



# PFAS-Belastungen im Einzugsgebiet der oberen Donau

Meiqi Liu · Ernís Saracevic · Steffen Kittlaus · Thomas Oudega · Ali Obeid · Zsuzsanna Nagy-Kovács · Balázs László · Nikola Krlovic · Zdravka Saracevic · Gerhard Lindner · Gerhard Rab · Julia Derx · Ottavia Zoboli · Matthias Zessner

Angenommen: 19. Juni 2023 / Online publiziert: 25. Juli 2023  
 © Der/die Autor(en) 2023

**Zusammenfassung** Ziel dieses Artikels ist es, einen Überblick über Konzentrationen von PFAS in unterschiedlichen (Umwelt-)Medien im oberen Donaueinzugsgebiet zu erhalten und daraus erste semiquantitative Schlüsse auf potenziell relevante Herkunftsgebiete zu ziehen. Im Zuge des EU-Projekts PROMISCES wurden 32 PFAS-Einzelsubstanzen in unterschiedlichen Donauzubringern, Donau, Donauuferfiltrat, Kläranlagenzu- und -abläufen, Deponiesickerwasser und durch solches beeinflusstes Grundwasser, Oberflächenabfluss und atmosphärischer Deposition analysiert. Darüber hinaus wurden PFAS-Daten aus anderen Projekten und Monitoringprogrammen genutzt. Ergebnisse weisen zum einen

auf die geringe Wirksamkeit von Barrieren wie Kläranlagen und Uferfiltration gegen eine PFAS-Belastung von Wasserressourcen hin. So konnte dort für eine Reihe von Einzelparametern kein relevanter Rückhalt festgestellt werden. In Hinblick auf die Herkunftsbereiche von PFAS weisen die Ergebnisse auf eine relevante Bedeutung der Emissionen aus dem Bereich des Chemiepark Gendorf an der Alz für die Belastung der Donau mit Carbonsäuren, aber vor allem mit ADONA hin. Darüber hinaus können Siedlungsbereiche als relevante Herkunftsbereiche angesehen werden. Kläranlagenabläufe spielen eine Rolle, können die Gewässerbelastungen alleine aber nicht erklären. Andere (diffuse) Einträge dürften zudem eine wichtige Rolle spielen. Hohe Konzentrationen von PFAS in Sickerwässern von Altlasten aus Hausmülldeponien weisen auf eine potenzielle Relevanz zumindest auf der Ebene regionaler Einzugsgebietsebene hin. Ähnliches gilt für erhöhte Grundwasserkonzentrationen aufgrund anderer regionaler Hotspot-Belastungen, wie sie auch von Brielmann et al. (2023, in diesem Heft) diskutiert werden. In weiterer Folge sollen im Rahmen des PROMISCES-Projekts die hier dargestellten Ergebnisse für eine Emissionsmodellierung von PFAS im Donaueinzugsgebiet bis Budapest genutzt werden, um verstärkt quantitative Aussagen über die Rolle unterschiedlicher Eintragspfade auf die Belastung der Fließgewässer im Donaueinzugsgebiet oberhalb von Budapest machen zu können.

media in the upper Danube catchment area and to draw initial semi-quantitative conclusions about potentially relevant emission pathways of these substances. Within the framework of the EU project PROMISCES, 32 PFAS individual substances were analyzed in different Danube tributaries, the Danube itself, Danube bank filtrate, wastewater treatment plant influents and effluents, landfill leachate and groundwater influenced by it, surface runoff and atmospheric deposition. In addition, PFAS data from other projects and monitoring programs were used. The results indicate the limited effectiveness of barriers such as wastewater treatment plants and bank filtration against PFAS contamination. No significant retention was detected for several individual parameters. With regard to the emission pathways of PFAS, the results point to substantial emissions from the chemical park Gendorf on the Alz river, notably contributing to the contamination of the Danube with carboxylic acids and particularly with ADONA. In addition, residential areas can be also deemed relevant source areas. While effluents from wastewater treatment plants played a role, they alone couldn't explain the water pollution. Other (diffuse) inputs are also likely to play an important role. High concentrations of PFAS in leachate from household waste landfills suggest a potential relevance at least at the regional level. The same applies to increased groundwater concentrations due to other regional hotspot contaminations, as discussed by Brielmann et al. (2023). The findings herein, obtained through the PROMISCES project, will be leveraged for PFAS emission modelling in the Danube River Basin down to Budapest. Our aim is to furnish more robust quantitative insights regarding the impact of different contaminant pathways on the water bodies of the Danube River Basin down to Budapest.

M. Liu, MSc · DI Dr. E. Saracevic · Dipl.-Geoökol. S. Kittlaus · N. Krlovic, MSc · DI Z. Saracevic · Ass.-Prof. Dr. O. Zoboli, MSc · Univ.-Prof. DI Dr. M. Zessner (✉) Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement, TU Wien, Wien, Österreich  
 mzessner@iwag.tuwien.ac.at

T. Oudega, BSc MSc · A. Obeid, MSc · DI G. Lindner · Ass.-Prof. DI Dr. J. Derx Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, Wien, Österreich

Z. Nagy-Kovács, MSc PhD · B. László Budapest Water Works Ltd, Budapest, Ungarn

T. Oudega, BSc MSc · A. Obeid, MSc · DI G. Lindner · Ass.-Prof. DI Dr. J. Derx · Univ.-Prof. DI Dr. M. Zessner Interuniversity Cooperation Centre Water and Health (ICC Water & Health), Wien, Österreich

DI G. Rab Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Petzenkirchen, Österreich

**Schlüsselwörter** Belastungsquellen · Flussgebiete · Kreislaufwirtschaft · Spurenstoffe · Trinkwasserqualität · Umweltqualitätsziele

## Occurrence of PFAS in the catchment of the Upper Danube

**Abstract** The objective of this article is to provide an overview of concentrations of PFAS in different environmental

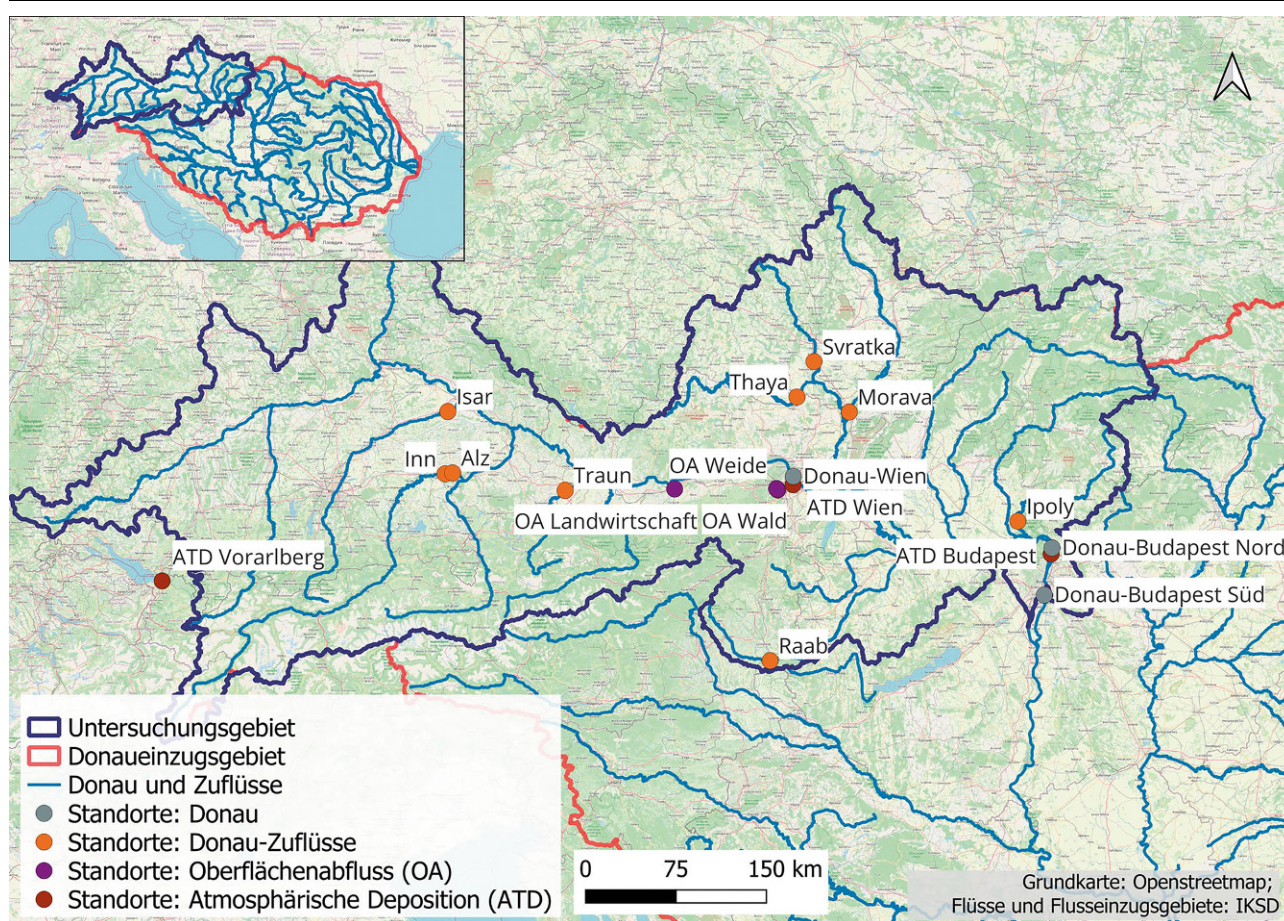


Abb. 1 Standorte der Messstellen des im Rahmen des Projekts PROMISCES durchgeführten Monitorings

**Keywords** Sources of water pollution · Watersheds · Circular economy · Trace substances · Drinking water quality · Environmental quality standards

## 1 Hintergrund

Bei der Gruppe der Per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) handelt es sich um eine Vielzahl organischer Industriechemikalien, die aufgrund der sehr hohen Stabilität der Kohlenstoff-Fluor-Bindungen sowie einer zugleich wasser- und fettabweisenden Oberflächenaktivität in vielen unterschiedlichen Anwendungen genutzt werden und so in die Umwelt gelangen, wo sie eine extrem hohe Persistenz aufweisen. Aufgrund der Toxizität mancher PFAS-Substanzen auch bei geringen Konzentrationen wurde das Augenmerk im Wasserbereich in den letzten Jahren vermehrt auf diese Gruppe von Chemikalien gelegt. So gibt es für die „alten“ PFAS Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) und Perfluoroktansäure (PFOA) Anwendungsbeschränkungen und für

PFOS Umweltqualitätsnormen in der Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer (0,65 ng/L als Jahresmittelwert in der Wasserphase bzw. 9100 ng/kg FM in Biota; QZV Chemie OG, BGBl. II Nr. 96/2006 idGF). Die EU-Trinkwasserrichtlinie (TWR), die in Österreich noch umzusetzen sein wird, sieht ab 2026 für die Summe von 20 PFAS-Einzelsubstanzen einen Grenzwert von 100 ng/L vor (EU 2020). Zudem wird in einem aktuellen Entwurf für die Überarbeitung der EU-Grundwasserrichtlinie (GWR) und der EU-Umweltqualitätsnormenrichtlinie (UQNR) für Oberflächengewässer ein Grenzwert für PFOA-Toxizitätsäquivalente aus 24 PFAS-Einzelsubstanzen von 4,4 ng/L und für Oberflächengewässer zusätzlich ein Biota-Grenzwert von 77 ng/kg FM als PFOA-Toxizitätsäquivalente angedacht (EK 2022). Diese Werte leiten sich aus dem von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA 2020) vorgeschlagenen TWI (tolerable weekly intake = tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge) ab und würden

ein wesentlich höheres Schutzziel vorgeben, als die bisherige Umweltqualitätsnorm für PFOS oder der Grenzwert der Trinkwasserrichtlinie.

Die in diesem Artikel vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des EU-Projekts PROMISCES durchgeführt (PROMISCES 2023). Das Projekt wird im Zuge des Horizon-2020-Programms der Europäischen Union gefördert und untersucht, wie durch die durch den Eintrag von Industriechemikalien in die Umwelt die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft behindert werden kann, und welche Strategien helfen können, um die Ziele des Europäischen Grünen Deals (EK 2019) und des Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft (EK 2020) zu erreichen. 27 Partner aus 9 europäischen Ländern sind an diesem Projekt beteiligt.

Dieser Artikel zeigt Ergebnisse, die in einer Fallstudie zu PFAS im Einzugsgebiet der Donau bis Budapest erarbeitet wurden. Ziel dieser Fallstudie ist die Identifikation von Quellen und Pfaden für PFAS im Einzugsgebiet und deren

**Tab. 1** Kennzahlen der im Rahmen des PROMISCES-Projekts beprobten Gewässermessstellen (Datenquellen: Kommunale Kläranlagen: EEA 2023; Gewässerabfluss: Hydrographische Dienste des jeweiligen Landes)

Land	Fluss	Messstation	Einzugsgebiet km <sup>2</sup>	Einleitung aus kommunalen Kläranlagen EW	Kläranlagenablauf (geschätzt aus EW) 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /a	Mittlerer Jahresabfluss 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /a	Anteil Abwasser am Abfluss %
DE	Alz	Burgkirchen	2224	347.885	25	397	6,4
DE	Isar	Landshut Birket	8837	3.369.146	246	5109	4,8
DE	Inn	Eschelbach	13.290	1.963.638	143	11.542	1,2
AT	Traun	Wels-Lichtenegg	3385	470.026	34	4037	0,9
AT	Raab	Neumarkt	945	129.460	9	217	4,3
CZ	Morava	Lanžhot	10.392	1.482.659	108	1696	6,4
CZ	Svratka	Židlochovice	3989	700.694	51	451	11,3
CZ	Thaya	TrávníDvůr	3532	166.098	12	327	3,7
HU	Ipoly	Ipolytölgyes	5036	125.536	9	650	1,4
AT	Donau	Donauinsel	101.527	18.482.423	1349	59.004	2,3
HU	Donau	Oberhalb Budapest	183.293	30.911.725	2256	73.573	3,1

Verhalten bei der Uferfiltration. Folgende Arbeiten werden durchgeführt:

- Monitoring von PFAS-Vorkommen und -Konzentrationen in Eintragspfaden, in Nebenflüssen der Donau, der Donau selbst und im durch die Donau beeinflussten Uferfiltrat.
- Modellierung von PFAS-Einträgen im Einzugsgebiet der Donau oberhalb von Budapest mithilfe des Emissionsmodells MoRE (Fuchs et al. 2017)
- Modellierung des Verhaltens von PFAS bei der Uferfiltration mit dem Ziel, auch Szenarien über zukünftige Entwicklungen abbilden zu können.

Ziel dieses Artikels ist es, einen Überblick und Vergleich über Konzentrationen von PFAS in unterschiedlichen (Umwelt-)Medien im oberen Donau-einzugsgebiet zu erhalten, welche im Rahmen des Monitorings im Zuge von PROMISCES und unter Zuhilfenahme weiterer publizierter Monitoringdaten erarbeitet wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen zudem erste semiquantitative Hinweise auf relevante Herkunftsbereiche einer Belastung der Donau liefern und in weiterer Folge für eine Emissionsmodellierung von PFAS im Donau-einzugsgebiet bis Budapest genutzt werden. Details zum Monitoring von PFAS im Uferfiltrat der Donau werden von Obeid et al. (2023, in diesem Heft) dargestellt.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Monitoring im Rahmen von PROMISCES

Im Rahmen des Projekts PROMISCES wurde ein umfassendes Monitoringprogramm entwickelt und umgesetzt,

welches sich auf die Medien Fließgewässer (Donau und Zubringer), von der Donau beeinflusstes Uferfiltrat, atmosphärische Deposition, Oberflächenabfluss, Zu- und Ablauf von kommunalen und industriellen Kläranlagen, Sickerwasser von Altlasten durch Hausmülldeponien und durch solche Deponien beeinflusstes Grundwasser fokussierte. An der Donau wurden an zwei Messstellen monatliche (Wien) bzw. zweimonatliche (Budapest) Stichproben bei Basisabfluss gezogen und analysiert. Zusätzlich wurden zwei Hochwasserereignisse gezielt beprobt. Für die atmosphärische Deposition wurden an insgesamt drei Messstellen in Wien, Budapest und Vorarlberg halbjährliche Sammelpfunden gesammelt. Für das Monitoring von Oberflächenabfluss wurden während Niederschlagsereignissen an 3 Messstellen je 2 Mal Stichproben gesammelt. Bei 7 kommunalen und 4 industriellen Kläranlagen wurden Zu- und Ablauf im Laufe eines Jahres 2 Mal mittels Wochenmischproben beprobt. Im Bereich von alten Hausmülldeponien konnte in zwei Fällen das Sickerwasser und in zwei weiteren Fällen das vom Sickerwasser beeinflusste Grundwasser über Stichproben beprobt werden. Beide Male wurden die Beprobungen 2 Mal durchgeführt. In Abb. 1 sind die Lagen der Messstellen an der Donau, in den Donauzubringern sowie von der atmosphärischen Deposition und dem Oberflächenabfluss dargestellt. Die Beprobung des Uferfiltrats wird bei Obeid et al. (2023, in diesem Heft) näher erläutert. Tab. 1 zeigt wesentliche Kennzahlen des Einzugsgebiets der Gewässermessstellen. Die Daten zu den Einwohnerwert-Belastungen der Kläranlagen wurden der

Datenbank der Europäischen Umweltagentur (EEA 2023) zur Urban Waste Water Directive entnommen und auf Einzugsgebietsebene aggregiert. Die eingeleiteten Wassermengen wurden aus den Belastungsdaten der Kläranlagen (als Einwohnerwerte=EW) mit 0,2 m<sup>3</sup>/(EW.d) bzw. 73 m<sup>3</sup>/(EW.a) abgeschätzt. Der mittlere Jahresabfluss wurde den Angaben der hydrographischen Dienste des jeweiligen Landes als langjähriger Mittelwert entnommen.

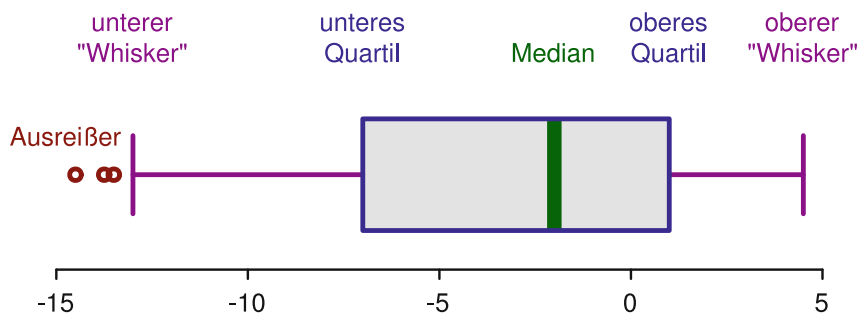
Die gesammelten Proben wurden im Labor des Instituts für Wassergüte und Ressourcenmanagement der TU Wien analysiert. Die PFAS-Analytik wurde mit LC-MS basierend auf der von EPA (2022) und DIN 11866 vorgeschlagenen Methode durchgeführt. Eine Anreicherung der Proben erfolgte mithilfe von Online-Festphasenextraktion. In Tab. 2 sind die untersuchten Parameter und die je nach Matrix erreichte Bestimmungsgrenze (BG) dargestellt. Neben PFAS wurden je nach Matrix weitere begleitende Parameter in die Analytik aufgenommen, um grundlegende Informationen über die Bedingungen vor Ort zu erhalten: Donau (TOC, NO<sub>3</sub>-N, Cl, pH, Leitfähigkeit sowie Carbamazepin und Diclofenac bei Wien), Zubringer und Oberflächenabfluss (Leitfähigkeit und abfiltrierbare Stoffe), atmosphärische Deposition sowie Kläranlagenzu- und -ablauf (Leitfähigkeit) und Depo-niesickerwasser (TOC und Leitfähigkeit).

Neben den PFAS-Parametern, die im Rahmen des PROMISCES-Monitorings analysiert werden konnten, sind in Tab. 2 weiters dargestellt:

- 20 PFAS, die im Zuge der EU-TWR zu analysieren sind und für die ein

**Tab. 2** Parameterumfang des Labors der TU Wien mit Angabe der jeweiligen Bestimmungsgrenze (BG) im Vergleich mit dem Parameterumfang der EU-Trinkwasserrichtlinie zur Berechnung der  $\Sigma$ PFAS<sub>20</sub> (EU 2020) und des Entwurfs der EC zur Umweltqualitätsnormrichtlinie (UQNR) und der Grundwasserrichtlinie (GWR) zur Berechnung der PFOA-Toxizitätsäquivalente der  $\Sigma$ PFAS<sub>24</sub> (EK 2022) inklusive Gewichtungsfaktoren für die Umrechnung auf PFOA-Toxizitätsäquivalente

Parameter	CAS-Nummer	TU-Wien BG (ng/L) Fließgewässer, Uferfiltrat, Ober- flächenabfluss	TU-Wien BG (ng/L) KA-Zulauf	TU-Wien BG (ng/L) KA-Ablauf	TU-Wien BG (ng/L) Deponie- Sickerwas- ser	TU-Wien BG (ng/L) Grundwasser von Sickerwas- ser beeinflusst	TU-Wien BG (ng/L) Atmosphäri- sche Depositi- on	TWR ab 2026	UQNR + GWR Vorschlag Gewichtungs- faktoren
PFBA	375-22-4	0,6	7,3	1,1	9,4	1,4	0,6	x	0,05
PFPeA	2706-90-3	1,0	5,5	3,8	19	0,8	1,0	x	0,03
PFHxA	307-24-4	0,9	3,4	3,3	11	0,7	0,9	x	0,01
PFHpA	375-85-9	0,5	1,9	1,9	4,4	0,7	0,5	x	0,50
PFOA	335-67-1	1,0	0,7	0,7	2,5	1,1	1,0	x	1
PFNA	375-95-1	0,5	1,5	1,5	1,8	0,6	0,6	x	10
PFDA	335-76-2	0,8	0,3	0,3	0,4	0,5	1,2	x	7
PFUnDA	2058-94-8	1,6	1,8	1,8	1,7	0,6	1,4	x	4
PFDoDA	307-55-1	0,7	1,3	1,3	1,7	1,1	0,9	x	3
PFTTrDA	PFTTrDA	0,5	1	1	1,8	0,8	0,8	x	1,7
PFTeDA	376-06-7	1,7	1,3	1,3	2,0	1,0	1,0	–	0,3
PFHxDA	67905-19-5	–	–	–	–	–	–	–	0,02
PFODA	16517-11-6	–	–	–	–	–	–	–	0,02
PFBS	375-73-5	0,3	2,1	1,9	5,4	0,2	0,3	x	0,001
PFPeS	2706-91-4	0,6	1,3	0,6	4,3	0,2	1,0	x	0,30
PFHxS	355-46-4	0,15	1,1	1,1	11	0,4	0,15	x	0,6
PFHpS	375-92-8	0,3	0,6	0,6	1,1	0,4	0,4	x	1,3
PFOS	1763-23-1	0,25	1,5	1,2	1,4	0,4	0,25	x	2
PFNS	68259-12-1	0,15	0,4	0,4	0,15	0,4	0,3	x	–
PFDS	335-77-3	0,15	0,3	0,3	0,6	0,4	0,15	x	2
PFUnDS	749786- 16-1	–	–	–	–	–	–	x	–
PFDoDS	79780-39-5	–	–	–	–	–	–	x	–
PFTTrDS	174675- 49-1	–	–	–	–	–	–	x	–
GenX	13252-13-6	0,2	0,2	0,2	0,7	0,5	0,2	–	0,06
ADONA	958445- 44-8	0,1	0,4	0,4	0,3	0,5	0,1	–	0,03
6:2 FTOH	647-42-7	–	–	–	–	–	–	–	0,02
8:2 FTOH	678-39-7	–	–	–	–	–	–	–	0,04
C604	1190931- 27-1	–	–	–	–	–	–	–	0,06
4:2 FTS	757124- 72-4	0,25	1,5	1,5	1,0	0,6	1,1	–	–
6:2 FTS	27619-97-2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,6	0,4	–	–
8:2 FTS	39108-34-4	0,4	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	–	–
PFOSA	754-91-6	0,2	0,2	0,2	1,9	0,7	0,2	–	–
9Cl- PF30NS	73606-19-6	0,15	1	1	0,6	0,6	0,8	–	–
11Cl- PF30UdS	763051- 92-9	0,15	0,4	0,4	0,6	0,6	0,3	–	–
N-MeFO- SAA	2355-31-9	0,3	0,4	0,4	0,6	0,8	0,3	–	–
N-EtFOSAA	2991-50-6	0,3	0,6	0,6	0,7	0,8	0,5	–	–
N-MeFOSA	31506-32-8	0,3	1,4	1,4	2,1	1,6	1,0	–	–
N-EtFOSA	4151-50-2	0,35	1,2	1,2	1,3	0,8	0,9	–	–
N-MeFOSE	24448-09-7	0,15	1,2	1,2	1,0	0,6	0,9	–	–
N-EtFOSE	1691-99-2	0,15	1,6	1,6	1,1	0,7	1,2	–	–



**Abb. 2** Darstellung der Elemente eines Boxplots. (Wikipedia 2023b, by RobSeb, CC BY-SA 3.0)

Grenzwerte von insgesamt 100 ng/L einzuhalten sein wird,

- 24 PFAS zur Bestimmung der Summe der PFOA-Toxizitätsäquivalente mit Angabe der dazu zu verwendenden Gewichtungsfaktoren, wie sie im Vorschlag der EU-EQNR und EU-GWR enthaltenen sind.

Die Darstellung in Tab. 2 zeigt, dass von den 20 PFAS der TWR 17 im Monitoringprogramm von PROMISCES enthalten waren. Lediglich für PFUnDS, PFDoDS und PFTrDS fehlt die geeignete analytische Methode mit ausreichend genauer BG. Von den 24 PFAS des Vorschlags zur EQNR und zur GWR konnten 19 analytisch erfasst werden. Für PFHxDA, PFODA, 6:2 FTOH, 8:2 FTOH und C604 konnten die geeigneten analytischen Methoden im Zuge dieses Projektes noch nicht entwickelt werden.

## 2.2 Nutzung weiterer Datensätze

Um ein umfassenderes Bild der PFAS-Belastungen in unterschiedlichen Medien im oberen Donaueinzugsgebiet zu erhalten, wurden weitere Daten aus unterschiedlichen Quellen erhoben und in die Auswertungen mit einbezogen. In Österreich nimmt dabei das Sondermonitoring Grundwasser des Jahres 2022 im Zuge der GZÜV eine besondere Stellung ein. Näheres dazu wird im Beitrag von Brielmann et al. (2023, in diesem Heft) erläutert. Im Zuge des vorliegenden Artikels werden die Ergebnisse des Grundwassermonitorings beschränkt auf das Einzugsgebiet der oberen Donau summarisch als Referenz zu den Belastungen in anderen Umweltmedien dargestellt. Diese Daten konnten mit einem Datensatz des Landes Oberösterreich erweitert werden, welcher folgende PFAS enthält: PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA,

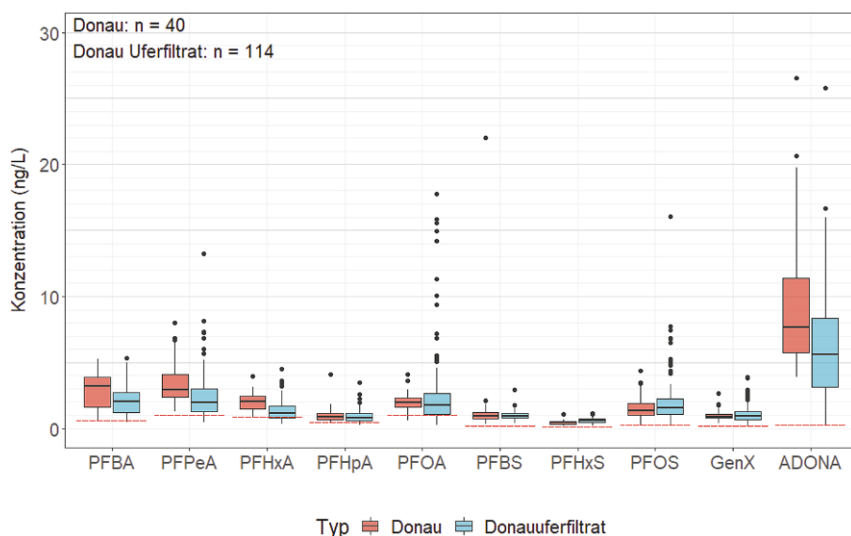
PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFTeDA, PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFUnDS, PFDoDS, PFTrDS, DONA, GenX, PFOSA, F-53B, 4:2-FTS, 6:2 FTS und 8:2 FTS (Umweltdaten des Landes Oberösterreich 2023). Eine umfassende regionale Studie wurde in Vorarlberg durchgeführt, wo an risikobasiert ausgewählten Standorten über 100 Proben aus unterschiedlichen Umweltmedien (Oberboden, Grundwasser, Abwasser, Deponiesickerwasser, Klärschlammkompost, atmosphärische Deposition) entnommen und auf eine Reihe von PFAS untersucht wurden. Hier wurden PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, ADONA, GenX, PFOSA, 4:2 FTS, 6:2 FTS, 8:2 FTS und F53-B analysiert (Umweltinstitut Vorarlberg 2021). Details zu diesen und weitergehenden PFAS-Untersuchungen in Vorarlberg werden von Humer und Scheffknecht (2023, in diesem Heft) vorgestellt. Im Zuge der in diesem Artikel dargestellten Ergebnisse wurde auch auf diese Daten zurückgegriffen. Zwar ist Vorarlberg kein Teil des Donaueinzugsgebiets, aber Daten zur atmosphärischen Deposition, zu Konzentrationen im Zu- und Ablauf kommunaler Kläranlagen und im Deponiesickerwasser können auch über die Einzugsgebietsgrenze hinaus als relevant angesehen werden. Neben diesen auf PFAS fokussierten Untersuchungen wurde im Rahmen des Projekts Danube Hazard m<sup>3</sup>c eine Datenbank zur gezielten Sammlung von Spurenstoffkonzentrationen in unterschiedlichen Medien als Grundlage für eine Spurenstoffemissionsmodellierung im Einzugsgebiet der Donau aufgebaut (Kittlaus et al. 2023; siehe auch Zoboli et al. 2023, in diesem Heft). Diese Datenbank sammelt Daten, die seit 2008 erhoben wurden, und enthält auch eine Reihe PFAS-bezogener Daten,

welche im Kontext dieser Publikation genutzt werden konnten. Dies betrifft vor allem Daten zu Zu- und Abläufen von kommunalen Kläranlagen, welche überwiegend in Österreich, Deutschland und Ungarn erhoben wurden.

## 2.3 Datenauswertung

Die Ergebnisdarstellung erfolgt in Form von Boxplots geordnet nach betrachtetem Medium und betrachtetem Parameter. „In einem Plot entspricht die zentrale Box dem Bereich, in dem die mittleren 50% der Daten liegen. Sie wird also durch das obere (75%-Perzentil) und das untere Quartil (25%-Perzentil) begrenzt, und die Länge der Box entspricht dem Interquartilsabstand (IQR). Dieser ist ein Maß der Streuung der Daten, welches durch die Differenz des oberen und unteren Quartils bestimmt wird. Des Weiteren wird der Median als durchgehender Strich in der Box eingezeichnet. Dieser Strich teilt das gesamte Diagramm in zwei Bereiche, in denen jeweils 50% der Daten liegen. Die Antennen, die aus der Box herausragen, werden auch als Whisker bezeichnet. Die Länge der Whisker ist auf das maximal 1,5-Fache des Interquartilsabstands ( $1,5 \times IQR$ ) zu beschränken. Dabei endet der Whisker jedoch nicht genau nach dieser Länge, sondern bei dem Wert aus den Daten, der noch innerhalb dieser Grenze liegt. Die Länge der Whisker wird also durch die Datenwerte und nicht allein durch den Interquartilsabstand bestimmt. Gibt es keine Werte außerhalb der Grenze von  $1,5 \times IQR$ , wird die Länge des Whiskers durch den maximalen und minimalen Wert festgelegt. Andernfalls werden die Werte außerhalb der Whisker separat als Punkte in das Diagramm eingetragen.“ (Wikipedia 2023a) In Abb. 2 ist ein entsprechender Boxplot dargestellt. Dabei werden Werte außerhalb der Whisker als „Ausreißer“ bezeichnet.

Ergebnisse einer Spurenstoffanalytik weisen häufig Messwerte unter der Bestimmungsgrenze auf. Ein Umgang mit solchen Ergebnissen ist für eine quantitative Auswertung und Interpretation von großer Bedeutung. Bei der vorliegenden Auswertung zur Erstellung der Boxplots wurde für den Umgang mit Werten unter der Bestimmungsgrenze die Methode der „Regression on Order Statistics“ (ROS) nach Helsel (2011) gewählt. Für diese Methode ist es erforderlich, dass für jeden getrennt



**Abb. 3** PFAS-Konzentrationen in Donau und Donauuferfiltrat dargestellt als Boxplots (siehe auch Abschn. 2.3). Die Daten stammen zur Gänze aus dem Monitoring des PROMISCES-Projekts. Rote Linien stellen die jeweilige Bestimmungsgrenze des Parameters dar (siehe auch Tab. 2)

ausgewerteten Datensatz zumindest drei bzw. 20 % der Messwerte über der Bestimmungsgrenze liegen. Unter Annahme einer Verteilungsfunktion (hier logarithmische Normalverteilung) für diesen Datensatz können dann über diese Daten die Parameter der Verteilungsfunktion abgeleitet und für diese Verteilung die Werte wie Median oder Quantile geschätzt werden. Für die Ergebnisdarstellung von Einzelparametern wurden im Weiteren daher nur jene PFAS-Parameter dargestellt, für die im jeweiligen Medium zumindest drei bzw. 20 % der Messwerte über der Bestimmungsgrenze lagen.

Am Ende der Ergebnisdarstellung wird die Summe der PFAS<sub>20</sub> (TWR) bzw. der PFAS<sub>24</sub> (UQNR und GWR) entsprechend den Angaben in Tab. 2 berechnet. In diese Berechnung wurden nur jene Analyseergebnisse einbezogen, wo zumindest 8 Einzelparameter aus der jeweiligen Richtlinie analysiert wurden. Für die Umsetzung der Berechnung werden dann alle PFAS, die in der jeweiligen Richtlinie zur Summenbildung gelistet sind, in die Berechnung mit einbezogen, sofern Messwerte > BG vorhanden sind. Messwerte unter BG bzw. Parameter, für die keine Messwerte vorliegen, werden nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass die dargestellten Ergebnisse als „best case“-Szenario zu verstehen sind, da nicht berücksichtigte Parameter eine Rolle spielen. Speziell bei der Berechnung der Summe der PFAS<sub>24</sub>

kann es zu deutlichen Unterbefunden kommen. Zwar sind alle Parameter mit hohen Gewichtungsfaktoren im Analysenumfang enthalten, aber es kann ein Wert eines Parameters < BG mit einem hohen Gewichtungsfaktor für die Summenbildung eine relevante Rolle spielen. Als Beispiel sei PFNA erwähnt, wo bei einem Gewichtungsfaktor von 10 und einer BG von z. B. 1,5 ng/L ein als < BG ausgewiesener Wert in der Summenbildung mit bis zu 15 ng/L – das ist mehr als das Dreifache des vorgeschlagenen Grenzwerts – zu Buche schlagen könnte, im gewählten „best case“-Szenario aber nicht berücksichtigt wird.

### 3 Ergebnisse

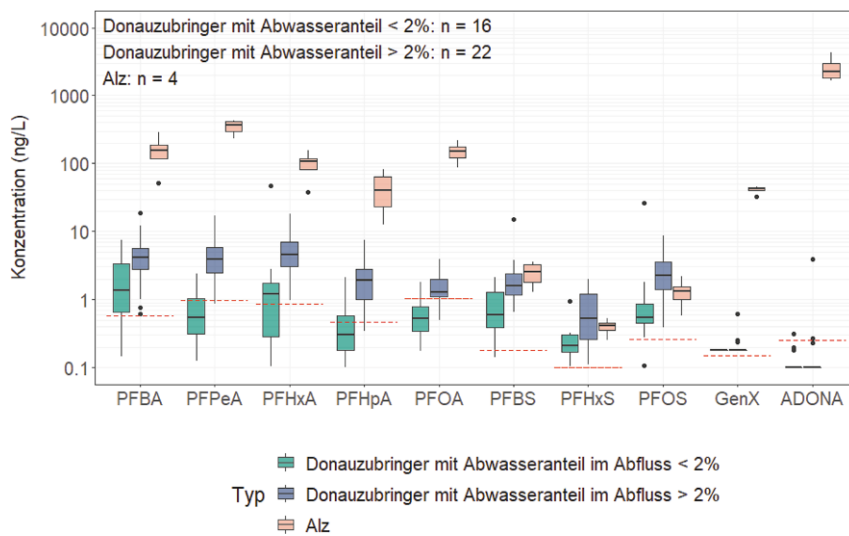
#### 3.1 Konzentrationen in unterschiedlichen Medien

In der Donau im Bereich von Wien und Budapest werden in einem Großteil der Proben PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFBS, PFHxS und PFOS aber auch GenX und ADONA zumeist über der jeweiligen Bestimmungsgrenze gefunden (Abb. 3). In Einzelfällen liegen auch PFNA und PFDS über der Bestimmungsgrenze, allerdings in weniger als 20 % der Fälle, und sind daher in der Abbildung nicht dargestellt. Die Summe der Einzelsubstanzen mit Werten > BG liegt bei 20–30 ng/L. Der größte Anteil ist dabei mit im Mittel ca. 10 ng/L auf ADONA zurückzuführen. Das Uferfiltrat

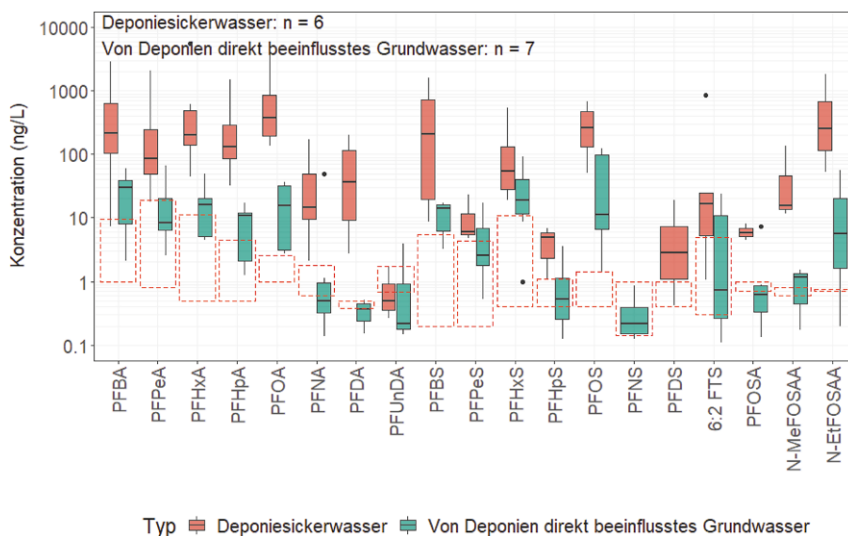
im direkten Einflussbereich der Donau weist für die meisten Parameter sehr ähnliche Konzentrationen wie die Donau selbst auf. Bei kurzen Aufenthaltszeiten im Bereich von Tagen dürften Rückhalte-mechanismen der Uferfiltration für die untersuchten PFAS eine geringe Rolle spielen. Nähere Überlegungen dazu werden bei Obeid et al. (2023. In diesem Heft) dargestellt.

Die Ergebnisse der Donauzubringer werden in drei Kategorien dargestellt (Abb. 4). Die geringer belasteten Zubringer sind jene, bei denen der Anteil an gereinigtem kommunalen Abwasser im Abfluss im Jahresmittel unter 2 % liegt (siehe Tab. 1). Dazu gehören im genutzten Datensatz der Inn, die Traun und der Ipoly in der Slowakei. 4 bis 12 % kommunales Abwasser im Abfluss weisen Isar, Raab, obere Thaya, Svratka (Tschechische Republik) und die March vor dem Zufluss der Thaya auf und wurden ebenfalls in einer Gruppe von Donauzubringern zusammengefasst. Vom Anteil des kommunalen Abwassers am Gesamtabfluss würde die Alz, ein bayerischer Zubringer zum Inn, ebenfalls zu dieser Kategorie zählen. Sie wurde jedoch gesondert dargestellt, da an der Alz ein wesentlicher PFAS-Emittent bekannt ist. In geringer belasteten Donauzubringern wurden zumeist nur die kurz- und mittelkettigen Carbonsäuren PFBA, PFPeA, PFHxA und PFHpA fallweise sowie aufgrund der geringeren Bestimmungsgrenzen durchgehend die Sulfonsäure PFBS, PFHxS und PFOS in messbaren Konzentrationen gefunden. Im Median liegen die Einzelparameter um 1 ng/L und darunter. Die Summe aller über BG gefundenen Parameter liegt hier bei ca. 2–6 ng/L. In etwas stärker belasteten Fließgewässern treten zudem fallweise PFNA sowie die Vorläufersubstanz 6:2-Fluortelomersulfonsäure (6:2 FTS) in messbaren Konzentrationen, allerdings in weniger als 20 % der Proben, auf. Die Summe der Einzelsubstanzen bewegt sich dabei zumeist in einem Bereich von 10–50 ng/L. Eine Ausnahme bildet die schon erwähnte Alz. Hier werden alle Carbonsäuren bis zu einer Kettenlänge von 11 C sowie GenX und ADONA in teilweise sehr hohen Konzentrationen gefunden. Die Summe der Einzelsubstanzen erreicht 3000–5000 ng/L, wobei der größte Anteil davon auf die Substanz ADONA zurückzuführen ist, welche als Ersatzstoff für PFOA im Einsatz ist.

Die meisten Einzelstoffe und die höchsten Gesamtkonzentrationen bei



**Abb. 4** PFAS-Konzentrationen in Donauzubringern in Abhängigkeit von deren Anteilen an gereinigtem Abwasser im Abfluss. Die Alz als Hotspot einer PFAS-Belastung ist gesondert dargestellt. Aufgrund der großen Spannweite der auftretenden Konzentrationen ist die y-Achse im logarithmischen Maßstab dargestellt. Die Daten stammen zur Gänze aus dem Monitoring des PROMISCES-Projekts. Rote Linien stellen die jeweilige Bestimmungsgrenze des Parameters dar (siehe auch Tab. 2)



**Abb. 5** PFAS-Konzentrationen im Sickerwasser von alten Hausmülldeponien und im direkt von entsprechenden Deponien beeinflussten Grundwasser. Aufgrund der Verwendung von Daten mit unterschiedlichen Bestimmungsgrenzen ist der Bereich der auftretenden Bestimmungsgrenzen als rote strichlierte Box dargestellt. Datenquellen: eigene Analysen in PROMISCES (2023) und Umweltinstitut Vorarlberg (2021)

den untersuchten Emittenten (Summe aller PFAS > 1000 ng/L) wurden im Deponiesickerwasser gemessen. In Abb. 5 sind jene 19 Parameter im Sickerwasser mit mehr als 3 Werten über der Bestimmungsgrenze dargestellt. Neben den in den Gewässern häufig gemessenen Parametern sind hier auch PFPeS, 6:2 FTS und N-EtFOSAA enthalten. Die höchsten Werte wurden für PFOA,

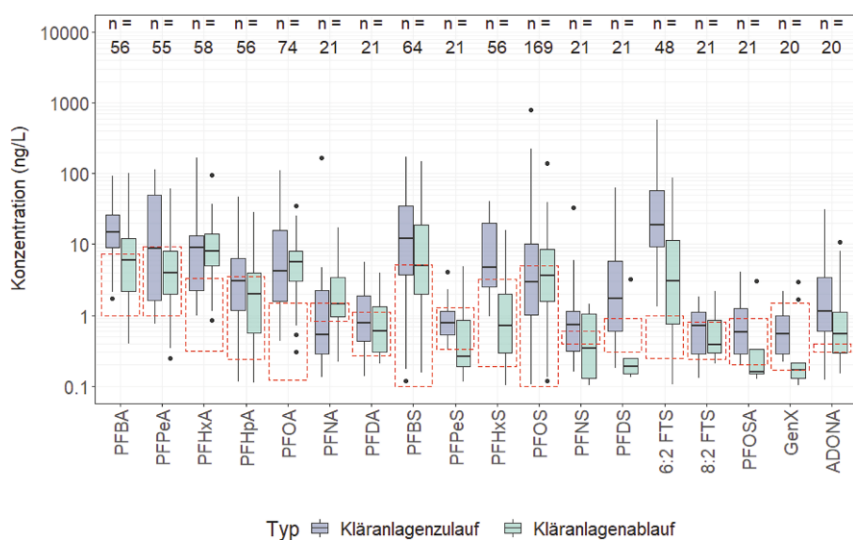
PFOS aber auch bei N-EtFOSAA gemessen. Während PFOA und PFOS schon länger untersucht werden und in allen Medien regelmäßig gefunden werden, ist das Auftreten von N-EtFOSAA in den bisherigen Ergebnissen auf Deponiesickerwasser und durch solches beeinflusstes Grundwasser beschränkt. In weiteren Untersuchungen könnte daher überlegt werden, N-EtFOSAA

als Indikatorsubstanz für eine Beeinflussung durch Sickerwasser aus alten Hausmülldeponien zu nutzen. So wird diese Substanz auch in einer kommunalen Kläranlage gefunden, in die eine alte Hausmülldeponie ihr Sickerwasser als Indirekteinleiter einleitet.

Eine ähnliche Anzahl von Einzelsubstanzen, allerdings mit geringeren Konzentrationen, wurde in Zulauf- und Ablaufproben von kommunalen und industriellen Kläranlagen gefunden. Die Summen der Einzelsubstanzen lagen dabei zumeist zwischen 50 und 200 ng/L. Zu den PFAS mit den höchsten Konzentrationen im Abwasser (um 10 ng/L) gehören neben den kurzkettingen Carbonsäuren (PFBA bis PFHxA) auch die Sulfonsäuren PFBS und PFOS sowie 6:2 FTS (Abb. 6). Während die Carbon- und Sulfonsäuren auch in anderen Medien häufig auftreten, ist das bei 6:2 FTS nicht der Fall. Lediglich in den höher mit kommunalem Abwasser belasteten Gewässern wurde auch diese Substanz fallweise gefunden. 6:2 FTS gilt als Ersatzstoff für das im Einsatz verbotene PFOS und wird fallweise zu den sogenannten Vorläufersubstanzen gezählt. Vorläufersubstanzen sind PFAS, die in Produkten im Einsatz sind und sich unter Umweltbedingungen in weiterer Folge zu Carbon- bzw. Sulfonsäuren umwandeln können. Teilweise geringe Unterschiede zwischen Zulauf- und Ablaufkonzentrationen lassen auf eine geringe Entfernungsleistung der Kläranlagen für PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA und PFOS schließen. Für andere Parameter wie z. B. 6:2 FTS deuten die Ergebnisse auf eine Reduktion bei der Abwasserreinigung hin. Teilweise können PFAS bei der Abwasserreinigung auch aus Vorläufersubstanzen gebildet werden, womit auch ein Anstieg bei der Abwasserreinigung nicht auszuschließen ist (z. B. PFOA und PFOS). Belastungen der Kläranlagenabläufe in einem ähnlichen Schwankungsbereich wurden bisher bei kommunalen und industriellen Kläranlagen gefunden (Abb. 7). Weitere Untersuchungen werden sich auf mögliche Unterscheidungen zwischen Industriesparten fokussieren.

### 3.2 Vergleich unterschiedlicher Medien

Beispielhaft sind in Abb. 8 die PFAS-Konzentrationen von PFOA, ADONA und PFOS im Vergleich zwischen den unterschiedlichen untersuchten Medien dargestellt. PFOA zeigt dabei ver-



**Abb. 6** PFAS-Konzentrationen im Zulauf und Ablauf kommunaler und industrieller Kläranlagen. Es wurden nur jene Kläranlagen in die Darstellung aufgenommen, wo sowohl im Zulauf als auch im Ablauf korrespondierende Daten vorliegen. Aufgrund der Verwendung von Daten mit unterschiedlichen Bestimmungsgrenzen ist der Bereich der auftretenden Bestimmungsgrenzen als rote strichlierte Box dargestellt. (Quellen: PROMISCES 2023; Kittlaus et al. 2023 unter Verwendung der Daten von Clara et al. 2017, 2019; Nickel et al. 2021; Alygizakis et al. 2021)

gleichbare Ergebnisse wie die anderen Carbonsäuren mit einer Kettenlänge von bis zu 8 C (PFBA, PFPeA, PFHpA und PFHxA). Wenige bis keine positiven Befunde in den Zubringern zur Donau mit geringem Abwasseranteil, Konzentrationen in den Zubringern mit höherem Abwasseranteil im Bereich von wenigen ng/L. Dies kann als Indiz gewertet werden, dass Siedlungsgebiete deutlich zu den Belastungen dieser PFAS beitragen. Die Konzentrationen im Ablauf von Kläranlagen liegen etwa um einen Faktor von 4 bis 5 über den Konzentrationen in den stärker Abwasser-belasteten Zubringern, womit Kläranlagen zwar eindeutig relevante Eintragspfade in die Gewässer sind (siehe auch Kittlaus et al. 2022), die Abwasseremissionen alleine aber die Konzentrationen in diesen Zubringern bei Abwasseranteilen von 4 bis 12% (siehe Tab. 1) und damit verbundenen Verdünnungsfaktoren von 8 bis 25 nicht erklären können. Sickerwasser von alten Hausmülldeponien weist Konzentrationen auf, die noch einmal um einen Faktor bis zu 40 höher sind als im kommunalen Abwasser. Aufgrund der fehlenden Information zu Wassermengen und Eintragspfaden ist eine Abschätzung der Relevanz dieses Herkunftsbereichs auf Einzugsgebietsebene bisher nicht möglich. Im Grundwasser treten Konzentrationen

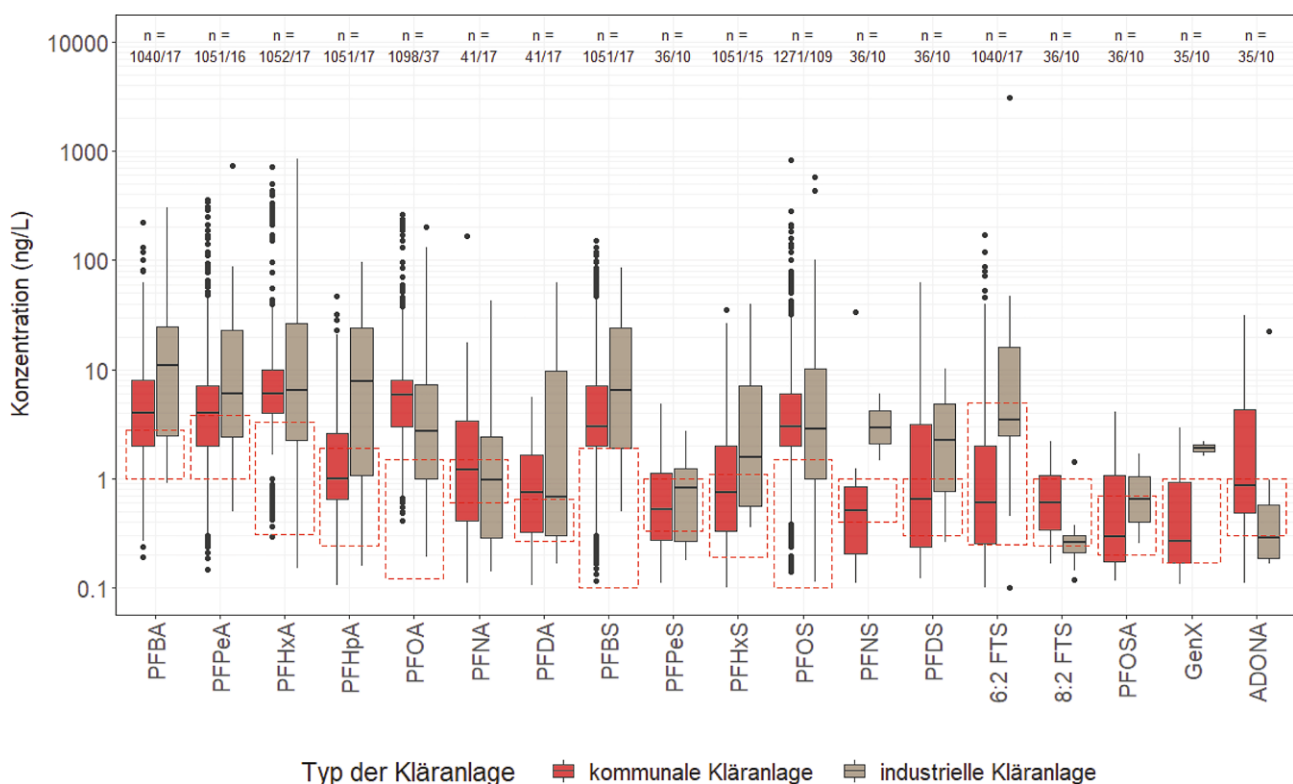
auf, die vielfach unter 1 ng/L und damit oft auch unter der Nachweisgrenze liegen. Fallweise Ausreißer mit hohen Konzentrationen, wie sie auch im Bereich von durch Deponiesickerwasser beeinflusstem Grundwasser gefunden werden, deuten auf lokale bis regionale Hotspot-Bereiche hin. Näheres dazu ist auch bei Briellmann et al. (2023, in diesem Heft) zu finden. Ob diese Bereiche auch überregional eine Bedeutung haben, wäre erst durch weitere Untersuchungen zu prüfen. Besonders auffällig sind die sehr hohen Konzentrationen in der Alz. Diese liegen um einen Faktor 20 bis 100 (je nach betrachteter Carbonsäure) über jenen in den stärker abwasserbelasteten Donauzubringern. In der Donau liegen die Carbonsäuren jeweils im Bereich der oder leicht über den Konzentrationen der stärker abwasserbelasteten Zubringer, obwohl die Donau bei Wien und Budapest eine vergleichsweise geringe Abwasserbelastung aufweist (siehe Tab. 1). Im Vergleich mit der Alz sind die Konzentrationen der Donau bei den Carbonsäuren mit 4 bis 8 C Kettenlänge um einen Faktor 40 bis 80 niedriger. Berücksichtigt man den Verdünnungsfaktor zwischen Donau (bei Budapest) und Alz von 185 (Tab. 1) sieht man, dass die Konzentrationen in der Donau alleine durch die Fracht in der Alz nicht erklärt werden können. Emissionen aus

Siedlungsgebieten und allenfalls auch von Deponiealtlasten, anderen regionalen Hotspots und sonstigen bisher nicht bekannten (diffusen) Pfaden tragen ebenfalls zur Belastung der Donau bei.

Einen Sonderfall stellt ADONA dar (Abb. 8), wobei sich für GenX auf einem geringeren Konzentrationsniveau Ähnliches ableiten lässt. In keinem der potenziellen Eintragspfade (Kläranlagenabläufe, Sickerwasser aus alten Hausmülldeponien, Oberflächenabfluss oder Grundwasser) werden Konzentrationen gemessen, die über jenen in der Donau liegen. Meist liegen die Konzentrationen in diesen Medien deutlich unter 1 ng/L oder auch unter der für diese Substanzen sehr niedrigen Nachweisgrenze von 0,1 ng/L. Lediglich in der Alz treten sehr hohe ADONA-Konzentrationen von ca. 2000 bis 4000 ng/L auf. An der Alz liegt mit dem Chemiepark Gendorf ein bekannter PFAS-Emittent (Ulrich et al. 2019; Kittlaus et al. 2022). Seit 2008 wurde in der Produktion PFOA durch ADONA ersetzt. Während für die Carbonsäuren (siehe oben) der Chemiepark heute einen von mehreren Verursachern darstellt, dürften für ADONA nach heutigem Kenntnisstand die Emissionen aus diesem Bereich die Belastung der Donau im Bereich von Wien und Budapest dominieren. So liegen die Konzentrationen in der Alz um mehr als einen Faktor 200 über jenen in der Donau. Der mittlere Verdünnungsfaktor zwischen Donau und Alz beträgt dagegen rund 180, womit eine für die Alz abgeschätzte Fracht (1,2 t/a) höher liegt als jene in der Donau (0,8 t/a). Hier stellt sich damit auch die Frage, welche Rolle Ab- und Umbauprozesse auf der Fließstrecke spielen, die im Weiteren zu untersuchen sein wird.

Die Situation für PFOS (und für die ebenfalls vielfach über der Bestimmungsgrenze messbaren Sulfonsäuren PFBS und PFHxS) stellt sich wiederum anders dar, da die Konzentrationen in der Alz im Bereich der anderen Zubringer liegen und der Chemiepark Gendorf als Emittent keine relevante Rolle spielt. Wie von Kittlaus et al. (2022) gezeigt, sind es auch hier Kläranlagenabläufe, die eine Rolle spielen können. Zusätzlich weisen, wie auch bei den Carbonsäuren, das Sickerwasser von Altlasten (Hausmülldeponien) und in Einzelfällen durch lokale Hotspots belastete Grundwasserkörper Konzentrationen auf, die das Potenzial haben, eine rele-





**Abb. 7** PFAS-Konzentrationen im Ablauf kommunaler und industrieller Kläranlagen. Aufgrund der Verwendung von Daten mit unterschiedlichen Bestimmungsgrenzen ist der Bereich der auftretenden Bestimmungsgrenzen als rote strichlierte Box dargestellt. (Quellen: PROMISCES 2023; Kittlaus et al. 2023 unter Verwendung der Daten von Clara et al. 2017, 2019; Umweltinstitut Vorarlberg 2021; Nickel et al. 2021; Alygizakis et al. 2021)

vante regionale bis überregionale Rolle für die Gewässerbelastung zu spielen.

### 3.3 Vergleich mit Qualitätszielen

In der aktuellen Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer ist von den PFAS nur PFOS mit einer wasserbezogenen Jahresdurchschnittsumweltqualitätsnorm (JD-UQN) von 0,65 ng/L und einer Biota-UQN von 9,1 µg/kg Feuchtmasse geregelt. Aus Abb. 8 wird klar, dass die wasserbezogene JD-UQN lediglich in den gering abwasserbelasteten Zubringern zur Donau vielfach unterschritten wird. In den stärker belasteten Zubringern und in der Donau selber liegen die Messwerte fast durchwegs höher als diese UQN. Eine Zielverfehlung muss das nicht bedeuten, da in Österreich alternativ dazu die Biota-UQN zur Bewertung herangezogen wird, die ein weniger strenges Schutzziel darstellt (BMLNT 2022).

Wie bereits in Kap. 1 erwähnt, ist ab 2026 nach EU-Trinkwasserrichtlinie ein Grenzwert von 100 ng/L für die Summe von 20 PFAS einzuhalten (siehe auch Tab. 2). Zieht man diesen Grenzwert

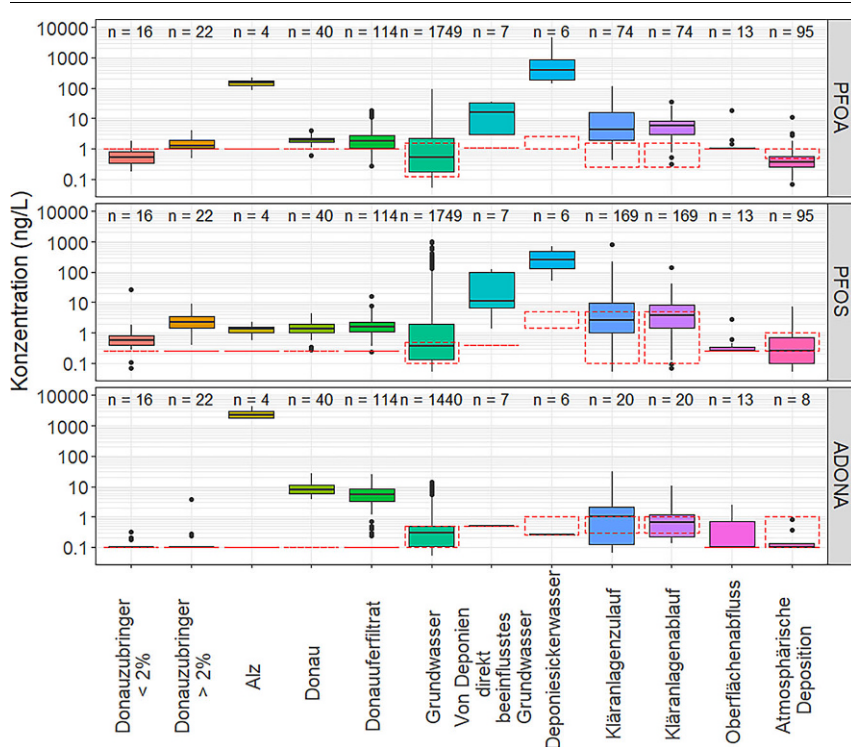
heran, weisen die hier durchgeführten Untersuchungen kein Risiko einer Verfehlung im durch die Donau direkt beeinflussten Uferfiltrat auf. Auch unter Berücksichtigung, dass es sich bei den in Abb. 9 dargestellten Werten für die Summe der 20 PFAS um „best case“-Auswertungen handelt (siehe auch Abschn. 2.3), ist in der Donau und im Donauuferfiltrat genug Puffer gegeben, sodass eine Überschreitung dieses Zielwerts unwahrscheinlich ist. Auch für die überwiegende Anzahl der untersuchten Grundwassermessstellen ist von einer Einhaltung der Vorgaben der Trinkwasserrichtlinie von 100 ng/L für die Summe aus 20 PFAS auszugehen. Lediglich in von regionalen Hotspots oder Sickerwasser aus Hausmülldeponien beeinflussten Grundwasserbereichen ist mit einer Überschreitung der Vorgaben der EU-Trinkwasserrichtlinie zu rechnen.

Sollte in Zukunft die auf Basis der TWI-Werte der EFSA vorgeschlagene Umwelt- und Grundwasserqualitätsnorm (4,4 ng/L als PFOA-Toxizitätsäquivalent, EK 2022) zum Tragen kommen, würde die Situation deutlich anders

aussehen. Selbst in dem in Abb. 9 dargestellten „best case“-Szenario würden nur in den gering abwasserbeeinflussten Zubringern und in etwas mehr als der Hälfte der Grundwassermessstellen die Vorgaben eingehalten werden. In stärker abwasserbeeinflussten Gewässern, in der Donau, aber auch im Donauuferfiltrat würde es nach derzeitigem Kenntnisstand durchwegs zu einer Verfehlung dieser Vorgaben kommen. Wie sich die Anforderungen hier tatsächlich entwickeln werden, ist derzeit noch nicht abzusehen.

## 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Zuge der hier dargestellten Untersuchungen wurden 32 PFAS-Einzelsubstanzen in unterschiedlichen Medien mit Nachweisgrenzen zumeist um 1 ng/L und darunter analysiert. Nur im Deponiesickerwasser und im Kläranlagen-Zulauf lagen die Bestimmungsgrenzen mit bis zu 10 ng/L teilweise deutlich höher. Durch die Nutzung von Daten aus anderen Untersuchungspro-



**Abb. 8** Vergleich der PFOA-, PFOS- und ADONA-Konzentrationen in unterschiedlichen Medien. Aufgrund der Verwendung von Daten mit unterschiedlichen Bestimmungsgrenzen ist der Bereich der auftretenden Bestimmungsgrenzen als rote strichlierte Box dargestellt. (Quellen: PROMISCES 2023; Kittlaus et al. 2023 unter Verwendung der Daten von Clara et al. 2014, 2017, 2019; Lenz et al. 2020; Umweltinstitut Vorarlberg 2021; Nickel et al. 2021; Alygizakis et al. 2021 sowie Umweltdaten des Landes Oberösterreich 2023; BML 2023)

grammen konnte die Datenbasis weiter verstärkt werden.

Von den 32 untersuchten PFAS wurden PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFBS, PFHxS und PFOS in den meisten der untersuchten Medien regelmäßig über der Bestimmungsgrenze gefunden. In den untersuchten Medien wurden im Deponiesickerwasser alter Hausmülldeponien mit 19 die meisten der untersuchten Einzelsubstanzen in mehr als 20% der Analysen über der BG gefunden.

Im Deponiesickerwasser lag die Summe der über der Bestimmungsgrenze analysierten PFAS bei mehr als 1000 ng/L. Die Substanz N-EtFOSAA wurde nur im Sickerwasser und im Zu- und Ablauf einer Kläranlage mit Sickerwassereinfluss gefunden. Auftretende N-EtFOSAA-Konzentrationen im Sickerwasser lagen bei bis zu 1000 ng/L. Diese Substanz könnte daher in Zukunft als Indikator für einen Einfluss von Sickerwasser von Hausmülldeponie-Altlasten in Betracht gezogen werden.

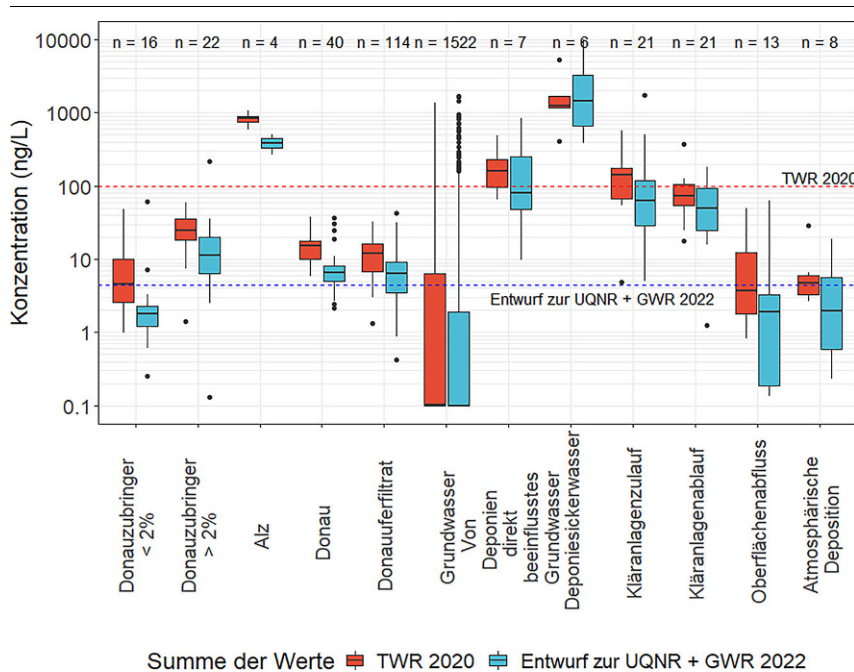
Im Kläranlagenablauf wurden ähnlich viele Einzelsubstanzen regelmäßig gefunden, wobei 6:2 FTS als Ersatzstoff für PFOS einen typischen PFAS-Vertreter im Abwasser darstellt. Die Konzentrationen der Einzelsubstanzen können beträchtlich schwanken und liegen meist im Bereich von wenigen n/L bis einigen zig n/L und damit deutlich geringer als im Sickerwasser. Die Summe der Einzelsubstanzen liegt zumeist in einem Bereich von etwa 50–200 ng/L.

Die am meisten gefundenen PFAS PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFBS, PFHxS und PFOS sind auch in gering über Abwasser belasteten Donauzubringern (Abwasseranteil im Abfluss <2%) immer wieder messbar, wobei der Medianwert bei 1 ng/L und darunter liegt. Die Summe der PFAS liegt hier im Bereich von ca. 2–6 ng/L. In höher mit Abwasser belasteten Donauzubringern (Abwasseranteil im Abfluss >2%) liegen diese Parameter zumeist etwas höher und im Bereich von einigen ng/L, zusätzlich werden fallweise

PFNA und 6:2 FTS gefunden. Die Summe der über BG gefundenen Parameter liegt zumeist bei etwa 10–50 ng/L. Die Konzentrationen in der Donau und im Donauuferfiltrat liegen in einem ähnlichen Bereich wie bei den höher belasteten Zubringern, zusätzlich wird aber ADONA und GenX in messbaren Konzentrationen gefunden. Die Summe der bestimmbareren PFAS liegt in der Donau im Bereich von 20–30 ng/L, wobei ADONA diese Konzentrationen mit rund 10 ng/L dominiert. Ein deutlicher Hotspot der PFAS-Belastung ist die Alz. Es treten erhöhte Konzentrationen bei allen Carbonsäuren (4C–11C) sowie ADONA und GenX auf. Ursache dürfte der Chemiepark bei Gendorf sein, eine bereits seit längerem bekannte PFAS-Quelle. 2008 wurde in der Produktion von PFOA auf ADONA umgestellt.

Durch hohe Persistenz der PFAS ist teilweise keine oder nur eine geringe Wirksamkeit von Barrieren zu erkennen. Sowohl die biologische Abwasserreinigung als auch die Uferfiltration führen für einige Parameter zu keiner Verringerung der Konzentrationen. Ins Abwasser oder an die Umwelt abgegebenen PFAS sind schwer wieder zu entfernen. Damit wird die Bedeutung von Vermeidungsmaßnahmen bei deren Einsatz unterstrichen. Die Wasser JD-UQN der QZV-Chemie wird für PFOS in den untersuchten Flüssen mit einem Abwasseranteil von mehr als 2% vielfach überschritten. Dies wird allerdings nicht durch die Biota-UQN bestätigt, da Wasser JD-UQN und Biota-UQN im Schutzniveau nicht korrespondieren. Für den Parameterwert der EU-Trinkwasserrichtlinie wurden im Uferfiltrat der Donau keine Hinweise auf mögliche Überschreitungen gefunden. Die vorgeschlagenen Qualitätsnormen der Umweltqualitätsnormen-Richtlinie und der Grundwasserrichtlinie, welche auf dem TWI der EFSA basieren, weisen ein wesentlich höheres Schutzniveau auf und würden voraussichtlich in vielen Fließgewässern, aber auch in einigen Grundwasserbereichen und im Donauuferfiltrat nicht eingehalten werden können, falls entsprechende Regelungen in Kraft treten sollten.

Weitere Untersuchungen im Rahmen des PROMISCES-Projekts werden sich mit der Emissionsmodellierung von PFAS beschäftigen, um die Gewässerbelastungen quantitativ auf ihre Herkunftsbereiche und Eintragspfade zurückführen zu können. Bereits jetzt



**Abb. 9** Vergleich der Summe von 20 PFAS (TWR) und der Summen der Toxizitätsäquivalente der 24 PFAS (Entwurf zur UQNR und GWR) in unterschiedlichen Medien mit den jeweiligen Vorgaben von 100 ng/L bzw. 4,4 ng PFOA-Toxizitätsäquivalente/L. Aufgrund der Verwendung von Daten mit unterschiedlichen Bestimmungsgrenzen ist der Bereich der auftretenden Bestimmungsgrenzen als rote strichlierte Box dargestellt. (Quellen: PROMISCES 2023; Umweltinstitut Vorarlberg 2021; Umweltdaten des Landes Oberösterreich 2023 und BML 2023)

lassen sich diesbezügliche einige semi-quantitative Aussagen machen. Ein zu beachtender Herkunftsbereich für Carbonsäuren, ADONA und GenX im Einzugsgebiet der oberen Donau ist der Chemiapark Gendorf an der Alz. Dies gilt vor allem für ADONA, wo die Emissionen aus diesem Bereich die Belastung der Donau dominieren dürften. Auch Siedlungsgebiete und Ballungsräume spielen bei der Belastung von Fließgewässern und Donau bei den gefundenen Carbon- und Sulfonsäuren eine relevante Rolle. Wichtig sind dabei Kläranlagenabläufe, daneben könnten aber auch andere Eintragspfade eine

Rolle spielen. So kommt Altlasten von Hausmülldeponien ein gewisses Potenzial als PFAS-Emittenten zu. Andere Hotspots, die zu Grundwasserbelastungen führen können, sind Übungsplätze der Feuerwehr z.B. im Kontext von Flughäfen (siehe auch Briemann et al. 2023, in diesem Heft). Welche Rolle solche lokalen bzw. regionalen Hotspots des Grundwassers auch auf Ebene von Flussgebieten haben können, muss erst in weiteren Untersuchungen betrachtet werden.

**Danksagung** Die vorliegende Arbeit wurde durch das Horizon-2020-Pro-

gramm der Europäischen Union im Rahmen des Projekts PROMISCES mit der Förderzusagenummer 101036449 gefördert. Wir danken folgenden Institutionen für die Unterstützung bei der Probenahme an natürlichen Gewässern: WWA Traunstein, WWA Landshut, Büro blattfisch e.U., UBA Wien sowie allen Betreibern von Kläranlagen und Deponien, die uns die Proben für die vorliegenden Untersuchungen zur Verfügung gestellt haben.

**Funding** Open access funding provided by TU Wien (TUW).

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Literatur

Alygizakis N. et al. (2021): Chapter 29. Wide-scope target screening of industrial chemicals and plant protection products in wastewater, groundwater, river water, sediments and biota by liquid and gas chromatography coupled with high-resolution mass spectrometry. In Joint Danube Survey 4 : a comprehensive analysis of Danube water quality. ISBN:978-3-200-07450-7. 2021: Vienna, Austria.

BML (2023): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft, H<sub>2</sub>O Fachdatenbank, Grundwasserkörperab-

frage, <https://wasser.umweltbundesamt.at/h2odb/>. Zugegriffen: 01.06.2023.

BMLRT (2022): Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2021 (GZ 2022-0.270.788). Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus. Wien, Österreich. [https://info.bml.gv.at/dam/jcr:33fd41a6-2eab-4a17-8551-ce32d131bb68/NGP%202021\\_Endversion\\_gbs.pdf](https://info.bml.gv.at/dam/jcr:33fd41a6-2eab-4a17-8551-ce32d131bb68/NGP%202021_Endversion_gbs.pdf). Zugegriffen: 16.06.2023.

Briemann H., Döberl G., Weiß St., Grath J. (2023): PFAS in Österreichs Grundwasser: Verbreitung, Bewertung und Rolle von Altstandorten als potenzielle Quellen, Österreichische

Wasser- und Abfallwirtschaft, 75 (9–10) (in diesem Heft)

Clara M., Ertl T., Giselbrecht G., Gruber G., Hofer T., Humer F., Kretschmer E., Kolla L., Scheffknecht C., Weiß S. und Windhofer G. (2014): Spurenstoffemissionen aus Siedlungsgebieten und von Verkehrsflächen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien, Österreich.

Clara M., Lenz K., Spira Y., Weiß St. (2017): Emissionen ausgewählter prioritärer und sonstiger Stoffe aus kommunalen Kläranlagen. Bun-

- desministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMFLUW), Wien **Clara M., Amann A., Gabriel O., Hochedlinger G., Humer M., Humer F., Kittlaus K., Kulcsar S., Scheffknecht C., Trautvetter H., Zessner M. und Zoboli O. (2019):** STOBIMO Spurenstoffe, Stoffbilanzmodellierung für Spurenstoffe auf Einzugsgebietsebene, im Auftrag des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus, Endbericht.
- EEA (2023):** Waterbase—UWWTD: Urban Waste Water Treatment Directive—data reported in 2022, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/waterbase-uwtd-urban-waste-water-treatment-directive-9>. Zugriffen: 12.04.2023.
- EFSA (2020):** Scientific Opinion on the risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. EFSA Journal 2020;18(9): 6223, 391 pp. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>.
- EK (2019):** Der europäische Grüne Deal. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschaftsausschuss und den Ausschuss der Regionen. COM(2019) 640 final. 11.12.2019, Brüssel, Belgien. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>. Zugriffen: 01.06.2023.
- EK (2020):** Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen; Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa, Brüssel, den 11.03.2020, COM(2020) 98 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098>. Zugriffen: 01.06.2023.
- EK (2022):** Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, der Richtlinie 2006/118/EG zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung und der Richtlinie 2008/105/EG über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik. COM(2022) 540 final. 26.10.2022, Brüssel, Belgien. [content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0540&qid=1678104696984](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0540&qid=1678104696984).
- EPA, E.P.A. (2022):** 3rd Draft Method 1633 Analysis of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Aqueous, Solid, Biosolids, and Tissue Samples by LC-MS/MS.
- EU (2020) EU-Richtlinie 2020/2184 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Neufassung)
- Fuchs S., Kaiser M., Kiemle L., Kittlaus S., Rothvoß S., Toshovski S et al. (2017):** Modeling of Regionalized Emissions (MoRE) into Water Bodies: An Open-Source River Basin Management System. Water 2017;9(4):239.
- Helsel, D.R. (2011):** Statistics for censored environmental data using Minitab and R, 77. John Wiley & Sons.
- Humer M. und Scheffknecht Ch. (2023):** Herkunft, Verbreitung und Verbleib von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Vorarlbergs Umwelt, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 75 (9–10) (in diesem Heft)
- Kittlaus S., Clara M., van Gils J., Gabriel O., Broer M. B., Hochedlinger G., Trautvetter H., Hepp G., Krampe J., Zessner M., Zoboli O. (2022):** Coupling a pathway-oriented approach with tailor-made monitoring as key to well-performing regionalized modelling of PFAS emissions and river concentrations. Science of The Total Environment, 849 2022, 157764
- Kittlaus S., Clement A., Kardos M. K., Dudás K. M., Weber N., Zoboli O., & Zessner M. (2023):** Inventory of hazardous substance concentrations in different environmental compartments in the Danube river basin (1.0.0) [Data set, from the Danube Hazard m3c-project]. TU Wien, <https://doi.org/10.48436/xwve4-h7v43>.
- Clara M., G. Gruber, Ph Hohenblum, Th. Hofer, St. Kittlaus, K. Lenz, B. Liebmann, M. Liederer, R. Maier, O. Mallow, M. Pessenlehner, M. Pichler, B. Polgar, H. Rechberger, Chr. Scheffknecht, St. Spacek, C. Steidl, M. Zessner (2020):** TEMPEST – Erfassung von Emissionen ausgewählter Spurenstoffe aus Kanalsystemen, Handlungsoptionen zu deren Minderung und Optimierung einer alternativen Nachweismethode für Kunststoffpartikel in Wasserproben, Projektbericht im Auftrag des BMLRT.
- Nickel J. P., Sacher E., Fuchs St. (2021):** Dataset of micropollutant concentrations and standard water quality parameters in wastewater treatment plants, combined sewer overflows, and stormwater outfalls in German, Karlsruhe Institute of Technology (KIT). <https://doi.org/10.35097/449>.
- Obeid A.A.A., Oudega T.J., Zoboli O., Gundacker C., Blaschke A. P., Zessner M., Saracevic E., Devau N., Stevenson M.E., Krlovic N., Liu M., Nagy-Kovács Z., László B., Sommer R., Lindner G., Drex J. (2023):** PFAS Occurrence and Transport Mechanisms at River-bank Filtration Sites in the Upper Danube Catchment, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 75 (9–10) (in diesem Heft)
- PROMISCES (2023):** Preventing Recalcitrant Organic Mobile Industrial chemicals for Circular Economy in the Soil-sediment-water system, Forschungsprojekt im Rahmen des EU H2020 Programmes. <https://cordis.europa.eu/project/id/101036449>.
- Ulrich H., Gierig M., Buchmeier G., Elsasser M., Schlößer I., Neumann C. (2019):** Per- und polyfluorierte Chemikalien in Bayern: Untersuchungen 2006–2018. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg UmweltSpezial.
- Umweltdaten des Landes Oberösterreich (2023):** PFAS-Konzentrationen im Grundwasser.
- Umweltinstitut Vorarlberg (2021):** Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in Vorarlberg. Amt der Vorarlberger Landesregierung (Ed.), Bregenz.
- Wikipedia (2023a):** Eintrag über Boxplot, CC-BY-SA 4, <https://de.wikipedia.org/wiki/Box-Plot>. Zugriffen: 10.06.2023.
- Wikipedia (2023b):** Beschreibung der Elemente eines Boxplots. Beispiel eines Boxplots. Kommentierter Boxplot by RobSeb—Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14697172>. Zugriffen: 10.06.2023.
- Zoboli O., Adam K., Kittlaus St., Clement A., Kaps R., Gabriel O., van Gils J., Broer M., Weber N., Milacic R., Dimova G., Nedelea I. und Zessner M. (2023):** Spurenstoffmanagement im Donaueinzugsgebiet; Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 75 (9–10) (in diesem Heft)

**Hinweis des Verlags** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.