kirchdorf	PFOA	4	<BG	<BG	2	1,3	2
Inn, Kirchdorf	PFOS	4	<BG	<BG	3	1,3	3
Inn, Kirchdorf	PFNA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Inn, Kirchdorf	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Inn, Kirchdorf	PFUnA				3	<BG	<BG
Inn, Kirchdorf	PFDoA				4	<BG	<BG
Inn, Kirchdorf	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Inn, Kirchdorf	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Inn, Passau	PFBA				3	1,8	3
Inn, Passau	PFBS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Inn, Passau	PFPeA				3	2,2	5

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Inn, Passau	PFHxA	4	2,4	3,9	3	1,0	2
Inn, Passau	PFHxS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Inn, Passau	PFHpA	4	<BG	3,4	3	<BG	<BG
Inn, Passau	PFOA	4	43,0	65	3	4,7	7
Inn, Passau	PFOS	4	<BG	<BG	3	1,0	2
Inn, Passau	PFNA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Inn, Passau	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Inn, Passau	PFUnA				3	<BG	<BG
Inn, Passau	PFDaA				3	<BG	<BG
Inn, Passau	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Inn, Passau	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Inn, Simbach	PFBA				5	2,8	7
Inn, Simbach	PFBS	4	<BG	<BG	5	<BG	1
Inn, Simbach	PFPeA				5	6,2	7
Inn, Simbach	PFHxA	4	<BG	2,8	5	1,4	3
Inn, Simbach	PFHxS	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Inn, Simbach	PFHpA	4	<BG	2,3	5	<BG	1
Inn, Simbach	PFOA	4	43,2	80	5	5,4	7
Inn, Simbach	PFOS	4	<BG	<BG	5	1,2	4
Inn, Simbach	PFNA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Inn, Simbach	PFDA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Inn, Simbach	PFUnA				4	<BG	<BG
Inn, Simbach	PFDaA				4	<BG	<BG
Inn, Simbach	4:2 FTS				5	<BG	<BG
Inn, Simbach	8:2 FTS				5	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFBA				3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFBS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFPeA				3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFHxA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFHxS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFHpA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFOA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFOS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFNA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFUnA				3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	PFDaA				3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Isar, Mittenwald	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Isar, Moosburg	PFBA				4	1,9	3
Isar, Moosburg	PFBS	4	4,0	11	4	<BG	<BG

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Isar, Moosburg	PFPeA				4	2,8	4
Isar, Moosburg	PFHxA	4	<BG	2,8	4	2,5	3
Isar, Moosburg	PFHxS	4	<BG	3,4	4	<BG	1
Isar, Moosburg	PFHpA	4	<BG	1,2	4	<BG	1
Isar, Moosburg	PFOA	4	5,1	7,3	4	3,0	5
Isar, Moosburg	PFOS	4	4,5	11	4	4,3	5
Isar, Moosburg	PFNA	4	<BG	1,2	4	<BG	<BG
Isar, Moosburg	PFDA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Isar, Moosburg	PFUnA				3	<BG	<BG
Isar, Moosburg	PFDoA				4	<BG	<BG
Isar, Moosburg	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Isar, Moosburg	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Isar, Plattling	PFBA				5	1,1	2
Isar, Plattling	PFBS	4	<BG	1,1	5	<BG	1
Isar, Plattling	PFPeA				5	1,1	2
Isar, Plattling	PFHxA	4	<BG	2	5	1,4	3
Isar, Plattling	PFHxS	4	<BG	1,6	5	<BG	1
Isar, Plattling	PFHpA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Isar, Plattling	PFOA	4	4,4	4,7	5	2,4	3
Isar, Plattling	PFOS	4	4,5	8	5	3,8	6
Isar, Plattling	PFNA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Isar, Plattling	PFDA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Isar, Plattling	PFUnA				5	<BG	<BG
Isar, Plattling	PFDoA				3	<BG	<BG
Isar, Plattling	4:2 FTS				5	<BG	<BG
Isar, Plattling	8:2 FTS				5	<BG	<BG
Lech, Augsburg	PFBA				4	<BG	1
Lech, Augsburg	PFBS	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Lech, Augsburg	PFPeA				4	<BG	<BG
Lech, Augsburg	PFHxA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Lech, Augsburg	PFHxS	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Lech, Augsburg	PFHpA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Lech, Augsburg	PFOA	4	<BG	1,2	4	<BG	1
Lech, Augsburg	PFOS	4	<BG	<BG	4	<BG	1
Lech, Augsburg	PFNA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Lech, Augsburg	PFDA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Lech, Augsburg	PFUnA				4	<BG	<BG
Lech, Augsburg	PFDoA			<BG	3	<BG	<BG
Lech, Augsburg	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Lech, Augsburg	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Lech, Feldheim	PFBA				4	<BG	1

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Lech, Feldheim	PFBS	4	<BG	1,9	4	<BG	<BG
Lech, Feldheim	PFPeA				4	<BG	<BG
Lech, Feldheim	PFHxA	4	<BG	<BG	3	<BG	1
Lech, Feldheim	PFHxS	4	<BG	<BG	4	<BG	1
Lech, Feldheim	PFHpA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Lech, Feldheim	PFOA	4	<BG	1,8	4	<BG	1
Lech, Feldheim	PFOS	4	2,9	8	4	2,0	3
Lech, Feldheim	PFNA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Lech, Feldheim	PFDA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Lech, Feldheim	PFUnA				4	<BG	<BG
Lech, Feldheim	PFDoA				3	<BG	<BG
Lech, Feldheim	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Lech, Feldheim	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Main, Erlabrunn	PFBA				4	1,5	3
Main, Erlabrunn	PFBS	4	3,0	6,1	4	1,3	2
Main, Erlabrunn	PFPeA				4	2,4	5
Main, Erlabrunn	PFHxA	4	<BG	2,5	4	2,4	6
Main, Erlabrunn	PFHxS	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Main, Erlabrunn	PFHpA	4	<BG	<BG	4	<BG	2
Main, Erlabrunn	PFOA	4	3,5	5,3	4	2,5	5
Main, Erlabrunn	PFOS	4	7,5	11	4	4,3	6
Main, Erlabrunn	PFNA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Main, Erlabrunn	PFDA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Main, Erlabrunn	PFUnA				4	<BG	<BG
Main, Erlabrunn	PFDoA				4	<BG	<BG
Main, Erlabrunn	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Main, Erlabrunn	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Main, Hallstadt	PFBA				3	1,0	2
Main, Hallstadt	PFBS	4	<BG	<BG	3	5,7	16
Main, Hallstadt	PFPeA				3	3,0	4
Main, Hallstadt	PFHxA	4	<BG	2,8	3	4,0	4
Main, Hallstadt	PFHxS	4	2,1	5	3	<BG	<BG
Main, Hallstadt	PFHpA	4	<BG	<BG	3	1,0	2
Main, Hallstadt	PFOA	4	3,7	7,1	3	3,0	5
Main, Hallstadt	PFOS	4	5,3	9	3	1,5	2
Main, Hallstadt	PFNA	4	<BG	2,9	3	1,2	2
Main, Hallstadt	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Main, Hallstadt	PFUnA				3	<BG	<BG
Main, Hallstadt	PFDoA				3	<BG	<BG
Main, Hallstadt	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Main, Hallstadt	8:2 FTS				3	<BG	<BG

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Main, Kahl	PFBA				38	1,2	4
Main, Kahl	PFBS	4	<BG	1,3	38	<BG	2
Main, Kahl	PFPeA				38	1,4	4
Main, Kahl	PFHxA	4	<BG	2	38	1,7	5
Main, Kahl	PFHxS	4	<BG	<BG	38	<BG	1
Main, Kahl	PFHpA	4	<BG	<BG	38	<BG	2
Main, Kahl	PFOA	4	2,8	4,5	38	2,1	4
Main, Kahl	PFOS	4	7,3	10	38	3,1	6
Main, Kahl	PFNA	4	<BG	<BG	38	<BG	1
Main, Kahl	PFDA	4	<BG	<BG	38	<BG	<BG
Main, Kahl	PFUnA				33	<BG	<BG
Main, Kahl	PFDoA				37	<BG	1
Main, Kahl	4:2 FTS				38	<BG	<BG
Main, Kahl	6:2 FTSA				15	2,4	24
Main, Kahl	8:2 FTS				36	<BG	1
Mindel, Offingen	PFBA				4	1,0	2
Mindel, Offingen	PFBS	4	<BG	<BG	4	<BG	1
Mindel, Offingen	PFPeA				4	1,0	2
Mindel, Offingen	PFHxA	4	<BG	1,7	3	<BG	1
Mindel, Offingen	PFHxS	4	<BG	<BG	4	<BG	1
Mindel, Offingen	PFHpA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Mindel, Offingen	PFOA	4	3,4	4,2	4	1,0	2
Mindel, Offingen	PFOS	4	<BG	<BG	4	1,0	2
Mindel, Offingen	PFNA	4	<BG	1,8	4	<BG	<BG
Mindel, Offingen	PFDA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Mindel, Offingen	PFUnA				3	<BG	<BG
Mindel, Offingen	PFDoA				4	<BG	<BG
Mindel, Offingen	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Mindel, Offingen	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Naab, Heitzenhofen	PFBA				3	1,0	2
Naab, Heitzenhofen	PFBS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Naab, Heitzenhofen	PFPeA				3	1,0	2
Naab, Heitzenhofen	PFHxA	4	4,8	17	3	1,3	3
Naab, Heitzenhofen	PFHxS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Naab, Heitzenhofen	PFHpA	4	<BG	3,5	3	<BG	1
Naab, Heitzenhofen	PFOA	4	3,6	11	3	2,7	4
Naab, Heitzenhofen	PFOS	4	<BG	3	3	1,5	3
Naab, Heitzenhofen	PFNA	4	<BG	2,5	3	<BG	<BG
Naab, Heitzenhofen	PFDA	4	<BG	2,9	3	<BG	<BG
Naab, Heitzenhofen	PFUnA				3	<BG	<BG
Naab, Heitzenhofen	PFDoA				3	<BG	<BG

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Naab, Heitzenhofen	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Naab, Heitzenhofen	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Paar, Grossmehring	PFBA				3	1,0	2
Paar, Grossmehring	PFBS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Paar, Grossmehring	PFPeA				3	<BG	<BG
Paar, Grossmehring	PFHxA	4	2,0	2,9	3	1,0	2
Paar, Grossmehring	PFHxS	4	4,0	5,7	3	<BG	<BG
Paar, Grossmehring	PFHpA	4	<BG	<BG	3	<BG	1
Paar, Grossmehring	PFOA	4	2,2	3,3	3	1,7	2
Paar, Grossmehring	PFOS	4	4,8	8	3	2,3	3
Paar, Grossmehring	PFNA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Paar, Grossmehring	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Paar, Grossmehring	PFUnA				3	<BG	<BG
Paar, Grossmehring	PFDoA				3	<BG	<BG
Paar, Grossmehring	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Paar, Grossmehring	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Regen, Marienthal	PFBA				4	<BG	2
Regen, Marienthal	PFBS	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Regen, Marienthal	PFPeA				4	<BG	1
Regen, Marienthal	PFHxA	4	3,4	5,9	4	<BG	2
Regen, Marienthal	PFHxS	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Regen, Marienthal	PFHpA	4	<BG	2	4	<BG	<BG
Regen, Marienthal	PFOA	4	2,8	4,7	4	2,1	4
Regen, Marienthal	PFOS	4	<BG	2	4	1,8	4
Regen, Marienthal	PFNA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Regen, Marienthal	PFDA	4	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Regen, Marienthal	PFUnA				4	<BG	<BG
Regen, Marienthal	PFDoA				4	<BG	<BG
Regen, Marienthal	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Regen, Marienthal	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Regnitz, Hausen	PFBA				3	<BG	1
Regnitz, Hausen	PFBS	4	4,0	4,4	3	2,3	5
Regnitz, Hausen	PFPeA				3	1,5	2
Regnitz, Hausen	PFHxA	4	<BG	2,2	3	2,3	3
Regnitz, Hausen	PFHxS	4	2,1	3,4	3	<BG	<BG
Regnitz, Hausen	PFHpA	4	<BG	<BG	3	<BG	1
Regnitz, Hausen	PFOA	4	3,8	4,6	3	2,3	3
Regnitz, Hausen	PFOS	4	31,5	39	3	8,0	10
Regnitz, Hausen	PFNA	4	<BG	<BG	3	<BG	1
Regnitz, Hausen	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Regnitz, Hausen	PFUnA				3	<BG	<BG

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Regnitz, Hausen	PFDoA				3	<BG	<BG
Regnitz, Hausen	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Regnitz, Hausen	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Sächsische Saale, Joditz	PFBA				4	<BG	2
Sächsische Saale, Joditz	PFBS	5	4,3	7,1	4	1,6	4
Sächsische Saale, Joditz	PFPeA				4	<BG	2
Sächsische Saale, Joditz	PFHxA	5	3,8	7,4	4	7,6	13
Sächsische Saale, Joditz	PFHxS	5	<BG	<BG	4	<BG	<BG
Sächsische Saale, Joditz	PFHpA	5	<BG	1,4	4	<BG	2
Sächsische Saale, Joditz	PFOA	5	13,0	18	4	8,0	18
Sächsische Saale, Joditz	PFOS	5	<BG	1	4	2,3	4
Sächsische Saale, Joditz	PFNA	5	3,6	4,9	4	1,0	2
Sächsische Saale, Joditz	PFDA	5	7,7	12	4	1,5	3
Sächsische Saale, Joditz	PFUnA				4	<BG	<BG
Sächsische Saale, Joditz	PFUnA				4		
Sächsische Saale, Joditz	PFDoA				3	<BG	<BG
Sächsische Saale, Joditz	4:2 FTS				4	<BG	<BG
Sächsische Saale, Joditz	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Salzach, Laufen	PFBA				7	1,0	4
Salzach, Laufen	PFBS	4	<BG	<BG	7	<BG	<BG
Salzach, Laufen	PFPeA				7	<BG	1
Salzach, Laufen	PFHxA	4	<BG	<BG	7	<BG	<BG
Salzach, Laufen	PFHxS	4	<BG	<BG	7	<BG	<BG
Salzach, Laufen	PFHpA	4	<BG	<BG	7	<BG	<BG
Salzach, Laufen	PFOA	4	<BG	<BG	6	<BG	<BG
Salzach, Laufen	PFOS	4	<BG	2	7	<BG	<BG
Salzach, Laufen	PFNA	4	<BG	<BG	7	<BG	<BG
Salzach, Laufen	PFDA	4	<BG	<BG	6	<BG	<BG
Salzach, Laufen	PFUnA				7	<BG	<BG
Salzach, Laufen	PFDoA				6	<BG	<BG
Salzach, Laufen	4:2 FTS				7	<BG	<BG
Salzach, Laufen	8:2 FTS				7	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFBA				3	<BG	<BG

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Tiroler Achen, Staudach	PFBS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFPeA				3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFHxA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFHxS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFHpA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFOA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFOS	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFNA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFDA	4	<BG	<BG	3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFUnA				3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	PFDoA				3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	4:2 FTS				3	<BG	<BG
Tiroler Achen, Staudach	8:2 FTS				3	<BG	<BG
Vils, Grafenmühle	PFBA				5	1,3	3
Vils, Grafenmühle	PFBS	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Vils, Grafenmühle	PFPeA				4	<BG	1
Vils, Grafenmühle	PFHxA	4	<BG	1,2	4	<BG	<BG
Vils, Grafenmühle	PFHxS	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Vils, Grafenmühle	PFHpA	4	<BG	1	5	<BG	<BG
Vils, Grafenmühle	PFOA	4	2,5	3	5	1,2	2
Vils, Grafenmühle	PFOS	4	<BG	3	5	1,0	2
Vils, Grafenmühle	PFNA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Vils, Grafenmühle	PFDA	4	<BG	<BG	5	<BG	<BG
Vils, Grafenmühle	PFUnA				4	<BG	<BG
Vils, Grafenmühle	PFDoA				4	<BG	<BG
Vils, Grafenmühle	4:2 FTS				5	<BG	<BG
Vils, Grafenmühle	8:2 FTS				4	<BG	<BG
Wertach, Ettringen	PFBA				2	1,3	2
Wertach, Ettringen	PFBS	4	<BG	1,4	2	<BG	<BG
Wertach, Ettringen	PFPeA				2	1,8	3
Wertach, Ettringen	PFHxA	4	<BG	1,6	2	1,8	3
Wertach, Ettringen	PFHxS	4	<BG	1,5	2	<BG	<BG
Wertach, Ettringen	PFHpA	4	<BG	<BG	2	1,3	2
Wertach, Ettringen	PFOA	4	1,1	1,4	2	1,5	2

Gewässer	Substanz	2007/08			2015-2017		
		Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)	Anzahl (n)	MW (ng/L)	Max (ng/L)
Wertach, Ettringen	PFOS	4	10,0	29	2	<BG	1
Wertach, Ettringen	PFNA	4	1,3	3,5	2	<BG	1
Wertach, Ettringen	PFDA	4	<BG	<BG	2	<BG	<BG
Wertach, Ettringen	PFUnA				2	<BG	<BG
Wertach, Ettringen	PFDoA				2	<BG	<BG
Wertach, Ettringen	4:2 FTS				2	<BG	<BG
Wertach, Ettringen	8:2 FTS				2	<BG	<BG
Wörnitz, Offingen	PFBS	4	<BG	<BG			
Wörnitz, Offingen	PFHxA	4	<BG	1,7			
Wörnitz, Offingen	PFHxS	4	<BG	<BG			
Wörnitz, Offingen	PFHpA	4	<BG	1,2			
Wörnitz, Offingen	PFOA	4	2,4	4,2			
Wörnitz, Offingen	PFOS	4	<BG	<BG			
Wörnitz, Offingen	PFNA	4	<BG	<BG			
Wörnitz, Offingen	PFDA	4	<BG	<BG			

Tab. A3: Ergebnisse des bayerischen Fischschadstoffmonitorings aus den Jahren 2012-2016. Die PFC-Analytik erfolgte in homogenen Mischproben aus der Muskulatur von mehreren Fischen einer Art, Messstelle und Befischung.

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Alpsee bei Schwangau	15.08.2015	Hecht	10	PFOA	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	15.08.2015	Hecht	10	PFOS	0,74
Alpsee bei Schwangau	15.08.2015	Hecht	10	PFNA	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	15.08.2015	Hecht	10	PFDA	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	15.08.2015	Hecht	10	PFUnA	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	15.08.2015	Hecht	10	PFDoA	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	15.08.2015	Hecht	10	8:2 FTS	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	27.08.2014	Hecht	10	PFOA	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	27.08.2014	Hecht	10	PFOS	0,6
Alpsee bei Schwangau	27.08.2014	Hecht	10	PFNA	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	27.08.2014	Hecht	10	PFDA	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	27.08.2014	Hecht	10	PFUnA	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	27.08.2014	Hecht	10	PFDoA	< 0,5
Alpsee bei Schwangau	27.08.2014	Hecht	10	8:2 FTS	< 0,5
Altmühl, Grögling	14.07.2015	Aitel	9	PFOA	< 0,5
Altmühl, Grögling	14.07.2015	Aitel	9	PFOS	2,1
Altmühl, Grögling	14.07.2015	Aitel	9	PFNA	< 0,5
Altmühl, Grögling	14.07.2015	Aitel	9	PFDA	0,69
Altmühl, Grögling	14.07.2015	Aitel	9	PFUnA	< 0,5

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Altmühl, Grögling	14.07.2015	Aitel	9	PFD ₀ A	< 0,5
Altmühl, Grögling	14.07.2015	Aitel	9	8:2 FTS	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 1	5	PFOA	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 1	5	PFOS	1,7
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 1	5	PFNA	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 1	5	PFDA	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 1	5	PFUnA	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 1	5	PFD ₀ A	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 1	5	8:2 FTS	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 2	5	PFOA	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 2	5	PFOS	1
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 2	5	PFNA	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 2	5	PFDA	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 2	5	PFUnA	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 2	5	PFD ₀ A	< 0,5
Altmühlsee	18.11.2013	Hecht Pool 2	5	8:2 FTS	< 0,5
Alz, Hohenwart	30.06.2016	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Alz, Hohenwart	30.06.2016	Aitel	10	PFOS	1,5
Alz, Hohenwart	30.06.2016	Aitel	10	PFNA	0,89
Alz, Hohenwart	30.06.2016	Aitel	10	PFDA	23
Alz, Hohenwart	30.06.2016	Aitel	10	PFUnA	21
Alz, Hohenwart	30.06.2016	Aitel	10	PFD ₀ A	23
Alz, Hohenwart	30.06.2016	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Alz, Hohenwart	20.09.2012	Aitel	8	PFOA	< 0,5
Alz, Hohenwart	20.09.2012	Aitel	8	PFOS	1
Alz, Hohenwart	20.09.2012	Aitel	8	PFNA	2,1
Alz, Hohenwart	20.09.2012	Aitel	8	PFDA	32
Alz, Hohenwart	20.09.2012	Aitel	8	PFUnA	20
Alz, Hohenwart	20.09.2012	Aitel	8	PFD ₀ A	25
Alz, Hohenwart	20.09.2012	Aitel	8	8:2 FTS	0,53
Amper, Inkofen	15.09.2015	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Amper, Inkofen	15.09.2015	Aitel	10	PFOS	7,4
Amper, Inkofen	15.09.2015	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Amper, Inkofen	15.09.2015	Aitel	10	PFDA	0,57
Amper, Inkofen	15.09.2015	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Amper, Inkofen	15.09.2015	Aitel	10	PFD ₀ A	< 0,5
Amper, Inkofen	15.09.2015	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Bodensee Obersee	02.12.2014	Hecht	9	PFOA	< 0,5
Bodensee Obersee	02.12.2014	Hecht	9	PFOS	7,4

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Bodensee Obersee	02.12.2014	Hecht	9	PFNA	< 0,5
Bodensee Obersee	02.12.2014	Hecht	9	PFDA	0,6
Bodensee Obersee	02.12.2014	Hecht	9	PFUnA	< 0,5
Bodensee Obersee	02.12.2014	Hecht	9	PFDoA	< 0,5
Bodensee Obersee	02.12.2014	Hecht	9	8:2 FTS	< 0,5
Brombach, Mandlesmühle	20.11.2012	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Brombach, Mandlesmühle	20.11.2012	Aitel	10	PFOS	4,9
Brombach, Mandlesmühle	20.11.2012	Aitel	10	PFNA	0,7
Brombach, Mandlesmühle	20.11.2012	Aitel	10	PFDA	1,8
Brombach, Mandlesmühle	20.11.2012	Aitel	10	PFUnA	1,4
Brombach, Mandlesmühle	20.11.2012	Aitel	10	PFDoA	0,5
Brombach, Mandlesmühle	20.11.2012	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Donau, Bad Abbach	25.09.2012	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Donau, Bad Abbach	25.09.2012	Aitel	10	PFOS	6
Donau, Bad Abbach	25.09.2012	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Donau, Bad Abbach	25.09.2012	Aitel	10	PFDA	1,3
Donau, Bad Abbach	25.09.2012	Aitel	10	PFUnA	2,2
Donau, Bad Abbach	25.09.2012	Aitel	10	PFDoA	1,4
Donau, Bad Abbach	25.09.2012	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Donau, Bittenbrunn	17.10.2016	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Donau, Bittenbrunn	17.10.2016	Aitel	10	PFOS	2,4
Donau, Bittenbrunn	17.10.2016	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Donau, Bittenbrunn	17.10.2016	Aitel	10	PFDA	< 0,5
Donau, Bittenbrunn	17.10.2016	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Donau, Bittenbrunn	17.10.2016	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Donau, Bittenbrunn	17.10.2016	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Donau, Böfinger Halde	01.07.2015	Aitel	7	PFOA	< 0,5
Donau, Böfinger Halde	01.07.2015	Aitel	7	PFOS	4,9
Donau, Böfinger Halde	01.07.2015	Aitel	7	PFNA	< 0,5
Donau, Böfinger Halde	01.07.2015	Aitel	7	PFDA	0,52
Donau, Böfinger Halde	01.07.2015	Aitel	7	PFUnA	< 0,5
Donau, Böfinger Halde	01.07.2015	Aitel	7	PFDoA	< 0,5
Donau, Böfinger Halde	01.07.2015	Aitel	7	8:2 FTS	< 0,5
Donau, Deggendorf	16.07.2015	Aitel	4	PFOA	< 0,5
Donau, Deggendorf	16.07.2015	Aitel	4	PFOS	4,3
Donau, Deggendorf	16.07.2015	Aitel	4	PFNA	< 0,5
Donau, Deggendorf	16.07.2015	Aitel	4	PFDA	0,76
Donau, Deggendorf	16.07.2015	Aitel	4	PFUnA	< 0,5
Donau, Deggendorf	16.07.2015	Aitel	4	PFDoA	0,65

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Donau, Deggendorf	16.07.2015	Aitel	4	8:2 FTS	< 0,5
Donau, Dillingen	20.07.2016	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Donau, Dillingen	20.07.2016	Aitel	10	PFOS	6,4
Donau, Dillingen	20.07.2016	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Donau, Dillingen	20.07.2016	Aitel	10	PFDA	0,58
Donau, Dillingen	20.07.2016	Aitel	10	PFUnA	0,65
Donau, Dillingen	20.07.2016	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Donau, Dillingen	20.07.2016	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Donau, Dillingen	30.06.2015	Aitel	12	PFOA	< 0,5
Donau, Dillingen	30.06.2015	Aitel	12	PFOS	19
Donau, Dillingen	30.06.2015	Aitel	12	PFNA	0,54
Donau, Dillingen	30.06.2015	Aitel	12	PFDA	1,1
Donau, Dillingen	30.06.2015	Aitel	12	PFUnA	1
Donau, Dillingen	30.06.2015	Aitel	12	PFDoA	0,81
Donau, Dillingen	30.06.2015	Aitel	12	8:2 FTS	< 0,5
Donau, Kelheim	10.09.2015	Aitel	11	PFOA	< 0,5
Donau, Kelheim	10.09.2015	Aitel	11	PFOS	8,5
Donau, Kelheim	10.09.2015	Aitel	11	PFNA	< 0,5
Donau, Kelheim	10.09.2015	Aitel	11	PFDA	1,2
Donau, Kelheim	10.09.2015	Aitel	11	PFUnA	1
Donau, Kelheim	10.09.2015	Aitel	11	PFDoA	1
Donau, Kelheim	10.09.2015	Aitel	11	8:2 FTS	< 0,5
Donau, Lechsend	06.08.2015	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Donau, Lechsend	06.08.2015	Aitel	10	PFOS	6,9
Donau, Lechsend	06.08.2015	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Donau, Lechsend	06.08.2015	Aitel	10	PFDA	0,53
Donau, Lechsend	06.08.2015	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Donau, Lechsend	06.08.2015	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Donau, Lechsend	06.08.2015	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Donau, Niederalteich	15.09.2015	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Donau, Niederalteich	15.09.2015	Aitel	10	PFOS	5,7
Donau, Niederalteich	15.09.2015	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Donau, Niederalteich	15.09.2015	Aitel	10	PFDA	1,1
Donau, Niederalteich	15.09.2015	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Donau, Niederalteich	15.09.2015	Aitel	10	PFDoA	0,62
Donau, Niederalteich	15.09.2015	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Eger , Fischern	19.09.2012	Aitel	5	PFOA	< 0,5
Eger , Fischern	19.09.2012	Aitel	5	PFOS	1,9
Eger , Fischern	19.09.2012	Aitel	5	PFNA	< 0,5

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Eger , Fischern	19.09.2012	Aitel	5	PFDA	1,4
Eger , Fischern	19.09.2012	Aitel	5	PFUnA	3
Eger , Fischern	19.09.2012	Aitel	5	PFDoA	0,64
Eger , Fischern	19.09.2012	Aitel	5	8:2 FTS	< 0,5
Eger, Egermühle	05.09.2016	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Eger, Egermühle	05.09.2016	Aitel	10	PFOS	1,5
Eger, Egermühle	05.09.2016	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Eger, Egermühle	05.09.2016	Aitel	10	PFDA	0,77
Eger, Egermühle	05.09.2016	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Eger, Egermühle	05.09.2016	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Eger, Egermühle	05.09.2016	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	4	PFOA	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	4	PFOS	1,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	4	PFNA	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	4	PFDA	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	4	PFUnA	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	4	PFDoA	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	4	8:2 FTS	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	7	PFOA	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	7	PFOS	3
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	7	PFNA	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	7	PFDA	0,8
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	7	PFUnA	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	7	PFDoA	< 0,5
Eger, Egermühle	17.10.2014	Aitel	7	8:2 FTS	< 0,5
Eibsee	11.09.2016	Seeforelle	3	PFOA	< 0,5
Eibsee	11.09.2016	Seeforelle	3	PFOS	0,53
Eibsee	11.09.2016	Seeforelle	3	PFNA	< 0,5
Eibsee	11.09.2016	Seeforelle	3	PFDA	< 0,5
Eibsee	11.09.2016	Seeforelle	3	PFUnA	0,65
Eibsee	11.09.2016	Seeforelle	3	8:2 FTS	< 0,5
Erf, Bürgstadt	02.07.2015	Bachforelle	9	PFOA	< 0,5
Erf, Bürgstadt	02.07.2015	Bachforelle	9	PFOS	3,1
Erf, Bürgstadt	02.07.2015	Bachforelle	9	PFNA	< 0,5
Erf, Bürgstadt	02.07.2015	Bachforelle	9	PFDA	0,51
Erf, Bürgstadt	02.07.2015	Bachforelle	9	PFUnA	< 0,5
Erf, Bürgstadt	02.07.2015	Bachforelle	9	PFDoA	< 0,5
Erf, Bürgstadt	02.07.2015	Bachforelle	9	8:2 FTS	< 0,5
Fränkische Saale, Gmünden	29.09.2016	Aitel	9	PFOA	< 0,5

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Fränkische Saale, Gmünden	29.09.2016	Aitel	9	PFOS	1,3
Fränkische Saale, Gmünden	29.09.2016	Aitel	9	PFNA	< 0,5
Fränkische Saale, Gmünden	29.09.2016	Aitel	9	PFDA	0,71
Fränkische Saale, Gmünden	29.09.2016	Aitel	9	PFUnA	< 0,5
Fränkische Saale, Gmünden	29.09.2016	Aitel	9	PFDoA	1,4
Fränkische Saale, Gmünden	29.09.2016	Aitel	9	8:2 FTS	< 0,5
Großer Brombachsee	19.09.2013	Hecht	9	PFOA	< 0,5
Großer Brombachsee	19.09.2013	Hecht	9	PFOS	1,8
Großer Brombachsee	19.09.2013	Hecht	9	PFNA	< 0,5
Großer Brombachsee	19.09.2013	Hecht	9	PFDA	< 0,5
Großer Brombachsee	19.09.2013	Hecht	9	PFUnA	< 0,5
Großer Brombachsee	19.09.2013	Hecht	9	PFDoA	< 0,5
Großer Brombachsee	19.09.2013	Hecht	9	8:2 FTS	< 0,5
Iller, Wiblingen	12.10.2016	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Iller, Wiblingen	12.10.2016	Aitel	10	PFOS	7,7
Iller, Wiblingen	12.10.2016	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Iller, Wiblingen	12.10.2016	Aitel	10	PFDA	0,65
Iller, Wiblingen	12.10.2016	Aitel	10	PFUnA	1,1
Iller, Wiblingen	12.10.2016	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Iller, Wiblingen	12.10.2016	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Aitel	2	PFOA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Aitel	2	PFOS	3,8
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Aitel	2	PFNA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Aitel	2	PFDA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Aitel	2	PFUnA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Aitel	2	PFDoA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Aitel	2	8:2 FTS	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Bachforelle	6	PFOA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Bachforelle	6	PFOS	2,2
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Bachforelle	6	PFNA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Bachforelle	6	PFDA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Bachforelle	6	PFUnA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Bachforelle	6	PFDoA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	22.06.2016	Bachforelle	6	8:2 FTS	< 0,5
Ilz, Kalteneck	11.08.2015	Bachforelle	11	PFOA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	11.08.2015	Bachforelle	11	PFOS	2,4
Ilz, Kalteneck	11.08.2015	Bachforelle	11	PFNA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	11.08.2015	Bachforelle	11	PFDA	< 0,5
Ilz, Kalteneck	11.08.2015	Bachforelle	11	PFUnA	< 0,5

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Ilz, Kalteneck	11.08.2015	Bachforelle	11	PFD _o A	< 0,5
Ilz, Kalteneck	11.08.2015	Bachforelle	11	8:2 FTS	< 0,5
Inn, Dornitzen	27.09.2016	Aitel	3	PFOA	< 0,5
Inn, Dornitzen	27.09.2016	Aitel	3	PFOS	1,6
Inn, Dornitzen	27.09.2016	Aitel	3	PFNA	0,72
Inn, Dornitzen	27.09.2016	Aitel	3	PFDA	10
Inn, Dornitzen	27.09.2016	Aitel	3	PFUnA	14
Inn, Dornitzen	27.09.2016	Aitel	3	PFD _o A	20
Inn, Dornitzen	27.09.2016	Aitel	3	8:2 FTS	< 0,5
Inn, Dornitzen	19.07.2012	Aitel	5	PFOA	0,54
Inn, Dornitzen	19.07.2012	Aitel	5	PFOS	3,6
Inn, Dornitzen	19.07.2012	Aitel	5	PFNA	2,1
Inn, Dornitzen	19.07.2012	Aitel	5	PFDA	26
Inn, Dornitzen	19.07.2012	Aitel	5	PFUnA	16
Inn, Dornitzen	19.07.2012	Aitel	5	PFD _o A	21
Inn, Dornitzen	19.07.2012	Aitel	5	8:2 FTS	1
Inn, Ingling	12.10.2016	Aitel	3	PFOA	< 0,5
Inn, Ingling	12.10.2016	Aitel	3	PFOS	2
Inn, Ingling	12.10.2016	Aitel	3	PFNA	< 0,5
Inn, Ingling	12.10.2016	Aitel	3	PFDA	< 0,5
Inn, Ingling	12.10.2016	Aitel	3	PFUnA	< 0,5
Inn, Ingling	12.10.2016	Aitel	3	PFD _o A	< 0,5
Inn, Ingling	12.10.2016	Aitel	3	8:2 FTS	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Bachforelle	2	PFOA	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Bachforelle	2	PFNA	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Bachforelle	2	PFDA	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Bachforelle	2	PFUnA	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Bachforelle	2	PFD _o A	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Bachforelle	2	8:2 FTS	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Regenbogenforelle	3	PFOA	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Regenbogenforelle	3	PFOS	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Regenbogenforelle	3	PFNA	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Regenbogenforelle	3	PFDA	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Regenbogenforelle	3	PFUnA	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Regenbogenforelle	3	PFD _o A	< 0,5
Inn, Kirchdorf	10.08.2016	Regenbogenforelle	3	8:2 FTS	< 0,5

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Inn, Neuhaus	28.09.2016	Aitel	4	PFOA	< 0,5
Inn, Neuhaus	28.09.2016	Aitel	4	PFOS	1,7
Inn, Neuhaus	28.09.2016	Aitel	4	PFNA	< 0,5
Inn, Neuhaus	28.09.2016	Aitel	4	PFDA	0,57
Inn, Neuhaus	28.09.2016	Aitel	4	PFUnA	< 0,5
Inn, Neuhaus	28.09.2016	Aitel	4	PFDoA	< 0,5
Inn, Neuhaus	28.09.2016	Aitel	4	8:2 FTS	< 0,5
Inn, Simbach	15.10.2014	Aitel	5	PFOA	< 0,5
Inn, Simbach	15.10.2014	Aitel	5	PFOS	1,2
Inn, Simbach	15.10.2014	Aitel	5	PFNA	< 0,5
Inn, Simbach	15.10.2014	Aitel	5	PFDA	0,6
Inn, Simbach	15.10.2014	Aitel	5	PFUnA	< 0,5
Inn, Simbach	15.10.2014	Aitel	5	PFDoA	< 0,5
Inn, Simbach	15.10.2014	Aitel	5	8:2 FTS	< 0,5
Inn, Simbach	25.09.2012	Aitel	11	PFOA	< 0,5
Inn, Simbach	25.09.2012	Aitel	11	PFOS	1,8
Inn, Simbach	25.09.2012	Aitel	11	PFNA	< 0,5
Inn, Simbach	25.09.2012	Aitel	11	PFDA	0,62
Inn, Simbach	25.09.2012	Aitel	11	PFUnA	< 0,5
Inn, Simbach	25.09.2012	Aitel	11	PFDoA	< 0,5
Inn, Simbach	25.09.2012	Aitel	11	8:2 FTS	< 0,5
Isar, Moosburg	05.10.2015	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Isar, Moosburg	05.10.2015	Aitel	10	PFOS	8,8
Isar, Moosburg	05.10.2015	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Isar, Moosburg	05.10.2015	Aitel	10	PFDA	3,6
Isar, Moosburg	05.10.2015	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Isar, Moosburg	05.10.2015	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Isar, Moosburg	05.10.2015	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Isar, Plattling	22.07.2015	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Isar, Plattling	22.07.2015	Aitel	10	PFOS	9,2
Isar, Plattling	22.07.2015	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Isar, Plattling	22.07.2015	Aitel	10	PFDA	1,8
Isar, Plattling	22.07.2015	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Isar, Plattling	22.07.2015	Aitel	10	PFDoA	0,85
Isar, Plattling	22.07.2015	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Isar, Plattling	24.09.2012	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Isar, Plattling	24.09.2012	Aitel	10	PFOS	6,4
Isar, Plattling	24.09.2012	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Isar, Plattling	24.09.2012	Aitel	10	PFDA	1,1

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Isar, Plattling	24.09.2012	Aitel	10	PFUnA	0,76
Isar, Plattling	24.09.2012	Aitel	10	PFDoA	0,79
Isar, Plattling	24.09.2012	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Knappensee	08.11.2013	Hecht	5	PFOA	< 0,5
Knappensee	08.11.2013	Hecht	5	PFOS	0,95
Knappensee	08.11.2013	Hecht	5	PFNA	< 0,5
Knappensee	08.11.2013	Hecht	5	PFDA	< 0,5
Knappensee	08.11.2013	Hecht	5	PFUnA	< 0,5
Knappensee	08.11.2013	Hecht	5	PFDoA	< 0,5
Knappensee	08.11.2013	Hecht	5	8:2 FTS	< 0,5
Lech, Augsburg	18.10.2016	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Lech, Augsburg	18.10.2016	Aitel	10	PFOS	2,7
Lech, Augsburg	18.10.2016	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Lech, Augsburg	18.10.2016	Aitel	10	PFDA	0,95
Lech, Augsburg	18.10.2016	Aitel	10	PFUnA	0,78
Lech, Augsburg	18.10.2016	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Lech, Augsburg	18.10.2016	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Lech, Feldheim	12.09.2013	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Lech, Feldheim	12.09.2013	Aitel	10	PFOS	4,4
Lech, Feldheim	12.09.2013	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Lech, Feldheim	12.09.2013	Aitel	10	PFDA	0,51
Lech, Feldheim	12.09.2013	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Lech, Feldheim	12.09.2013	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Lech, Feldheim	12.09.2013	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Lech, Feldheim	11.10.2012	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Lech, Feldheim	11.10.2012	Aitel	10	PFOS	4,3
Lech, Feldheim	11.10.2012	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Lech, Feldheim	11.10.2012	Aitel	10	PFDA	0,51
Lech, Feldheim	11.10.2012	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Lech, Feldheim	11.10.2012	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Lech, Feldheim	11.10.2012	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Lechkanal, Herbertshofen	10.06.2016	Aitel	9	PFOA	< 0,5
Lechkanal, Herbertshofen	10.06.2016	Aitel	9	PFOS	3
Lechkanal, Herbertshofen	10.06.2016	Aitel	9	PFNA	< 0,5
Lechkanal, Herbertshofen	10.06.2016	Aitel	9	PFDA	1,2
Lechkanal, Herbertshofen	10.06.2016	Aitel	9	PFUnA	0,89
Lechkanal, Herbertshofen	10.06.2016	Aitel	9	PFDoA	0,54
Lechkanal, Herbertshofen	10.06.2016	Aitel	9	8:2 FTS	< 0,5
Loisach, Burgrain	30.09.2016	Bachforelle	3	PFOA	< 0,5

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Loisach, Burgrain	30.09.2016	Bachforelle	3	PFOS	< 0,5
Loisach, Burgrain	30.09.2016	Bachforelle	3	PFNA	< 0,5
Loisach, Burgrain	30.09.2016	Bachforelle	3	PFDA	< 0,5
Loisach, Burgrain	30.09.2016	Bachforelle	3	PFUnA	< 0,5
Loisach, Burgrain	30.09.2016	Bachforelle	3	8:2 FTS	< 0,5
Loisach, Burgrain	29.09.2016	Regenbogenforelle	3	PFOA	< 0,5
Loisach, Burgrain	29.09.2016	Regenbogenforelle	3	PFOS	< 0,5
Loisach, Burgrain	29.09.2016	Regenbogenforelle	3	PFNA	< 0,5
Loisach, Burgrain	29.09.2016	Regenbogenforelle	3	PFDA	< 0,5
Loisach, Burgrain	29.09.2016	Regenbogenforelle	3	PFUnA	< 0,5
Loisach, Burgrain	29.09.2016	Regenbogenforelle	3	8:2 FTS	< 0,5
Loisach, Grainau	24.09.2016	Bachforelle	3	PFOA	< 0,5
Loisach, Grainau	24.09.2016	Bachforelle	3	PFOS	3
Loisach, Grainau	24.09.2016	Bachforelle	3	PFNA	< 0,5
Loisach, Grainau	24.09.2016	Bachforelle	3	PFDA	< 0,5
Loisach, Grainau	24.09.2016	Bachforelle	3	PFUnA	< 0,5
Loisach, Grainau	24.09.2016	Bachforelle	3	8:2 FTS	< 0,5
Main, Erlabrunn	07.10.2015	Flussbarsch	9	PFOA	< 0,5
Main, Erlabrunn	07.10.2015	Flussbarsch	9	PFOS	15
Main, Erlabrunn	07.10.2015	Flussbarsch	9	PFNA	< 0,5
Main, Erlabrunn	07.10.2015	Flussbarsch	9	PFDA	2,8
Main, Erlabrunn	07.10.2015	Flussbarsch	9	PFUnA	1,9
Main, Erlabrunn	07.10.2015	Flussbarsch	9	PFDoA	1,9
Main, Erlabrunn	07.10.2015	Flussbarsch	9	8:2 FTS	< 0,5
Main, Hallstadt	11.08.2015	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Main, Hallstadt	11.08.2015	Aitel	10	PFOS	3,1
Main, Hallstadt	11.08.2015	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Main, Hallstadt	11.08.2015	Aitel	10	PFDA	1,9
Main, Hallstadt	11.08.2015	Aitel	10	PFUnA	1,4
Main, Hallstadt	11.08.2015	Aitel	10	PFDoA	0,82
Main, Hallstadt	11.08.2015	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Main, Hallstadt	08.10.2012	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Main, Hallstadt	08.10.2012	Aitel	10	PFOS	1,9
Main, Hallstadt	08.10.2012	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Main, Hallstadt	08.10.2012	Aitel	10	PFDA	1,4
Main, Hallstadt	08.10.2012	Aitel	10	PFUnA	1,4

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Main, Hallstadt	08.10.2012	Aitel	10	PFD _o A	0,56
Main, Hallstadt	08.10.2012	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Main, Kahl	19.07.2016	Aitel	6	PFOA	< 0,5
Main, Kahl	19.07.2016	Aitel	6	PFOS	4,7
Main, Kahl	19.07.2016	Aitel	6	PFNA	< 0,5
Main, Kahl	19.07.2016	Aitel	6	PFDA	1,4
Main, Kahl	19.07.2016	Aitel	6	PFUnA	0,83
Main, Kahl	19.07.2016	Aitel	6	PFD _o A	1
Main, Kahl	19.07.2016	Aitel	6	8:2 FTS	< 0,5
Main, Kahl	23.09.2014	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Main, Kahl	23.09.2014	Aitel	10	PFOS	8,2
Main, Kahl	23.09.2014	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Main, Kahl	23.09.2014	Aitel	10	PFDA	2,9
Main, Kahl	23.09.2014	Aitel	10	PFUnA	1,4
Main, Kahl	23.09.2014	Aitel	10	PFD _o A	< 0,5
Main, Kahl	23.09.2014	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Main, Kahl	18.09.2012	Aitel	7	PFOA	16
Main, Kahl	18.09.2012	Aitel	7	PFOS	1,9
Main, Kahl	18.09.2012	Aitel	7	PFNA	2,8
Main, Kahl	18.09.2012	Aitel	7	PFDA	2
Main, Kahl	18.09.2012	Aitel	7	PFUnA	< 0,5
Main, Kahl	18.09.2012	Aitel	7	PFD _o A	< 0,5
Main, Kahl	18.09.2012	Aitel	7	8:2 FTS	< 0,5
Main, Klingenberg	22.09.2014	Aitel	8	PFOA	< 0,5
Main, Klingenberg	22.09.2014	Aitel	8	PFOS	14
Main, Klingenberg	22.09.2014	Aitel	8	PFNA	< 0,5
Main, Klingenberg	22.09.2014	Aitel	8	PFDA	5,1
Main, Klingenberg	22.09.2014	Aitel	8	PFUnA	2,2
Main, Klingenberg	22.09.2014	Aitel	8	PFD _o A	0,6
Main, Klingenberg	22.09.2014	Aitel	8	8:2 FTS	< 0,5
Main, Rothwind	30.09.2015	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Main, Rothwind	30.09.2015	Aitel	10	PFOS	2,3
Main, Rothwind	30.09.2015	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Main, Rothwind	30.09.2015	Aitel	10	PFDA	3,3
Main, Rothwind	30.09.2015	Aitel	10	PFUnA	2,8
Main, Rothwind	30.09.2015	Aitel	10	PFD _o A	0,8
Main, Rothwind	30.09.2015	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Mindel, Offingen	07.07.2015	Aitel	3	PFOA	< 0,5
Mindel, Offingen	07.07.2015	Aitel	3	PFOS	26

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Mindel, Offingen	07.07.2015	Aitel	3	PFNA	< 0,5
Mindel, Offingen	07.07.2015	Aitel	3	PFDA	1,6
Mindel, Offingen	07.07.2015	Aitel	3	PFUnA	1,3
Mindel, Offingen	07.07.2015	Aitel	3	PFDoA	2,4
Mindel, Offingen	07.07.2015	Aitel	3	8:2 FTS	< 0,5
Naab, Heitzenhofen	30.07.2015	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Naab, Heitzenhofen	30.07.2015	Aitel	10	PFOS	2,2
Naab, Heitzenhofen	30.07.2015	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Naab, Heitzenhofen	30.07.2015	Aitel	10	PFDA	< 0,5
Naab, Heitzenhofen	30.07.2015	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Naab, Heitzenhofen	30.07.2015	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Naab, Heitzenhofen	30.07.2015	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Naab, Heitzenhofen	13.09.2012	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Naab, Heitzenhofen	13.09.2012	Aitel	10	PFOS	5,6
Naab, Heitzenhofen	13.09.2012	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Naab, Heitzenhofen	13.09.2012	Aitel	10	PFDA	0,67
Naab, Heitzenhofen	13.09.2012	Aitel	10	PFUnA	0,72
Naab, Heitzenhofen	13.09.2012	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Naab, Heitzenhofen	13.09.2012	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Paar, Manching	02.06.2015	Aitel	9	PFOA	< 0,5
Paar, Manching	02.06.2015	Aitel	9	PFOS	11
Paar, Manching	02.06.2015	Aitel	9	PFNA	< 0,5
Paar, Manching	02.06.2015	Aitel	9	PFDA	0,6
Paar, Manching	02.06.2015	Aitel	9	PFUnA	< 0,5
Paar, Manching	02.06.2015	Aitel	9	PFDoA	0,59
Paar, Manching	02.06.2015	Aitel	9	8:2 FTS	< 0,5
Paar, Manching	31.10.2012	Aitel	7	PFOA	< 0,5
Paar, Manching	31.10.2012	Aitel	7	PFOS	3,2
Paar, Manching	31.10.2012	Aitel	7	PFNA	< 0,5
Paar, Manching	31.10.2012	Aitel	7	PFDA	0,76
Paar, Manching	31.10.2012	Aitel	7	PFUnA	0,85
Paar, Manching	31.10.2012	Aitel	7	PFDoA	< 0,5
Paar, Manching	31.10.2012	Aitel	7	8:2 FTS	< 0,5
Paar, Manching	31.10.2012	Nerfling	4	PFOA	< 0,5
Paar, Manching	31.10.2012	Nerfling	4	PFOS	5,2
Paar, Manching	31.10.2012	Nerfling	4	PFNA	< 0,5
Paar, Manching	31.10.2012	Nerfling	4	PFDA	0,98
Paar, Manching	31.10.2012	Nerfling	4	PFUnA	0,92
Paar, Manching	31.10.2012	Nerfling	4	PFDoA	0,53

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Paar, Manching	31.10.2012	Nerfling	4	8:2 FTS	< 0,5
Partnach	29.07.2016	Bachforelle	4	PFOA	< 0,5
Partnach	29.07.2016	Bachforelle	4	PFOS	1,1
Partnach	29.07.2016	Bachforelle	4	PFNA	< 0,5
Partnach	29.07.2016	Bachforelle	4	PFDA	< 0,5
Partnach	29.07.2016	Bachforelle	4	PFUnA	< 0,5
Partnach	29.07.2016	Bachforelle	4	8:2 FTS	< 0,5
Pegnitz, Enzendorf	27.11.2014	Regenbogenforelle	4	PFOA	< 0,5
Pegnitz, Enzendorf	27.11.2014	Regenbogenforelle	4	PFOS	0,7
Pegnitz, Enzendorf	27.11.2014	Regenbogenforelle	4	PFNA	< 0,5
Pegnitz, Enzendorf	27.11.2014	Regenbogenforelle	4	PFDA	< 0,5
Pegnitz, Enzendorf	27.11.2014	Regenbogenforelle	4	PFUnA	< 0,5
Pegnitz, Enzendorf	27.11.2014	Regenbogenforelle	4	PFDoA	< 0,5
Pegnitz, Enzendorf	27.11.2014	Regenbogenforelle	4	8:2 FTS	< 0,5
Pegnitz, Röthenbach	27.11.2014	Hasel	9	PFOA	< 0,5
Pegnitz, Röthenbach	27.11.2014	Hasel	9	PFOS	23
Pegnitz, Röthenbach	27.11.2014	Hasel	9	PFNA	< 0,5
Pegnitz, Röthenbach	27.11.2014	Hasel	9	PFDA	0,8
Pegnitz, Röthenbach	27.11.2014	Hasel	9	PFUnA	< 0,5
Pegnitz, Röthenbach	27.11.2014	Hasel	9	PFDoA	< 0,5
Pegnitz, Röthenbach	27.11.2014	Hasel	9	8:2 FTS	< 0,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	4	PFOA	< 0,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	4	PFOS	5,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	4	PFNA	< 0,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	4	PFDA	0,6
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	4	PFUnA	0,8
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	4	PFDoA	1,3
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	4	8:2 FTS	< 0,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	6	PFOA	< 0,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	6	PFOS	4,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	6	PFNA	< 0,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	6	PFDA	0,8
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	6	PFUnA	0,7
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	6	PFDoA	< 0,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Aitel	6	8:2 FTS	< 0,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Hecht	3	PFOA	< 0,5

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Regen, Marienthal	11.09.2014	Hecht	3	PFOS	4,8
Regen, Marienthal	11.09.2014	Hecht	3	PFNA	< 0,5
Regen, Marienthal	11.09.2014	Hecht	3	PFDA	0,7
Regen, Marienthal	11.09.2014	Hecht	3	PFUnA	0,8
Regen, Marienthal	11.09.2014	Hecht	3	PFDoA	1
Regen, Marienthal	11.09.2014	Hecht	3	8:2 FTS	< 0,5
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Aitel	10	PFOS	5,9
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Aitel	10	PFDA	1,2
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Aitel	10	PFUnA	1,4
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Hecht	7	PFOA	< 0,5
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Hecht	7	PFOS	4,2
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Hecht	7	PFNA	< 0,5
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Hecht	7	PFDA	0,6
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Hecht	7	PFUnA	0,7
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Hecht	7	PFDoA	1
Regen, Regenstauf	11.09.2014	Hecht	7	8:2 FTS	< 0,5
Regnitz, Hausen	08.10.2012	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Regnitz, Hausen	08.10.2012	Aitel	10	PFOS	11
Regnitz, Hausen	08.10.2012	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Regnitz, Hausen	08.10.2012	Aitel	10	PFDA	0,89
Regnitz, Hausen	08.10.2012	Aitel	10	PFUnA	0,51
Regnitz, Hausen	08.10.2012	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Regnitz, Hausen	08.10.2012	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Röslau, Fischern	14.10.2015	Aitel	6	PFOA	< 0,5
Röslau, Fischern	14.10.2015	Aitel	6	PFOS	2,9
Röslau, Fischern	14.10.2015	Aitel	6	PFNA	< 0,5
Röslau, Fischern	14.10.2015	Aitel	6	PFDA	< 0,5
Röslau, Fischern	14.10.2015	Aitel	6	PFUnA	< 0,5
Röslau, Fischern	14.10.2015	Aitel	6	PFDoA	< 0,5
Röslau, Fischern	14.10.2015	Aitel	6	8:2 FTS	< 0,5
Röslau, Fischern	24.11.2014	Aitel	5	PFOA	< 0,5
Röslau, Fischern	24.11.2014	Aitel	5	PFOS	2,5
Röslau, Fischern	24.11.2014	Aitel	5	PFNA	< 0,5
Röslau, Fischern	24.11.2014	Aitel	5	PFDA	< 0,5
Röslau, Fischern	24.11.2014	Aitel	5	PFUnA	< 0,5

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Röslau, Fischern	24.11.2014	Aitel	5	PFD _o A	< 0,5
Röslau, Fischern	24.11.2014	Aitel	5	8:2 FTS	< 0,5
Rott, Raisting	24.05.2014	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Rott, Raisting	24.05.2014	Aitel	10	PFOS	1
Rott, Raisting	24.05.2014	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Rott, Raisting	24.05.2014	Aitel	10	PFDA	< 0,5
Rott, Raisting	24.05.2014	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Rott, Raisting	24.05.2014	Aitel	10	PFD _o A	< 0,5
Rott, Raisting	24.05.2014	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Sächsische Saale, Joditz	10.10.2012	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Sächsische Saale, Joditz	10.10.2012	Aitel	10	PFOS	4,6
Sächsische Saale, Joditz	10.10.2012	Aitel	10	PFNA	0,5
Sächsische Saale, Joditz	10.10.2012	Aitel	10	PFDA	10
Sächsische Saale, Joditz	10.10.2012	Aitel	10	PFUnA	7,9
Sächsische Saale, Joditz	10.10.2012	Aitel	10	PFD _o A	3
Sächsische Saale, Joditz	10.10.2012	Aitel	10	8:2 FTS	2,1
Salzach, Haiming	21.10.2015	Aitel	5	PFOA	< 0,5
Salzach, Haiming	21.10.2015	Aitel	5	PFOS	4
Salzach, Haiming	21.10.2015	Aitel	5	PFNA	< 0,5
Salzach, Haiming	21.10.2015	Aitel	5	PFDA	0,58
Salzach, Haiming	21.10.2015	Aitel	5	PFUnA	< 0,5
Salzach, Haiming	21.10.2015	Aitel	5	PFD _o A	< 0,5
Salzach, Haiming	21.10.2015	Aitel	5	8:2 FTS	< 0,5
Salzach, Haiming	25.09.2012	Aitel	7	PFOA	< 0,5
Salzach, Haiming	25.09.2012	Aitel	7	PFOS	4,1
Salzach, Haiming	25.09.2012	Aitel	7	PFNA	< 0,5
Salzach, Haiming	25.09.2012	Aitel	7	PFDA	0,73
Salzach, Haiming	25.09.2012	Aitel	7	PFUnA	0,61
Salzach, Haiming	25.09.2012	Aitel	7	PFD _o A	< 0,5
Salzach, Haiming	25.09.2012	Aitel	7	8:2 FTS	< 0,5
Salzach, Laufen	01.10.2014	Aitel	4	PFOA	< 0,5
Salzach, Laufen	01.10.2014	Aitel	4	PFOS	5,9
Salzach, Laufen	01.10.2014	Aitel	4	PFNA	< 0,5
Salzach, Laufen	01.10.2014	Aitel	4	PFDA	0,7
Salzach, Laufen	01.10.2014	Aitel	4	PFUnA	< 0,5
Salzach, Laufen	01.10.2014	Aitel	4	PFD _o A	< 0,5
Salzach, Laufen	01.10.2014	Aitel	4	8:2 FTS	< 0,5
Sinn, Gemünden	11.09.2014	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Sinn, Gemünden	11.09.2014	Aitel	10	PFOS	1,2

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Sinn, Gemünden	11.09.2014	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Sinn, Gemünden	11.09.2014	Aitel	10	PFDA	< 0,5
Sinn, Gemünden	11.09.2014	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Sinn, Gemünden	11.09.2014	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Sinn, Gemünden	11.09.2014	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Starnberger See	10.12.2013	Hecht	10	PFOA	< 0,5
Starnberger See	10.12.2013	Hecht	10	PFOS	3,1
Starnberger See	10.12.2013	Hecht	10	PFNA	< 0,5
Starnberger See	10.12.2013	Hecht	10	PFDA	0,57
Starnberger See	10.12.2013	Hecht	10	PFUnA	< 0,5
Starnberger See	10.12.2013	Hecht	10	PFDoA	< 0,5
Starnberger See	10.12.2013	Hecht	10	8:2 FTS	< 0,5
Starnberger See	29.10.2013	Flussbarsch	11	PFOA	< 0,5
Starnberger See	29.10.2013	Flussbarsch	11	PFOS	13
Starnberger See	29.10.2013	Flussbarsch	11	PFNA	< 0,5
Starnberger See	29.10.2013	Flussbarsch	11	PFDA	2,7
Starnberger See	29.10.2013	Flussbarsch	11	PFUnA	2
Starnberger See	29.10.2013	Flussbarsch	11	PFDoA	1,1
Starnberger See	29.10.2013	Flussbarsch	11	8:2 FTS	< 0,5
Steinach, Fürth a. Berg	23.08.2012	Aitel	3	PFOA	< 0,5
Steinach, Fürth a. Berg	23.08.2012	Aitel	3	PFOS	1,7
Steinach, Fürth a. Berg	23.08.2012	Aitel	3	PFNA	< 0,5
Steinach, Fürth a. Berg	23.08.2012	Aitel	3	PFDA	< 0,5
Steinach, Fürth a. Berg	23.08.2012	Aitel	3	PFUnA	< 0,5
Steinach, Fürth a. Berg	23.08.2012	Aitel	3	PFDoA	< 0,5
Steinach, Fürth a. Berg	23.08.2012	Aitel	3	8:2 FTS	< 0,5
Steinberger See	05.11.2013	Hecht	5	PFOA	< 0,5
Steinberger See	05.11.2013	Hecht	5	PFOS	10
Steinberger See	05.11.2013	Hecht	5	PFNA	< 0,5
Steinberger See	05.11.2013	Hecht	5	PFDA	1,2
Steinberger See	05.11.2013	Hecht	5	PFUnA	1,4
Steinberger See	05.11.2013	Hecht	5	PFDoA	0,6
Steinberger See	05.11.2013	Hecht	5	8:2 FTS	< 0,5
Tiroler Achen, Staudach	14.10.2015	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Tiroler Achen, Staudach	14.10.2015	Aitel	10	PFOS	1,2
Tiroler Achen, Staudach	14.10.2015	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Tiroler Achen, Staudach	14.10.2015	Aitel	10	PFDA	< 0,5
Tiroler Achen, Staudach	14.10.2015	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Tiroler Achen, Staudach	14.10.2015	Aitel	10	PFDoA	< 0,5

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Tiroler Achen, Staudach	14.10.2015	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
TWT Frauenau	12.08.2013	Bachforelle	11	PFOA	< 0,5
TWT Frauenau	12.08.2013	Bachforelle	11	PFOS	0,55
TWT Frauenau	12.08.2013	Bachforelle	11	PFNA	< 0,5
TWT Frauenau	12.08.2013	Bachforelle	11	PFDA	< 0,5
TWT Frauenau	12.08.2013	Bachforelle	11	PFUnA	< 0,5
TWT Frauenau	12.08.2013	Bachforelle	11	PFDoA	< 0,5
TWT Frauenau	12.08.2013	Bachforelle	11	8:2 FTS	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Rotauge	4	PFOA	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Rotauge	4	PFOS	2,2
TWT Mauthaus	29.08.2013	Rotauge	4	PFNA	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Rotauge	4	PFDA	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Rotauge	4	PFUnA	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Rotauge	4	PFDoA	0,89
TWT Mauthaus	29.08.2013	Rotauge	4	8:2 FTS	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Seeforelle	10	PFOA	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Seeforelle	10	PFOS	0,72
TWT Mauthaus	29.08.2013	Seeforelle	10	PFNA	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Seeforelle	10	PFDA	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Seeforelle	10	PFUnA	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Seeforelle	10	PFDoA	< 0,5
TWT Mauthaus	29.08.2013	Seeforelle	10	8:2 FTS	< 0,5
TWT Mauthaus	10.10.2012	Flussbarsch	10	PFOA	< 0,5
TWT Mauthaus	10.10.2012	Flussbarsch	10	PFOS	0,57
TWT Mauthaus	10.10.2012	Flussbarsch	10	PFNA	< 0,5
TWT Mauthaus	10.10.2012	Flussbarsch	10	PFDA	< 0,5
TWT Mauthaus	10.10.2012	Flussbarsch	10	PFUnA	0,84
TWT Mauthaus	10.10.2012	Flussbarsch	10	PFDoA	0,79
TWT Mauthaus	10.10.2012	Flussbarsch	10	8:2 FTS	< 0,5
Vils, Dietldorf	12.09.2014	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Vils, Dietldorf	12.09.2014	Aitel	10	PFOS	6,1
Vils, Dietldorf	12.09.2014	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Vils, Dietldorf	12.09.2014	Aitel	10	PFDA	0,6
Vils, Dietldorf	12.09.2014	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Vils, Dietldorf	12.09.2014	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Vils, Dietldorf	12.09.2014	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Weißensee	07.12.2013	Flussbarsch	10	PFOA	< 0,5
Weißensee	07.12.2013	Flussbarsch	10	PFOS	2,3
Weißensee	07.12.2013	Flussbarsch	10	PFNA	< 0,5

Messstelle	Datum	Fischart	Anzahl Fische	Messgröße	Messwert (µg/kg FG)
Weißensee	07.12.2013	Flussbarsch	10	PFDA	0,72
Weißensee	07.12.2013	Flussbarsch	10	PFUnA	0,73
Weißensee	07.12.2013	Flussbarsch	10	PFDoA	< 0,5
Weißensee	07.12.2013	Flussbarsch	10	8:2 FTS	< 0,5
Weißensee	06.12.2013	Hecht	14	PFOA	< 0,5
Weißensee	06.12.2013	Hecht	14	PFOS	0,67
Weißensee	06.12.2013	Hecht	14	PFNA	< 0,5
Weißensee	06.12.2013	Hecht	14	PFDA	< 0,5
Weißensee	06.12.2013	Hecht	14	PFUnA	< 0,5
Weißensee	06.12.2013	Hecht	14	PFDoA	< 0,5
Weißensee	06.12.2013	Hecht	14	8:2 FTS	< 0,5
Wertach, Ettringen	02.07.2016	Aitel	9	PFOA	< 0,5
Wertach, Ettringen	02.07.2016	Aitel	9	PFOS	3,3
Wertach, Ettringen	02.07.2016	Aitel	9	PFNA	< 0,5
Wertach, Ettringen	02.07.2016	Aitel	9	PFDA	< 0,5
Wertach, Ettringen	02.07.2016	Aitel	9	PFUnA	< 0,5
Wertach, Ettringen	02.07.2016	Aitel	9	PFDoA	< 0,5
Wertach, Ettringen	02.07.2016	Aitel	9	8:2 FTS	< 0,5
Wondreb, Schloppach	28.08.2014	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Wondreb, Schloppach	28.08.2014	Aitel	10	PFOS	1,5
Wondreb, Schloppach	28.08.2014	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Wondreb, Schloppach	28.08.2014	Aitel	10	PFDA	< 0,5
Wondreb, Schloppach	28.08.2014	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Wondreb, Schloppach	28.08.2014	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Wondreb, Schloppach	28.08.2014	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5
Wörnitz, Ronheim	09.09.2015	Aitel	10	PFOA	< 0,5
Wörnitz, Ronheim	09.09.2015	Aitel	10	PFOS	1,3
Wörnitz, Ronheim	09.09.2015	Aitel	10	PFNA	< 0,5
Wörnitz, Ronheim	09.09.2015	Aitel	10	PFDA	< 0,5
Wörnitz, Ronheim	09.09.2015	Aitel	10	PFUnA	< 0,5
Wörnitz, Ronheim	09.09.2015	Aitel	10	PFDoA	< 0,5
Wörnitz, Ronheim	09.09.2015	Aitel	10	8:2 FTS	< 0,5

Tab. A4: Monitoringergebnis der Untersuchungen von PFOS in Wasser und in Fischen im Rahmen der WRRL an den Überblicksmessstellen der Fließgewässer.

Gewässer	Wasser				Biota		
	Untersuchungs-jahr	Anzahl Proben	Mittelwert (ng/L)	Überschreitung JD-UQN	Untersuchungs-jahr	Biota-Messwert (µg/kg)	Überschreitung Biota-UQN
Ammer, Fischen	2015	3	<BG	nein	2017		
Ilz, Kaltenecke	2015	3	<BG	nein	2016	3,8	nein
Inn, Eschelbach	2016	4	<BG	nein			
Isar, Mittenwald	2015	3	<BG	nein			
Lech, Augsburg	2016	4	<BG	nein	2016	2,7	nein
Salzach, Laufen	2017	3	<BG	nein	2014	5,9	nein
Tiroler Achen, Staudach	2015	3	<BG	nein	2015	1,2	nein
Inn, Simbach	2017	5	1,2	ja	2014	1,2	nein
Fränkische Saale, Gemünden	2016	4	1,25	ja	2016	1,3	nein
Wörnitz, Offingen	2015	4	1,25	ja	2015	1,3	nein
Inn, Passau	2015	3	1	ja	2016	2	nein
Altmühl, Dietfurt	2016	3	1,17	ja	2015	2,1	nein
Naab, Heitzenhofen	2016	3	1,5	ja	2015	2,2	nein
Donau, Bittenbrunn	2016	5	2,1	ja	2016	2,4	nein
Main, Hallstadt	2015	3	1,5	ja	2015	3,1	nein
Wertach, Ettringen					2016	3,3	nein
Donau, Deggendorf	2015	3	2,67	ja	2015	4,3	nein
Lech, Feldheim	2017	4	1,67	ja	2013	4,4	nein
Sächsische Saale, Joditz	2016	4	2,25	ja	2012	4,6	nein
Main, Kahl	2017	12	3,1	ja	2016	4,7	nein
Donau, Böfinger Halde	2016	4	2,5	ja	2015	4,9	nein
Regen, Marienthal	2016	4	1,75	ja	2014	5,5	nein
Donau, Niederalteich	2016	5	2,4	ja	2015	5,7	nein
Donau, Bad Abbach	2017	3	2,3	ja	2012	6,0	nein
Donau, Schäfstall	2015	4	7,5	ja	2015	6,9	nein
Amper, Inkofen	2017	4	1,88	ja	2015	7,4	nein
Iller, Wiblingen	2016	4	1	ja	2016	7,7	nein
Donau, Kelheim					2015	8,5	nein
Isar, Moosburg	2017	4	4,3	ja	2015	8,8	nein
Inn, Kirchdorf	2017	3	1,2	ja	2016	< 0,50	nein
Isar, Plattling	2016	5	3,8	ja	2015	9,2	ja
Paar, Grossmehring	2015	3	2,33	ja	2015	11	ja
Regnitz, Hausen	2015	3	8	ja	2012	11	ja
Main, Erlabrunn	2016	4	4,25	ja	2015	15	ja
Mindel, Offingen	2017	4	1	ja	2015	26	ja
Donau, Dillingen	2017	4	1,88	ja	2016	6,4	nein
Donau, Jochenstein	2017	5	1,88	ja	2017		
Vils, Grafenmühle	2017	5	1	ja	2017		

Tab. A5: PFC-Konzentration (in ng/L) in den 2007 untersuchten Grundwässern.

Messstelle	PFHxA (ng/L)	PFHpA (ng/L)	PFOA (ng/L)	PFOS (ng/L)	PFDA (ng/L)
GW 01	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 02	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 03	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 04	n.n.	n.n.	<1	n.n.	n.n.
GW 05	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 06	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 07	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 08	n.n.	n.n.	1,3	11	<1
GW 09	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 10	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 11	<0,4	<0,4	0,6	2,3	n.n.
GW 12	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 13	2,9	<1	1,1	17	n.n.
GW 14	<1	n.n.	1,3	n.n.	<1
GW 15	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 16	n.n.	n.n.	0,9	9,1	n.n.
GW 17	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 18	<0,5	<0,5	<1	<1	n.n.
GW 19	n.n.	n.n.	<1	n.n.	n.n.
GW 20	n.n.	n.n.	<1	<1	n.n.
GW 21	1,2	<1	3	2,8	n.n.
GW 22	1,3	<1	1,6	<1	n.n.
GW 23	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 24	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 25	n.n.	n.n.	<1	n.n.	n.n.
GW 26	0,3	<0,4	0,7	<1	n.n.
GW 27	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 28	<1	<0,4	1,4	2,6	n.n.
GW 29	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 30	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 31	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 32	<1	<0,4	<1	n.n.	n.n.
GW 33	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 34	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 35	<1	n.n.	0,6	<1	n.n.
GW 36	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 37	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 38	n.n.	n.n.	<1,3	9,4	n.n.
GW 39	n.n.	n.n.	<0,5	n.n.	n.n.
GW 40	n.n.	n.n.	<0,5	n.n.	n.n.
GW 41	<1	<0,4	<1	20	n.n.
GW 42	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 43	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 44	<1	<1	2,1	6,5	n.n.
GW 45	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Messstelle	PFHxA (ng/L)	PFHpA (ng/L)	PFOA (ng/L)	PFOS (ng/L)	PFDA (ng/L)
GW 46	0,6	<1	4,1	n.n.	n.n.
GW 47	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 48	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 49	n.n.	n.n.	<0,5	n.n.	n.n.
GW 50	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
GW 51	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Tab. A6: PFC-Konzentration (in µg/L) in den 2008 untersuchten Abwasserproben.

Branche	Probennr.	PFBS	PFHxA	PFHxS	PFHpA	PFOA	PFOS	PFNA	PFDA	PFUnA	PFDoA	PFOSA	
Ablauf/ Abwasserbehandlung	1		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.				
Chem. Reinigung	2	n.n. ^d	2,4	n.n. ^d	0,43	2,8	n.n. ^d	0,21	1,4			n.n. ^d	
Chemie	3		0,22		0,11	<1	0,08		n.n.				
Druckerei	4	n.n. ^b			n.n. ^b								
Elektronik, Glas	5		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.				
Fahrzeugbau	6	n.n.			n.n.								
Färberei	7		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.				
Galvanik	8		n.n.		n.n.	<3	<15		n.n.				
	9		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.				
	10		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.				
	11		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.				
	12		n.n.		n.n.	n.n.	100		n.n.				
	13		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.				
	14		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.				
	15		n.n.		n.n.	n.n.	1,8		n.n.				
	16		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.				
	17		n.n.		n.n.	<0,6	<5		n.n.				
	18		n.n.		n.n.	n.n.	27		n.n.				
	19		n.n.		n.n.	n.n.	38		n.n.				
	20	n.n. ^c	27	n.n. ^c									
	21		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.	n.n.		n.b.			
22		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.		n.n.				
23	n.n. ^c	<2,0	n.n. ^c										
24		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.		n.n.				
Großwäscherei f. Bundeswehr u. Krankenhaus	25		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.				

Branche	Probemnr.	PFBS	PFHxA	PFHxS	PFHpA	PFOA	PFOS	PFNA	PFDA	PFUnA	PFDoA	PFOSA
Halbleiterindustrie	26		n.n.		n.n.	n.n.	540		n.n.			
	27		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
Halbleiterindustrie/ Oberflächen- behandlung	28	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n. ^b	n.n. ^b	n.n. ^b			n.n.
Kunststoff-/	29	<2,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	14	n.n. ^b	n.n. ^{**}			n.n.
Oberflächen- behandlung	30	0,5	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	1,7	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e
	31	5,8	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	8,5	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e
	32	0,5	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	1	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e
	33	n.n. ^c	<2,0	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c				
Lackiererei	34		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
Lederindustrie	35		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	36		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	37		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
Leiterplattenher- stellung	38	n.n. ^b	<2,1	n.n. ^b	n.n. ^b			n.n. ^b				
Materialver- bindungen	39		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
Metallbe-u. verar- beitung	40	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	7,6	n.n.	n.n.			n.n.
	41	4,6	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c	290	n.n. ^c	n.n. ^c			n.n. ^c
	42	<2	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c	<2	n.n. ^c	n.n. ^c			n.n. ^c
	43	n.n. ^c			n.n. ^c							
	44	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	<2,7	n.n.	n.n.			n.n.
	45		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	46		<2,3		n.n.	<2,3	32		n.n.			
	47		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	48		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	49		n.n.		n.n.	n.n.	330		n.n.			
	50		n.n.		n.n.	n.n.	<11		n.n.			
	51		n.n.		n.n.	n.n.	650		n.n.			
	52		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	53		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	54		n.n.		n.n.	n.n.	7,9		n.n.			
	55		n.n.		n.n.	n.n.	220		n.n.			
	56		n.n.		n.n.	n.n.	n.n. ^a		n.n.			
57	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c								
58		n.n.		n.n.	n.n.	43		n.n.				
59	3	n.n. ^c	6,6	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c				
60		n.n.		n.n.	n.n.	480		n.n.				

Branche	Probemnr.	PFBS	PFHxA	PFHxS	PFHpA	PFOA	PFOS	PFNA	PFDA	PFUnA	PFDoA	PFOSA
	61	n.n. ^c	550	n.n. ^c								
	62	<0,1	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	n.n. ^e	<0,1	n.n. ^e				
	63		n.n.		n.n.	n.n.	9		n.n.			
	64		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	65		n.n.		n.n.	n.n.	750		n.n.			
	66		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	67		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	68	<100	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2400	n.n.	n.n.			n.n.
	69	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1500	n.n.	n.n.			n.n.
	70	330	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2600	n.n.	n.n.			n.n.
	71	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1000	n.n.	n.n.			n.n.
	72		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	73		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	74		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	75		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	76		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	77		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	78		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
Oberflächenbe- handlung/ Chemie	79		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	80	n.n. ^c	4	n.n. ^c	5,5	38	<2	3,6	1,6	n.n. ^c	n.n. ^c	n.n. ^c
	81	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n. ^b	n.n. ^b	n.n. ^b	n.n. ^b			n.n.
	82		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	83		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	84		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	85		n.b.		n.b.	n.n.	330		n.b.			
	86		n.n.		n.n.	n.n.	ca. 200		n.n.			
	87		n.n.		n.n.	n.n.	150		n.n.			
	88		n.n.		n.n.	n.n.	200		n.n.			
Papier- u. Pappe- industrie	89		n.n.		n.n.	n.n.	<12		n.n.			
	90		n.n.		n.n.	<0,6	n.n.		n.n.			
	91		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	92		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	93	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n. ^b	n.n. ^b	n.n. ^b			n.n.
	94	n.n.			n.n.							
	95	n.n. ^c			n.n. ^c							
	96	n.n. ^c			n.n. ^c							
	97	n.n. ^c			n.n. ^c							
	98		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			

Branche	Probemnr.	PFBS	PFHxA	PFHxS	PFHpA	PFOA	PFOS	PFNA	PFDA	PFUnA	PFDoA	PFOSA
	99		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
PFT Recycling	100		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
Spezialtransporte	101		n.n.		n.n.	0,5	n.n. ^a		n.n.			
	102		n.n.		n.n.	1,1	n.n.		n.n.			
Textil- /Teppich- industrie	103		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	104		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	105		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
	106		n.b.		n.b.	n.n.	n.n.		n.b.			
	107		n.n.		n.n.	<0,7	n.n.		n.n.			
	108		n.n.		n.n.	n.n.	n.n.		n.n.			
Wäscherei	109	<0,02	n.n. ^d	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	n.n. ^d	<0,02			n.n. ^d
Wäscherei/ Imprägnierung	110		n.n.		n.n.	n.n.	1,1		n.n.			

n.n. = 1 µg/L; n.n.^a = 10 µg/L; n.n.^b = 5 µg/L; n.n.^c = 2 µg/L; n.n.^d = 0,02 µg/L; n.n.^e = 0,1 µg/L

Tab. A7: PFC-Gehalte in Bodenproben von land- und forstwirtschaftlichen Flächen im Raum Gendorf (Beprobung 2007).

Nutzung	Standort- kennung	Probenart	Tiefe	PFHxA	PFHxS	PFHpA	PFOA	PFOS
Forst	F1	Auflage	+8-0	*<BG (3)	<BG	<BG	270	*<BG
Forst		Oberboden	0-2	*<BG (2)	<BG	<BG	210	*<BG (2)
Forst		Unterboden	2-30	*<BG (2)	<BG	<BG	130	<BG
Forst		Unterboden	30-48	<BG	<BG	<BG	29	<BG
Forst		Untergrund	48-85	<BG	<BG	<BG	13	<BG
Forst	F2	Auflage	+5,5-0	*<BG (2)	<BG	*<BG (3)	94	*<BG
Forst		Oberboden	0-1,5	*<BG (3)	<BG	<BG	85	*<BG (2)
Forst		Unterboden	1,5-32	<BG	<BG	<BG	28	<BG
Forst		Unterboden	32-69	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst		Untergrund	69-100	<BG	<BG	<BG	*<BG (2)	<BG
Forst	F3	Auflage	+6-0	*<BG (2)	<BG	<BG	92	*<BG (2)
Forst		Oberboden	0-1	<BG	<BG	*<BG (4)	80	<BG
Forst		Unterboden	1-19	<BG	<BG	<BG	18	<BG
Forst		Unterboden	19-57	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst		Unterboden	57-95	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst	F4	Auflage	+6-0	*<BG (5)	<BG	<BG	360	<BG
Forst		Oberboden	0-1	*<BG (3)	<BG	<BG	105	*<BG (1)
Forst		Unterboden	1-9	*<BG (1)	<BG	<BG	68	<BG
Forst		Unterboden	9-30	*<BG (5)	<BG	*<BG (4)	55	<BG
Forst	F6	Auflage	+4-0	<BG	<BG	<BG	55	*<BG (6)
Forst		Oberboden	0-3	10	<BG	<BG	72	*<BG (4)
Forst		Unterboden	3-34	<BG	<BG	<BG	13	<BG
Forst		Unterboden	34-68	*<BG (4)	<BG	<BG	17	<BG

Nutzung	Standortkennung	Probenart	Tiefe	PFHxA	PFHxS	PFHpA	PFOA	PFOS
Forst		Untergrund	68-100	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst	F7	Auflage	+3-0	<BG	<BG	<BG	*<BG (8)	<BG
Forst		Oberboden	0-22	*<BG (2)	<BG	<BG	10	<BG
Forst		Oberboden	22-38	<BG	<BG	<BG	*<BG (3)	<BG
Forst		Unterboden	38-57	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst		Unterboden	57-100	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst		F8	Auflage	+4-0	16	<BG	<BG	98
Forst	Oberboden		0-5	15	<BG	<BG	140	*<BG (3)
Forst	Unterboden		5-30	<BG	<BG	*<BG (2)	27	<BG
Forst	Unterboden		30-57	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst	F9	Auflage	+5-0	*<BG (2)	<BG	<BG	25	<BG
Forst		Oberboden	0-3	*<BG (2)	<BG	*<BG (2)	50	*<BG (3)
Forst		Unterboden	3-42	<BG	<BG	<BG	*<BG (3)	<BG
Forst		Unterboden	42-88	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst	11_F	Auflage	+2,5-0	*<BG (1)	<BG	<BG	60	*<BG (2)
Forst		Oberboden	0-7	*<BG (1)	<BG	<BG	40	<BG
Forst		Oberboden	7-20	*<BG (1)	<BG	*<BG (2)	33	<BG
Forst		Untergrund	20-40	*<BG (2)	<BG	<BG	*<BG (4)	<BG
Forst	14_F	Auflage	+2-0	26	<BG	<BG	305	*<BG (5)
Forst		Oberboden	0-2	*<BG (4)	<BG	*<BG (2)	270	*<BG (3)
Forst		Unterboden	2-44	<BG	<BG	<BG	55	<BG
Forst		Unterboden	44-55	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst	15_F	Auflage	+6-0	*<BG (1)	<BG	*<BG (1)	48	*<BG (2)
Forst		Oberboden	0-5	*<BG	<BG	*<BG (1)	72	*<BG (3)
Forst		Unterboden	5-37	<BG	<BG	<BG	12	<BG
Forst		Unterboden	37-67	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst	16_F	Auflage	+1,5-0	*<BG (1)	<BG	<BG	89	*<BG (2)
Forst		Oberboden	0-1	*<BG (3)	<BG	*<BG (1)	75	*<BG (2)
Forst		Unterboden	1-34	<BG	<BG	<BG	65	<BG
Forst		Unterboden	34-50	<BG	<BG	<BG	*<BG (8)	<BG
Forst	17_F	Auflage	+5,5-0	<BG	<BG	<BG	32	*<BG (1)
Forst		Oberboden	0-19	*<BG (1)	<BG	*<BG (1)	28	<BG
Forst		Untergrund	19-42	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst		Untergrund	42-67	<BG	<BG	<BG	*<BG (3)	<BG
Forst	18_F	Auflage	+2-0	11	<BG	<BG	145	*<BG (3)
Forst		Oberboden	0-2	*<BG (4)	<BG	<BG	180	*<BG (3)
Forst		Unterboden	2-37	*<BG (1)	<BG	<BG	23	<BG
Forst		Unterboden	37-50	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst	19_F	Auflage	+4-0	*<BG (2)	<BG	<BG	50	*<BG (3)
Forst		Oberboden	0-2,5	*<BG (2)	<BG	*<BG (2)	27	*<BG (1)
Forst		Unterboden	2,5-28	<BG	<BG	<BG	15	<BG
Forst		Unterboden	28-40	<BG	<BG	<BG	*<BG (3)	<BG
Forst	20_F	Auflage	+3-0	<BG	<BG	<BG	57	<BG
Forst		Oberboden	0-1	*<BG (4)	<BG	*<BG (2)	41	<BG
Forst		Unterboden	1-26	<BG	<BG	*<BG (2)	22	<BG
Forst		Unterboden	26-40	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst	7742_DB3_FW	Auflage	+3-0	*<BG (6)	<BG	<BG	59	*<BG (4)
Forst		Oberboden	0-2	*<BG (3)	<BG	*<BG (1)	44	*<BG (1)
Forst		Unterboden	2-20	*<BG (1)	<BG	<BG	28	<BG

Nutzung	Standort- kennung	Probenart	Tiefe	PFHxA	PFHxS	PFHpA	PFOA	PFOS
Forst		Unterboden	20-55	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst		Untergrund	55-80	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Forst	7842_ DB1_FW	Auflage	+9-0	*<BG (5)	<BG	*<BG (4)	600	*<BG (5)
Forst		Oberboden	0-1	*<BG (3)	<BG	<BG	210	<BG
Forst		Unterboden	1-29	*<BG (1)	<BG	<BG	80	<BG
Forst		Unterboden	29-60	<BG	<BG	<BG	*<BG (8)	<BG
Forst		Untergrund	60-78	<BG	<BG	<BG	12	<BG
Forst		WKS_F	Auflage	+5-0	*<BG (3)	<BG	<BG	155
Forst	Oberboden		0-5	*<BG (6)	<BG	<BG	130	<BG
Forst	Unterboden		5-40	<BG	<BG	<BG	25	<BG
Forst	Unterboden		40-65	<BG	<BG	<BG	*<BG (8)	<BG
Forst	Untergrund		65-100	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Acker	L1	Oberboden	0-30	<BG	<BG	<BG	18	<BG
Acker		Unterboden	30-60	<BG	<BG	<BG	14	<BG
Grünland	L2	Oberboden	0-10	*<BG (1)	<BG	<BG	23	<BG
Grünland		Unterboden	10-30	<BG	<BG	<BG	14	<BG
Acker	L3	Oberboden	0-20	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Acker		Unterboden	30-60	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Acker	5_L	Oberboden	0-20	<BG	<BG	<BG	*<BG (6)	<BG
Acker		Unterboden	30-60	<BG	<BG	<BG	*<BG (3)	<BG
Acker	6_L	Oberboden	0-25	<BG	<BG	<BG	11	<BG
Acker		Unterboden	30-60	<BG	<BG	<BG	*<BG (5)	<BG
Acker	7_L	Oberboden	0-25	<BG	<BG	<BG	*<BG (8)	<BG
Acker		Unterboden	30-60	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Acker	10_L	Oberboden	0-30	<BG	<BG	<BG	*<BG (1)	<BG
Acker		Unterboden	30-60	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Acker	12_L	Oberboden	0-30	<BG	<BG	<BG	*<BG (5)	<BG
Acker		Unterboden	30-60	<BG	<BG	<BG	*<BG (4)	<BG
Grünland	13_L	Oberboden	0-10	<BG	<BG	<BG	11	<BG
Grünland		Unterboden	10-30	<BG	<BG	<BG	*<BG (5)	<BG
Forst	TS1	Boden	0-60	<BG	<BG	<BG	10	<BG
Forst	TS2	Oberboden	0-15	<BG	<BG	<BG	32	<BG
Forst		Unterboden	0-30	<BG	<BG	<BG	24	<BG
Forst	TS3	Boden	0-60	<BG	<BG	<BG	11	<BG
Forst	TS4	Oberboden	0-7	<BG	<BG	<BG	80	<BG
Forst		Unterboden	0-67	<BG	<BG	<BG	249	<BG
Forst	TS5	Auflage	+5-0	<BG	<BG	<BG	163	<BG
Forst		Oberboden	0-7	<BG	<BG	<BG	179	<BG
Forst		Unterboden	0-60	<BG	<BG	<BG	42	<BG

Tab. A8: Charakteristische Bodenparameter und Kenngrößen der Kleinlysimeter der untersuchten Standorte A und B (n.b. = nicht bestimmt).

Parameter	Standort A		Standort B	
	Killy ungestört	Killy gestört	Killy ungestört	Killy gestört
Bodenhorizont	Ah	Ah	Ah + B	B
Bodentyp	humose Auffüllung	humose Auffüllung	Auenboden	Auenboden
Bodentextur	Toniger Sand	Toniger Sand	schluffiger Sand	schluffiger Sand
Höhe Killy (m)	0,6	0,6	0,6	0,6
Durchmesser Killy (m)	0,3	0,3	0,3	0,2
Bodenmenge (kg)	70,0	43,0	74,3	25,3
Lagerungsdichte (g cm ⁻³)	1,4	0,9	1,6	1,3
Wassergehalt (%)	12	12	n.b.	8
TOC Feststoffgehalt (g kg ⁻¹ TS)	14	14	34	3
Grasnarbe	ohne	ohne	mit	ohne

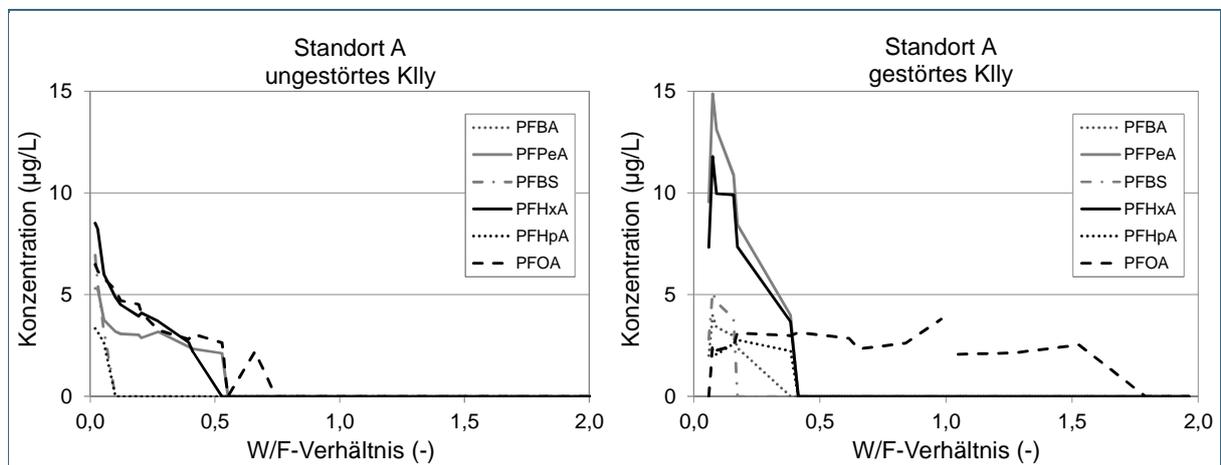


Abb. A1: Konzentrationsverlauf der perfluorierten Carbonsäuren und PFBS im Sickerwasser der ungestörten (links) und gestörten (rechts) Killy von Standort A mit zunehmendem W/F-Verhältnis.

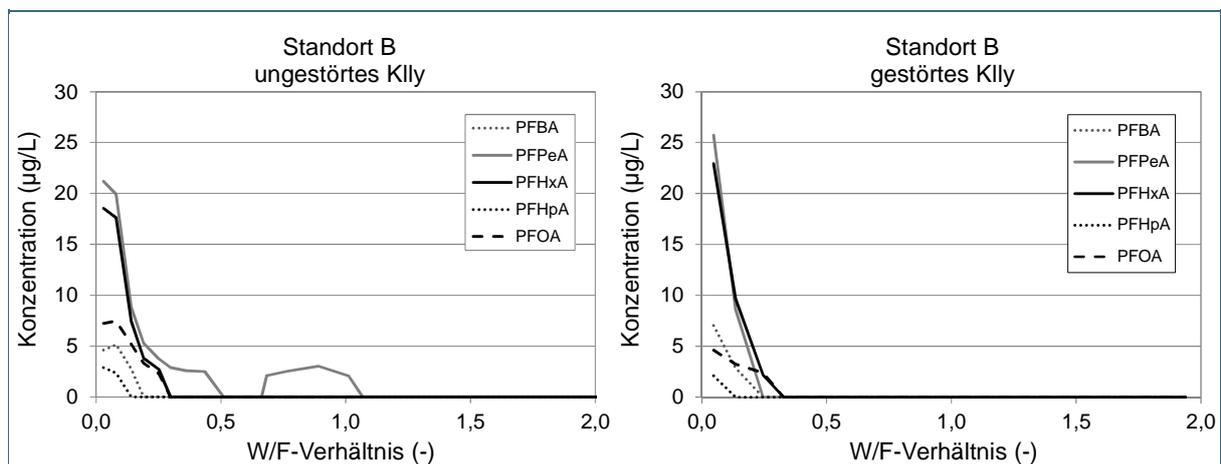


Abb. A2: Konzentrationsverlauf der perfluorierten Carbonsäuren im Sickerwasser der ungestörten (links) und gestörten (rechts) Killy von Standort B mit zunehmendem W/F-Verhältnis.

