



PFC in Böden und Übertritt in die Nahrungskette

 Untersuchungen im Zuge der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung
in Baden-Württemberg im Zeitraum 2017/2018



Baden-Württemberg

PFC in Böden und Übertritt in die Nahrungskette

 Untersuchungen im Zuge der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung
in Baden-Württemberg im Zeitraum 2017/2018

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.baden-wuerttemberg.de poststelle@lubw.bwl.de , Tel.: 0721/5600-0, Fax: 0721/5600-3200
BEARBEITUNG	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe Referat 23 – Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel Dr. Raphaela Osterauer
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Referat 23 – Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel
BEZUG	https://pd.lubw.de/10163
STAND	Oktober 2020
AUFLAGE	1. Auflage
TITELBILD	Aufnahme eines lichtdurchfluteten Waldes, AVTG/ stock.adobe.com
ABBILDUNGSNACHWEIS	Abbildung 1.1: shutterstock_745678465, Eric Isselee/ shutterstock.com . Alle weiteren Abbildungen: LUBW
ZITIERVORSCHLAG	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg., 2020): PFC in Böden und Übertritt in die Nahrungskette, Untersuchungen im Zuge der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung in Baden- Württemberg im Zeitraum 2017/2018, Karlsruhe

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
ZUSAMMENFASSUNG	7
1 EINLEITUNG	9
2 METHODEN	11
2.1 Untersuchte Standorte	11
2.2 Probenahme und -verarbeitung	11
2.3 Analytik	13
3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	14
3.1 Bodenproben der Waldstandorte	14
3.1.1 Analysen der Feststoffproben	14
3.1.2 Analysen der Eluate	14
3.2 Bodenproben der PFC-belasteten Flächen	15
3.2.1 Analysen der Feststoffproben	15
3.2.2 Analysen der Eluate	15
3.3 Regenwurmproben der Waldstandorte	15
3.4 Regenwurmproben der PFC-belasteten Flächen	16
3.5 Kleinsäugerproben	17
3.6 Kleinsäugerproben der Waldstandorte	18
3.7 Kleinsäugerproben der PFC-belasteten Flächen	18
3.8 Anreicherungsmuster der PFC in den verschiedenen Matrices je Standort	19
3.9 Blutproben der Kleinsäuger	20
3.10 Schwermetallgehalte in Nierenproben der Kleinsäuger	21
3.11 Persistente organische Schadstoffe in Leberproben der Kleinsäuger	22
3.12 Weichmacher und Pestizide in Leberproben der Kleinsäuger	23
4 ABSCHLIESSENDE DISKUSSION	24
5 ANHANG	27
6 ABBILDUNGEN UND TABELLEN	36
6.1 Abbildungen	36
6.2 Tabellen	36
7 LITERATUR UND QUELLEN	38

Abkürzungsverzeichnis

AF	Anreicherungsfaktor
DDE	Dichlordiphenyldichlorethen
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
EFSA	European Food Safety Agency
PFC	Per- und polyfluorierte Chemikalien
PFBA	Perfluorbutanoat
PFPA	Perfluorpentanoat
PFH _x A	Perfluorhexanoat
PFHpA	Perfluorheptanoat
PFOA	Perfluoroctanoat
PFNA	Perfluornonanoat
PFDA	Perfluordecanoat
PFUnA	Perfluorundecanoat
PFDoA	Perfluordodecanoat
PFBS	Perfluorbutansulfonat
PFPeS	Perfluorpentansulfonat
PFH _x S	Perfluorhexansulfonat
PFHpS	Perfluorheptansulfonat
PFOS	Perfluoroctansulfonat
PFDS	Perfluordecansulfonat
PFOSA	Perfluoroctansulfonsäureamid
HPFHpA	7H-Dodecafluorheptanoat
H ₂ PFDA	2H,2H-Perfluordecanoat
H ₄ PFUnA	2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat
H ₄ PFOS	1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat
PFT _r A	Perfluortridecansäure
PFTA	Perfluortetradecansäure
PF-3,7-DMOA	Perfluor-3,7-dimethyloktansäure
H ₄ PFH _x S	4:2 Fluortelomersulfonat
FTS	8:2 Fluortelomersulfonat
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PNEC	Predicted no effect concentration
TWI	Tolerable weekly intake

Zusammenfassung

Per- und polyfluorierte Verbindungen sind eine Gruppe von mehr als 4000 Chemikalien, welche durch ihre Langlebigkeit und Giftigkeit kritisch für Mensch und Umwelt sind. Vor allem langlebige Substanzen, von denen bislang nur wenige reguliert sind, akkumulieren in Lebewesen und können dort nachteilige Auswirkungen auf Leber, Immunsystem und Fortpflanzung ausüben. Entlang der Nahrungskette können sie sich weiterhin von Stufe zu Stufe anreichern.

Bislang liegen nur wenige Kenntnisse zu Hintergrundgehalten von PFC in Waldböden sowie deren Übertritt in die terrestrische Nahrungskette vor. Frühere Untersuchungen der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2015) zeigten, dass sich PFC in Regenwürmern stark anreichern. Da Regenwürmer Nahrung vieler in der Nahrungskette höher angesiedelter Fressfeinde wie beispielsweise Mäuse, Vögel und Wildschweine sind, wurde in der vorliegenden Untersuchung im Zeitraum 2017/2018 der Übertritt von PFC in Böden in die Nahrungskette anhand von Regenwürmern und Kleinsäugetern untersucht. Diese Untersuchungen wurden zum einen an landesweit verteilten, sowohl siedlungsferneren als auch siedlungsnahen Walddauerbeobachtungsflächen der LUBW und zum anderen an belasteten Acker- und Grünflächen im Raum Rastatt/Baden-Baden durchgeführt, um ein Anreicherungsmuster in Abhängigkeit von der Belastungsstärke zu untersuchen.

In den Bodenproben der Walddauerbeobachtungsflächen wurden nur die beiden Leit-substanzen Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) und Perfluorooctansäure (PFOA) mit Werten von 1 – 2 ng/g nachgewiesen. In den Regenwürmern, welche in ständigem und engem Bodenkontakt leben, wurde eine starke und artspezifische Anreicherung mit einer maximalen PFC-Summe von 135 ng/g gefunden. Beim Roten Waldregenwurm (*Lumbricus rubellus*) zeigte sich eine Anreicherung um das 7,5-fache im Vergleich zu den Bodenwerten, bei *Aporectodea caliginosa* zeigte sich ein Anreicherungsfaktor von 106 und bei *Aporectodea longa* ein Anreicherungsfaktor von 135. Die mit PFC belasteten Flächen im Raum Rastatt/Baden-Baden zeigten beträchtliche PFC-Summen zwischen 200 – 800 µg/kg Boden. Ebenso wie bei den hintergrundbelasteten Waldstandorten zeigte sich auch hier eine hohe und art-spezifische Anreicherung mit einer maximalen PFC-Summe von 108 µg/g für juvenile *A. caliginosa*. Die Anreicherungsfaktoren lagen für adulte Würmer der Arten *L. rubellus* und *A. caliginosa* in der gleichen Größenordnung wie bei den Waldflächen. Somit zeigt sich, dass die Anreicherungsfaktoren in den Regenwürmern weniger abhängig von den Boden-konzentrationen sondern vielmehr abhängig von der Regenwurmart sind.

An Kleinsäugetern wurden neben der fleischfressenden Spitzmaus auch Allesfresser (Rötel-maus) und reine Pflanzenfresser (Erd- und Feldmaus) untersucht. Die Anreicherung der PFC in den Kleinsäugetern zeigte sich als abhängig von deren Ernährungsweise. Die höchsten PFC-Werte wurden in den Lebern der Spitzmäuse, zu deren Ernährung auch der Regenwurm zählt, gemessen. An der Waldfläche Kirchheim unter Teck wurde dabei der höchste PFC-Wert im Regenwurm um etwa das 7-fache überschritten. Erd-, Feld- und Rötelmäuse hingegen wiesen auf den hintergrundbelasteten Waldflächen Werte in der Größenordnung der Regenwürmer auf. Bei den mit PFC belasteten Acker- und Grün-landflächen war nicht für alle Standorte ein höherer PFC-Gehalt in den Spitzmäusen

im Vergleich zu den Regenwürmern vorzufinden, da Kleinsäuger aufgrund ihres großen Lebensradius' nicht nur auf den belasteten Probestellen, sondern auch im angrenzenden unbelastetem Bereich Nahrung gesammelt haben werden. Dennoch zeigten sich in den Spitzmäusen der belasteten Flächen beträchtliche PFC-Gesamtwerte von bis zu 14 µg/g Frischgewicht.

Auch das Anreicherungsmuster der PFC-Einzelsubstanzen im Vergleich zu den Bodenwerten scheint artabhängig zu sein: Die beiden Regenwurmartensorten *L. rubellus* und *A. caliginosa* weisen ein besonderes Anreicherungsvermögen für die Substanz PFDoA auf und die Art *A. longa* reichert besonders PFOS sowie die kurzkettigen Verbindungen PFBS und PFBA an. Die Kleinsäuger und dabei vor allem die Spitzmäuse, reichern maßgeblich die Verbindung PFOS an.

Die Belastung der Kleinsäuger mit anderen untersuchten Stoffen aus den Gruppen der Organochlorpestizide, Polychlorierten Biphenyle (PCB) und Schwermetalle kann als sehr gering eingestuft werden und lassen keine gesundheitliche Gefährdung der Kleinsäuger erwarten. Von den untersuchten Weichmachern und derzeit noch in der Landwirtschaft verwendeten nichtchlorierten Pestizide ließen sich keine Verbindungen in den Lebern der Kleinsäuger nachweisen.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass selbst in Waldböden messbare PFC-Konzentrationen vorkommen, welche sich entlang der Nahrungskette stark anreichern können. Auch wenn es wahrscheinlich ist, dass diese Konzentrationen keine akuten Wirkungen auf die untersuchten Organismen ausüben, sind doch nachteilige chronische Effekte für die dort lebenden Regenwürmer und Kleinsäuger nicht auszuschließen. Eine Anreicherung im Nahrungsnetz kann weiterhin auch für den Menschen ein gesundheitliches Risiko darstellen. So zeigen Untersuchungen der CVUA Freiburg von 44 Wildschweinlebern aus Baden-Württemberg [LAUFER 2019], dass die Lebern aufgrund der hohen PFC-Belastung nicht zum Verzehr geeignet sind.

Die erhobenen Schadstoffdaten sollen in übergreifende Datenbanken, z. B. der Datenplattform IPChem der EU-Kommission, integriert werden. So kann ein Baustein zur Verbesserung der Informationslage für Behörden und der Wissenschaft zur Umweltbelastung beigetragen werden.

1 Einleitung

Schadstoffuntersuchungen in Biotaprobieren können hilfreich sein, den Zustand unserer Umwelt zu erfassen, da in ihnen gefundene Schadstoffgehalte eine Aufnahme und Anreicherung in Biota spiegeln und damit eine Gefahr für lebende Systeme einschließlich des Menschen darstellen können. Besonders kritisch sind langlebige Substanzen, welche sich in den Organismen entlang der Nahrungskette immer weiter anreichern.

Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC) werden seit den 1960-er Jahren aufgrund ihrer fett-, wasser- und schmutzabweisenden Eigenschaften industriell hergestellt und vielfach verwendet. Bedingt durch ihre thermische und chemische Stabilität werden sie mittlerweile überall in der Umwelt nachgewiesen: In Wasser, Böden, Atmosphäre, pflanzlichen und tierischen Lebensmitteln, aquatischen und terrestrischen Tieren sowie in Blut und Muttermilch des Menschen. Aufgrund ihrer extremen Langlebigkeit reichern sie sich in der Nahrungskette an und haben das Potential, Organismen durch ihre toxischen und krebserregenden Eigenschaften zu schädigen und Ökosysteme dadurch nachhaltig zu beeinträchtigen. Nur wenige der mehr als 4000 existierenden Verbindungen sind mittlerweile aufgrund ihrer negativen Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit gesetzlich geregelt. So werden PFOS und PFOA durch die Stockholm-Konvention ab 2025 weltweit ausnahmslos verboten sein und einige langkettige Substanzen (C11-C14) sowie PFHxS, PFNA und PFDA sind nach der europäischen REACH-Verordnung (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) als besonders besorgniserregende Stoffe identifiziert worden, was zu einem Zulassungsverfahren führt und eine Beschränkung dieser Substanzen zur Folge haben kann. Die Unternehmen weichen dadurch verstärkt auf kurz-kettige Verbindungen aus, welche aber ebenfalls im Verdacht stehen, toxisch und langlebig zu sein und zudem sehr mobil in Boden und Wasser sind.

Abgesehen von humantoxikologischen Bewertungsmaßstäben (z. B. Lebensmitteltauglichkeit, Futtermittelverordnung) stehen für die terrestrische Bioindikation bislang keine Umweltqualitätsstandards zur Verfügung, um die in den untersuchten Organismen gefundenen Schadstoffgehalte zu bewerten, wie es beispielsweise über die Wasserrahmenrichtlinie der EU (Richtlinie 2008/105/EG)

für aquatische Systeme gegeben ist. Anhand von Bioindikatoren, wie sie u. a. Regenwürmer und Kleinsäuger darstellen, können jedoch Hinweise auf Umwelteinflüsse und mögliche Veränderungen der Lebensfunktionen der Organismen geliefert werden und letztendlich durch eine Anreicherung bioakkumulativer Substanzen entlang der Nahrungskette potentielle gesundheitliche Risiken für den Menschen erkannt werden.

Als Nahrungskette wird eine Abfolge von Organismen genannt, die hinsichtlich ihrer Ernährung voneinander abhängig sind. Am Anfang einer Nahrungskette stehen autotrophe Produzenten, welche Bakterien oder Pflanzen sind. Die darauffolgenden Primärkonsumenten ernähren sich von den Produzenten. Sekundärkonsumenten sind bereits Fleischfresser, welche sich von den Primärkonsumenten ernähren usw. Als letztes Glied steht der Endkonsument, z. B. Mensch, Wildschwein, Greifvogel oder Raubfisch. Die Nahrungskette wird abgeschlossen von Destruenten, welche die abgestorbenen organischen Stoffe umwandeln, sodass sie wiederum als Nährstoffe für die Produzenten zur Verfügung stehen.

Regenwürmer spielen bei den bodenbildenden Prozessen eine wesentliche Rolle und stellen zudem eine Basisgruppe für das Nahrungsnetz dar. Durch den intensiven Kontakt mit dem Boden sind Regenwürmer in besonderer Weise den im Boden befindlichen Schadstoffen ausgesetzt und reichern diese artbezogen unterschiedlich stark an (ANDERSEN 1979). Regenwürmern kommt aus ökologischer Sicht eine große Bedeutung zu, da sie am Anfang einer Nahrungskette stehen und vielen nachfolgenden Nahrungskettengliedern, darunter Kleinsäugetieren, als eiweißreiche Nahrung dienen.

Kleinsäuger sind weit verbreitet, haben eine hohe Reproduktionsrate und eine ausreichende Lebensdauer, um mögliche Effekte von Umweltschadstoffen messen zu können (je nach Art – Spitzmaus, Feldmaus, Rötelmaus, Erdmaus – etwa 1 bis 2 Jahre). Durch ihre hohe Stoffwechselrate sind Stoffe auch in geringen Umweltkonzentrationen in ihnen nachweisbar und sie sind im Vergleich zu größeren Tieren den Schadstoffen stärker ausgesetzt. Anders als bei den Regenwürmern, welche die Schadstoffe über den Darm und über die Körperoberfläche aufnehmen, nehmen

Kleinsäuger Schadstoffe in der Regel über kontaminierte Nahrung auf. Kleinsäuger integrieren die Belastungssituation eines Biotopes, wobei die Ernährungsweise entscheidend für die Höhe der Schadstoffaufnahme ist: Die Spitzmäuse zählen zu den Fleischfressern (Karnivoren) und ernähren sich hauptsächlich von Regenwürmern, Insekten und deren Larven sowie Schnecken. Rötelmäuse gehören demgegenüber zu den Allesfressern (Omnivore), wobei sie einen überwiegenden Anteil pflanzlicher Nahrung aufnehmen. Erd- und Feldmäuse dagegen sind reine Pflanzenfresser (Herbivore). Kleinsäuger selbst sind wiederum Nahrung von Tieren, welche in der Nahrungskette höher angesiedelt sind wie z. B. Marder, Iltis, Wildschwein, Fuchs oder Greifvogel.



Abbildung 1.1: Hausspitzmaus frisst einen Regenwurm;
Quelle: shutterstock_745678465, Eric Isselee/shutterstock.com

Frühere Untersuchungen der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2015) zeigten, dass Regenwürmer PFC sehr stark anreichern – sowohl von hinter-

grundbelasteten als auch von mit PFC belasteten Böden. Um weitere Informationen über Hintergrundgehalte an PFC sowie deren Übertritt in die Nahrungskette des terrestrischen Ökosystems zu erlangen, wurden sowohl an siedlungsferneren als auch an siedlungsnahen Waldstandorten des Dauerbeobachtungsprogrammes der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung Boden-, Regenwurm- und Kleinsäugerproben auf PFC untersucht. Diese Untersuchungen wurden auch an PFC-belasteten Flächen im Raum Rastatt/Baden-Baden durchgeführt, um ein Anreicherungsmuster in Biota in Abhängigkeit von der Belastungsstärke zu erhalten. Der Eintrag der PFC in Waldböden erfolgt dabei maßgeblich über den Luftpfad, wohingegen die Bodenkontaminationen der belasteten Grün- und Ackerflächen im Raum Rastatt/Baden-Baden vermutlich über verunreinigte Komposte erfolgte (RP Karlsruhe 2019). Bei den Kleinsäufern lag der Fokus auf der Untersuchung carnivorer Spitzmäuse, zu deren Nahrung auch der Regenwurm zählt. Für eine Betrachtung der PFC-Anreicherung in Abhängigkeit von der Ernährungsweise wurden neben Spitzmäusen aber auch omnivore Rötelmäuse sowie herbivore Erd- und Feldmäuse gefangen und analysiert. Die Kleinsäuger wurden neben den PFC weiterhin auch auf eine Belastung mit folgenden umweltrelevanten Stoffen hin untersucht: Weichmacher, einige derzeit in der Landwirtschaft verwendete Pestizide sowie Organochlorpestizide, Polychlorierte Biphenyle und Schwermetalle.

2 Methoden

2.1 Untersuchte Standorte

Boden- und Regenwurmproben wurden von folgenden LUBW-Waldstandorten des Dauerbeobachtungsprogrammes der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung genommen: Tauberbischofsheim, Kirchheim unter Teck und Zwiefalten (siedlungsferner) sowie Karlsruhe (siedlungsnah). Bei den mit PFC belasteten Standorten handelte es sich um eine Grünlandfläche (BAD2A), zwei landwirtschaftliche Versuchsfelder des LTZ Augustenberg (Hü10

und BAD1L13) und zwei mit Blütmischung bewachsene Ackerflächen (A und BAD3_C). Aus dem Jahre 2011 vorhandene Restproben von Boden und Regenwurm (*Lumbricus rubellus*) der oben genannten Walddauerbeobachtungsflächen wurden für einen Vergleich ebenfalls analysiert.

Kleinsäugerproben wurden von den Waldstandorten Kirchheim u. T. und Zwiefalten sowie von den mit PFC belasteten Flächen Hü10, BAD1L13, BAD2A und A genommen.

Tabelle 2.1: Untersuchte Standorte, Informationen zu den Standorten und dazugehörige Bodencharakterisierungen

Waldstandorte	Standortbezeichnung	Informationen zum Standort	Bodencharakterisierung
Tauberbischofsheim	1330	Rotbuchenwald, siedlungsfern	Löß, Parabraunerde
Zwiefalten	1140	Rotbuchenwald, siedlungsfern	Kalkstein, Terra fusca
Kirchheim u. T.	1180	Rotbuchenwald, siedlungsfern	Tone, pseudovergleyte Pelosol-Parabraunerde
Karlsruhe	1500	Rotbuchenwald, siedlungsnah	Niederterrasse, schwach podsolige Braunerde
PFC-belastete Standorte	Standortbezeichnung	Informationen zum Standort	Bodencharakterisierung
Sandweier	E	Acker mit Blütmischung	Sandig, kiesig
Sandweier	A	Acker mit Blütmischung	Sandig, kiesig
Sandweier	BAD3_C	Acker mit Blütmischung	Sandig, kiesig
Steinbach	BAD1L13	Landwirtschaftliches Versuchsfeld	Schluff
Oos	BAD2A	Extensives Grünland	Lehmige Sande
Hügelsheim	Hü10	Landwirtschaftliches Versuchsfeld	Lehmige Sande

 LUBW

2.2 Probenahme und -verarbeitung

Bodenproben: Die mineralischen Oberbodenproben der Wald-Dauerbeobachtungsflächen wurden mit einem N-min-Bohrer in einer Tiefe von 0 – 10 cm außerhalb der Kernzone, die Bodenproben der Äcker und des Grünlandes von 0 – 20 cm entnommen. Die 6 – 12 Teilproben (abhängig von der Häufigkeit der Regenwürmer am jeweiligen Probenort) wurden in einer Edelstahlschüssel vereinigt, durchmischt, von Steinen und Ästen befreit und in Glasbehälter überführt. Frischbodenproben des Jahres 2017 wurden bis zur Analyse bei 8 – 10°C gekühlt. Bodenproben des Jahres 2011 wurden damals zur Lufttrocknung auf Papier ausgebreitet und anschließend bis zur Analyse bei Raumtemperatur in Weißglasbehältern aufbewahrt.

Regenwurmproben: Regenwürmer des Jahres 2017 wurden durch Elektrofing und anschließender Handauflese gesammelt. Es wurde eine Unterscheidung in die Gruppen adult und juvenil vorgenommen. Bei *L. rubellus* wurde zudem eine separate Gruppe für besonders große adulte Tiere vorgenommen. Es wurden so viele Würmer gefangen, dass eine Mindestmenge von 1 g Trockensubstanz für die Analyse zur Verfügung stand. Regenwürmer des Jahres 2011 wurden ausschließlich per Handsammlung (unter Steinen, Ästen und Laub) gewonnen. Die Regenwürmer wurden jeweils für 7 – 8 Tage bis zur vollständigen Entkottung bei 8 – 10°C im Kühlschranks in Glaspetrischalen auf feuchtem Filterpapier in der LUBW gehalten, gefriergetrocknet und anschließend zur Analyse ans TZW geliefert. In Tabelle 2.2 sind die gesammelten Regenwurmartens je Standort aufgeführt.

Tabelle 2.2: Art, Altersklasse, Anzahl und für die Analyse zur Verfügung stehende Trockensubstanz in Gramm der Regenwürmer je Standort und Probenahmejahr

Standort, Probenahmejahr	Art, Altersklasse	Anzahl	Für Analyse zur Verfügung stehende Trockensubstanz [g]
Tauberbischofsheim, 2011	<i>Lumbricus rubellus</i> , adult	–	2,04
Tauberbischofsheim, 2017	<i>Lumbricus rubellus</i> , adult	37	4,00
Zwiefalten, 2011	<i>Lumbricus rubellus</i> , adult	–	0,64
Zwiefalten, 2017	<i>Aporrectodea caliginosa</i> , adult	26	1,78
Kirchheim u. T., 2011	<i>Lumbricus rubellus</i> , adult	–	2,84
Kirchheim u. T., 2017	<i>Lumbricus rubellus</i> , adult	10	1,95
	<i>Aporrectodea longa</i> , adult	5	3,32
Karlsruhe, 2011	<i>Lumbricus rubellus</i> , adult	–	0,81
Karlsruhe, 2017	<i>Lumbricus rubellus</i> , adult	12	1,0
E, 2017	<i>Aporrectodea caliginosa</i> , adult	13	1,52
	<i>Lumbricus rubellus</i> , adult	9	1,46
A, 2017	<i>Aporrectodea caliginosa</i> , adult	13	1,39
	<i>Aporrectodea caliginosa</i> , juvenil	23	1,05
BAD3_C, 2017	<i>Aporrectodea caliginosa</i> , adult	7	0,83
BAD1L13, 2017	<i>Aporrectodea caliginosa</i> , adult	18	3,05
	<i>Aporrectodea longa</i> , adult	5	1,43
	<i>Lumbricus rubellus</i> , adult	8	1,14
	<i>Lumbricus rubellus</i> , sehr große Art, adult	5	3,19
BAD2A, 2017	<i>Aporrectodea caliginosa</i> , adult	22	2,42
	<i>Lumbricus rubellus</i> , sehr große Art, adult	6	2,87
Hü10, 2017	<i>Aporrectodea caliginosa</i> , adult	10	1,11
	<i>Lumbricus rubellus</i> , adult	9	1,8

U:W

Kleinsäugerproben: In Tabelle 2.3 dargestellte Kleinsäugerarten wurden im Zeitraum August – Oktober 2018 mittels Lebendfallen gefangen. Dabei wurden je Standort mindestens 100 Fallen über 3 Tage und Nächte installiert und im 12-Stunden Rhythmus kontrolliert. Aufgrund von ungünstigen Habitatstrukturen (die Waldspitzmaus bevorzugt feucht-kühle, deckungsreiche Areale) mussten bei den hintergrundbelasteten Waldstandorten Kirchheim u. T. und Zwiefalten auch Fangareale im Umkreis von etwa 500 m der Probestellen integriert werden, um überhaupt Spitzmäuse fangen zu können. Bei den mit PFC belasteten Flächen konnte der Bezug zur Fläche beibehalten werden, allerdings weisen Kleinsäuger einen gewissen Aktionsradius auf (die Reviergröße der Feldmaus beträgt etwa 1000 m², die der Waldspitzmaus 500 m²), sodass die Kleinsäuger der PFC-belasteten Flächen nicht nur Nahrung aus den belasteten Bereichen, sondern vermutlich zu einem großen Teil auch von unbelasteten Flächen aufnahmen.

Kleinsäuger, welche für die Analyse nicht benötigt wurden oder zu jung waren, wurden vor Ort wieder entlassen. Die Kleinsäuger wurden vor Ort durch zervikale Dislokation schonend getötet und bei -20° C bis zur weiteren Verarbeitung tiefgekühlt. Lebern und Nieren wurden herauspräpariert und Blut mittels einer heparinisierten Glaskapillare entnommen. Die Proben wurden tiefgekühlt an das Analyseinstitut versandt. Die Kleinsäuger wurden in zwei Altersklassen eingeteilt: Adult (trächtig zum Fangzeitpunkt, etwa 18 Monate alt) und subadult (etwa 6 Monate alt). Da in früheren Untersuchungen kein Unterschied der PFC-Anreicherung bei männlichen oder weiblichen Tieren gefunden wurde [HOFF et al. 2004, KANNAN et al. 2002], wurde in den vorliegenden Untersuchungen von einer Geschlechtertrennung abgesehen.

Tabelle 2.3: Art, Altersklasse (adu=adult, subadu=subadult), Anzahl und untersuchte Organe und Schadstoffgruppen je Standort. Abkürzungen PFC: Per- und polyfluorierte Verbindungen, WM: Weichmacher, Pest: Pestizide, SM: Schwermetalle

Standort	Art	Anzahl und Altersklasse der Mäuse je Poolprobe	Untersuchte Organe und Analyten
Zwiefalten	Rötelmaus (<i>Myodes glareolus</i>)	5 subadu, 3 adu	Leber (PFC, WM, Pest), Niere (SM), Blut (PFC)
Zwiefalten	Erdmaus (<i>Microtus agrestis</i>)	2 adu	Leber (PFC, Pest)
Kirchheim u. T.	Waldspitzmaus (<i>Sorex araneus</i>)	3 subadu	Leber (PFC)
Kirchheim u. T.	Rötelmaus (<i>Myodes glareolus</i>)	1 subadu, 1 adu	Leber (PFC, Pest)
Kirchheim u. T.	Erdmaus (<i>Microtus agrestis</i>)	2 subadu, 2 adu	Leber (PFC, WM, Pest)
A	Waldspitzmaus (<i>Sorex araneus</i>)	2 subadu	Leber (PFC)
A	Feldmaus (<i>Microtus arvalis</i>)	7 subadu, 2 adu	Leber (PFC, WM, Pest), Niere (SM), Blut (PFC)
BAD1L13	Waldspitzmaus (<i>Sorex araneus</i>)	3 subadu	Leber (PFC)
BAD1L13	Feldmaus (<i>Microtus arvalis</i>)	8 subadu	Leber (PFC, WM, Pest), Niere (SM), Blut (PFC)
BAD2A	Zwergspitzmaus (<i>Sorex minutus</i>)	4 subadu	Leber (PFC)
BAD2A	Waldspitzmaus (<i>Sorex araneus</i>)	3 subadu	Leber (PFC)
BAD2A	Feldmaus (<i>Microtus arvalis</i>)	6 subadu	Leber (PFC, WM, Pest), Niere (SM), Blut (PFC)
Hü10	Hausspitzmaus (<i>Crocidura russala</i>)	1 subadu	Leber (PFC)
Hü10	Feldmaus (<i>Microtus arvalis</i>)	2 subadu, 1 adu	Leber (PFC, Pest)

LUBW

2.3 Analytik

Die Probenvorbereitung und Analyse der Boden- und Wurmpollen erfolgte durch das Technologiezentrum Wasser (TZW) Karlsruhe. Von den Bodenproben wurden sowohl Feststoff- als auch Eluatproben untersucht. Die Boden-Eluatproben wurden gemäß DIN-Vorschrift DIN 19529:2015-12 im Original aus der feuchten Frischprobe hergestellt. Die bereits getrocknet vorgelegenen Proben des Jahres 2011 wurden zur Eluatgewinnung im gewünschten Wasser/Feststoff-Verhältnis mit Wasser (Aqua dest.) versetzt (standardmäßig 2:1-Schüttel-Eluate). Die Analyse der Eluate erfolgte gemäß DIN 38407-42:2011-03. Für die Feststoff-Analytik gemäß DIN 38414-14:2011-08 wurden die feldfrischen Proben gefriergetrocknet und anschließend in der Zirkonoxid-Kugelmühle homogenisiert. Die getrocknet vorgelegenen Proben wurden ebenfalls vor der Analyse mittels Kugelmühle homogenisiert. Die gefriergetrockneten Regenwürmer wurden mittels Zirkonoxid-Kugelmühle homogenisiert und anschließend nach dem Feststoffverfahren (DIN 38414-14:2011-08) analysiert. Es wurden 20 Vertreter der PFC in den Feststoff- und Eluatproben und 22 Ver-

treter in den Regenwurmproben analysiert. Die einzelnen Verbindungen und deren Bestimmungsgrenzen sind im Anhang aufgeführt.

Die Probenvorbereitung und Analyse der Kleinsäugerproben erfolgte durch Eurofins GfA Lab Service Hamburg. Die untersuchten Organe (Leber, Niere, Blut) von Individuen derselben Art je Standort wurden zu Poolproben vereinigt, um für die Analysen ausreichend Probematerial zu erhalten. Ausreichend Individuen einer Art für Blutuntersuchungen konnten nur an den vier Standorten Zwiefalten (Rötelmaus), A, BAD1L13 und BAD2A (jeweils Feldmaus) gefangen werden. Die Poolproben wurden homogenisiert und die Analyten aufgrund der geringen Poolprobenmenge in den Frischproben analysiert. Neben der PFC-Analyse in Blut und Leber wurden in einigen Lebern weiterhin Weichmacher und derzeit noch in Verwendung befindliche Pestizide sowie bereits regulierte Organochlorpestizide analysiert. In einigen Nierenproben wurden die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium und Blei analysiert.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Bodenproben der Waldstandorte

3.1.1 Analysen der Feststoffproben

In den Feststoffproben der Waldstandorte der Jahre 2011 und 2017 wurden nur die beiden Leitsubstanzen PFOS und PFOA nachgewiesen. Der siedlungsnah Standort Karlsruhe

wies in den Proben beider Jahre 2 ng/g PFOS auf, die siedlungsfüreren Standorte Kirchheim u. T. 1 ng/g PFOS und Zwiefalten 1 ng/g PFOA (nur 2017). Am siedlungsfüreren Standort Tauberbischofsheim wurden keine PFC oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen. (Abbildung 3.1).

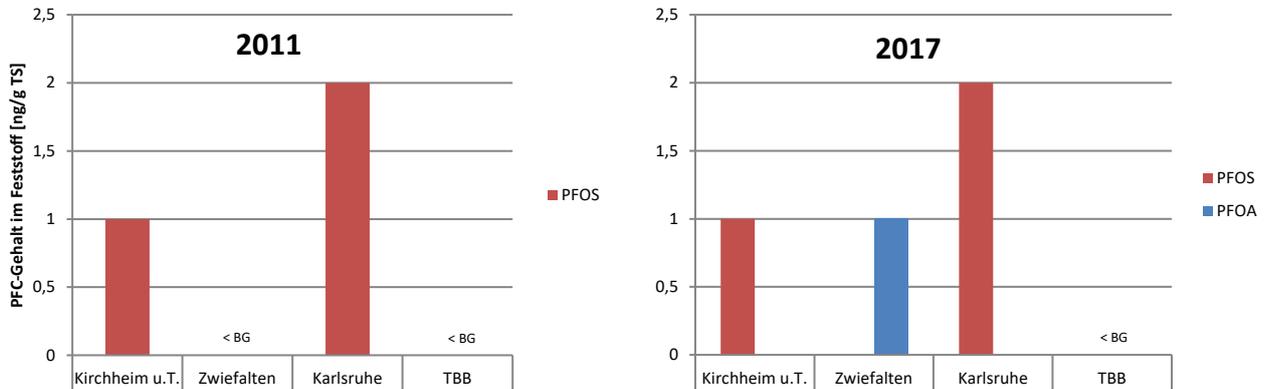


Abbildung 3.1: PFC-Gehalte der Feststoffproben [ng/g Trockensubstanz] der Waldstandorte aus den Jahren 2011 und 2017. Bestimmungsgrenze: 1 ng/g TS. < BG: kleiner Bestimmungsgrenze

3.1.2 Analysen der Eluate

Bei den Untersuchungen der Probeneluate zeigten sich in den Proben aus dem Jahr 2011 jeweils höhere Gesamt-PFC Gehalte (0,25 – 0,51 µg/L) als in den Proben des Jahres 2017 (0,04 – 0,22 µg/L) (Abbildung 3.2). In einer Studie wurde der Einfluss methodischer Faktoren auf die Analysenergebnisse untersucht. Dabei zeigte sich, dass in getrockneten Proben, gleich welche Art der Trocknung vorausgegangen war, z. T. bis zu etwa eine Größenordnung höhere PFAS-Konzentrationen im Eluat auftreten als bei feldfrischen Proben [LANGE et al. 2020]. Somit ist der Unterschied zwischen den Jahren 2011 eher auf die unterschiedliche Probenverarbeitung zurückzuführen als auf tatsächliche Unterschiede in der Umwelt. Bei den Proben des Jahres 2011 dominierten

PFOA und PFBA. In den Proben des Jahres 2017 dominierte bei Kirchheim u. T. und Tauberbischofsheim PFOS, bei Zwiefalten und Karlsruhe PFOA und PFBA. PFOS war bei den einzelnen Standorten sowohl 2011 als auch 2017 in der gleichen Größenordnung nachweisbar. Auch bei den Eluatuntersuchungen der Proben beider Jahre wies der siedlungsnah Standort Karlsruhe die höchsten PFC-Gesamtwerte auf.

Andere Untersuchungen der LUBW zu PFC-Hintergrundgehalten in Waldböden Baden-Württembergs ergaben bei allen 16 Probestellen im Feststoff PFOS-Gehalte zwischen 2 – 8 ng/g und PFC-Gesamthalten im Eluat zwischen 0,1 – 0,9 µg/L [LUBW 2016].

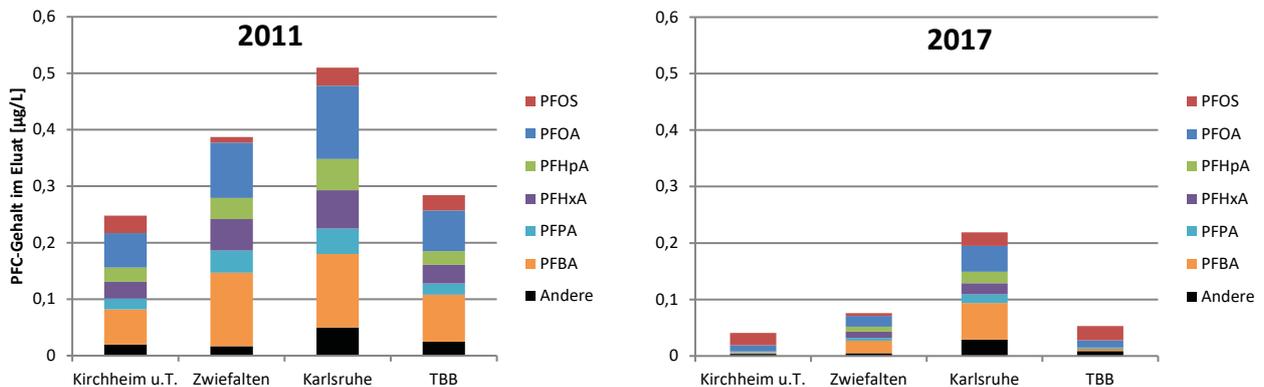


Abbildung 3.2: PFC-Gehalte der 2:1-Schüttel-Eluate [µg/L] der Waldstandorte. Proben der Jahre 2011 und 2017. Bestimmungsgrenze: 0,001 µg/L

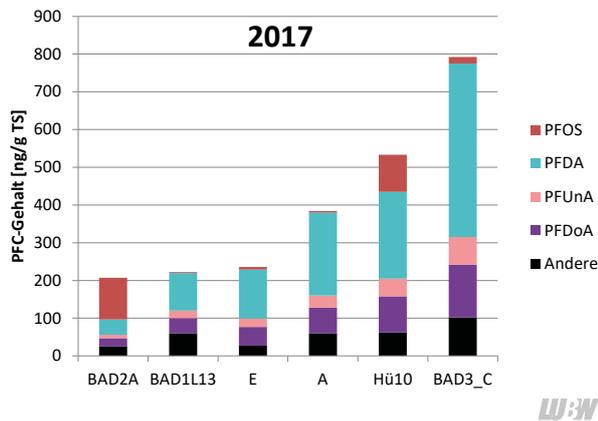


Abbildung 3.3: PFC-Gehalte der Feststoffproben [ng/g Trockensubstanz] der mit PFC belasteten Standorte im Raum Rastatt/Baden-Baden

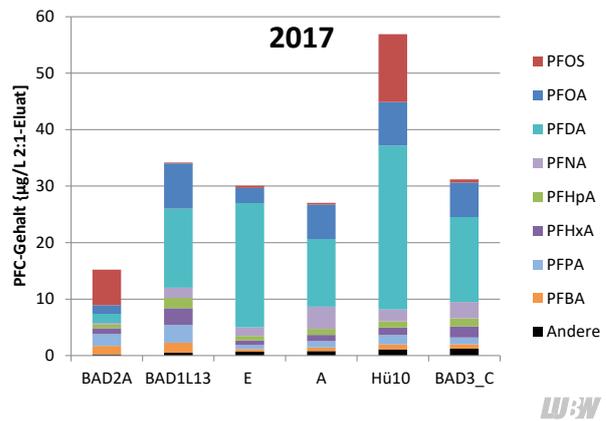


Abbildung 3.4: PFC-Gehalte der 2:1-Schüttel-Eluate [µg/L] der mit PFC belasteten Standorte im Raum Rastatt/Baden-Baden

3.2 Bodenproben der PFC-belasteten Flächen

3.2.1 Analysen der Feststoffproben

Die PFC-Gesamtgehalte der belasteten Flächen im Raum Rastatt/Baden-Baden lagen zwischen 207 – 792 ng/g Trockensubstanz, wobei die Ackerfläche BAD3_C am stärksten belastet war. Mit Ausnahme der Fläche BAD2A, bei welcher PFOS den größten Anteil ausmachte, überwog bei allen Standorten mengenmäßig der Anteil von PFDA gefolgt von PFDoA (Abbildung 3.3).

3.2.2 Analysen der Eluate

Die PFC-Gesamtgehalte der untersuchten Eluate lagen zwischen 15 – 57 µg/L und zeigten im Vergleich zu den Feststoffproben eine andere Reihenfolge der Belastungsstärke bezüglich der untersuchten Standorte (Abbildung 3.4). Dieses ist vermutlich auf unterschiedliche Löslichkeiten der PFC aus dem Feststoff aufgrund von unterschiedlichen Bodeneigenschaften (Tabelle 2.1) zurückzuführen. Auch bei den Eluaten fand sich PFDA mit dem größten Anteil (12 – 29 µg/L). Jedoch zeigten sich im Vergleich zu den Feststoffproben nach PFDA auch große Anteile von PFOA (1,5 – 8 µg/L), welches offensichtlich ein sehr gutes Lösungsvermögen bei der Eluatherstellung aufweist. Ausgenommen davon ist die Fläche BAD2A, bei welcher wie auch bei den Feststoffuntersuchungen PFOS den weitaus größten Anteil ausmachte (6,3 µg/L). Auch in der Probe Hü10 fand sich nach PFDA eine beträchtliche Menge von 12 µg/L PFOS (Abbildung 3.4).

3.3 Regenwurmproben der Waldstandorte

Regenwurmproben des Jahres 2011 stellten ausschließlich *Lumbricus rubellus* dar, welche per Handauflese gewonnen wurden. Bei der Beprobung der Regenwürmer im Jahr 2017 mittels Elektrofang wurden an allen Standorten mit Ausnahme von Zwiefalten *L. rubellus* gewonnen. Weiterhin wurde am Standort Kirchheim u. T. *Aporectodea longa* und am Standort Zwiefalten *Aporectodea caliginosa* gewonnen. Da nicht von allen Standorten die beiden Arten *L. rubellus* sowie *A. caliginosa* gefangen werden konnten, ist ein Vergleich der Anreicherung in den Würmern zwischen den Standorten nicht möglich. In den Regenwurmproben fand eine beträchtliche Anreicherung der PFC statt, wobei sich die Stärke der Anreicherung deutlich als artabhängig zeigte: *L. rubellus* zeigte bei den vier Proben des Jahres 2011 einen durchschnittlichen Anreicherungsfaktor von 8,4 und bei den drei Proben des Jahres 2017 einen durchschnittlichen Anreicherungsfaktor von 7,5 im Vergleich zu den jeweiligen Bodengehalten. Den größten Anteil an PFC machten bei dieser Regenwurmart bei beiden Jahren die Substanzen PFDoA und HPFHpA sowie in allen Proben des Jahres 2011 und in einer Probe des Jahres 2017 ebenfalls PFOS aus (Abbildungen 3.5 und 3.6). Für *A. caliginosa* des Jahres 2017 wurde ein Anreicherungsfaktor von 106 gefunden, wobei PFOS mit 63 % den Hauptbestandteil darstellte. Für *A. longa* wurde ein Faktor von 135 gefunden, wobei hier neben dem Hauptbestandteil PFOS von 24% die kurzkettigen Verbindungen PFBS und PFBA (zusammen 31%) zu einem beträchtlichen Anteil angereichert wurden.

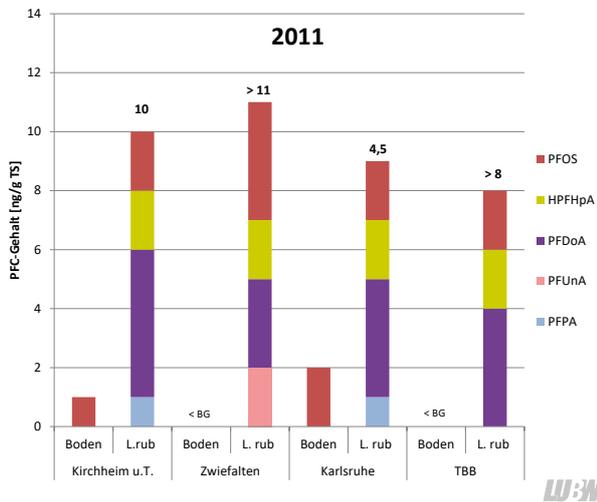


Abbildung 3.5: PFC-Gehalte in Regenwurm- und Bodenproben der Waldstandorte des Jahres 2011 [ng/g Trockensubstanz]. Über den Balken dargestellt sind die Anreicherungsfaktoren der PFC-Gesamtgehalte in den Regenwurmproben im Vergleich zur jeweiligen Bodenprobe. < BG: kleiner Bestimmungsgrenze

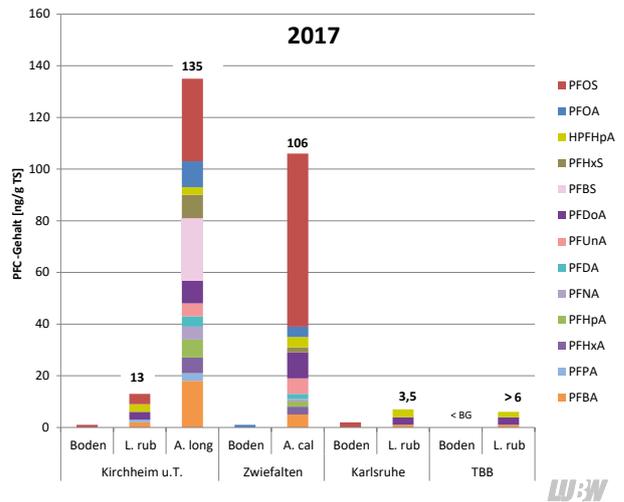


Abbildung 3.6: PFC-Gehalte in Regenwurm- und Bodenproben der Waldstandorte des Jahres 2017 [ng/g Trockensubstanz]. Über den Balken dargestellt sind die Anreicherungsfaktoren der PFC-Gesamtgehalte in den Regenwurmproben im Vergleich zur jeweiligen Bodenprobe. < BG: kleiner Bestimmungsgrenze

3.4 Regenwurmproben der PFC-belasteten Flächen

Auf allen der sechs mit PFC belasteten Acker- und Grünlandflächen des Jahres 2017 wurde die Art *A. caliginosa* gewonnen. An dem Standort A konnten neben den adulten Würmern auch für eine Analyse ausreichend juvenile Würmer dieser Art gefangen werden. An den drei Standorten E, Hü10 und BAD1L13 konnte die Art *L. rubellus* gewonnen werden. Im Vergleich zu den jeweiligen Boden-

werten zeigte sich für *L. rubellus* ein durchschnittlicher Anreicherungsfaktor von 10 (Spanne von 5 bei Hü10 – 15 bei E) und für adulte *A. caliginosa* ein durchschnittlicher Anreicherungsfaktor von 134,8 (Spanne von 56 bei Hü10 bis 251 bei BAD2A). Der höchste Anreicherungsfaktor in Regenwürmern von 281 im Vergleich zum PFC-Wert im Boden wurde für juvenile *A. caliginosa* errechnet. Auf den meisten Flächen überwog der Anteil an PFDoA, gefolgt von PFDA und PFUnA, wobei sich PFDoA in den Regen-

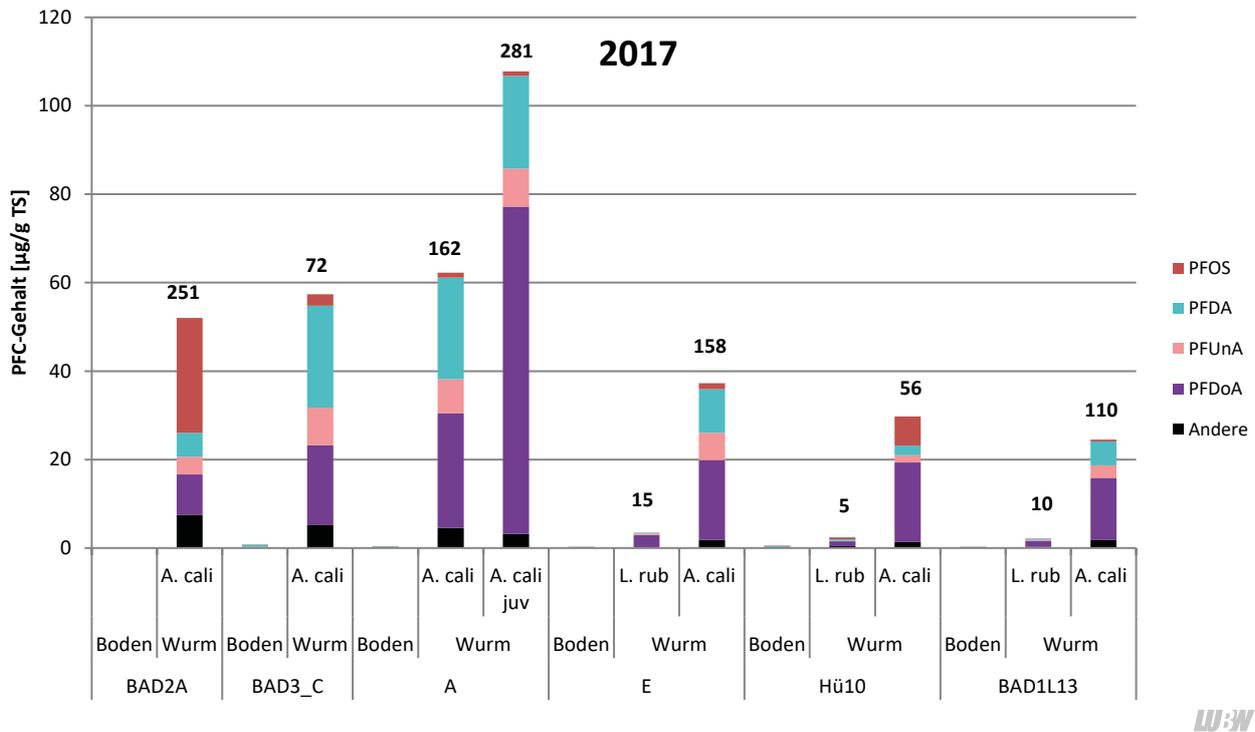


Abbildung 3.7: PFC-Gehalte in Regenwurm- und Bodenproben der mit PFC belasteten Standorte im Raum Rastatt/Baden-Baden des Jahres 2017 [µg/g Trockensubstanz]. Über den Balken dargestellt sind die Anreicherungsfaktoren der PFC-Gesamtgehalte in den Regenwurmproben im Vergleich zur jeweiligen Bodenprobe

würmern am stärksten anreicherte mit einem Spitzenanreicherungsfaktor von 1088 bei juvenilen *A. caliginosa* im Vergleich zum Bodenwert (Abbildungen 3.3 und 3.7). Am Standort BAD2A machte PFOS den Hauptbestandteil aus, gefolgt von PFDoA und PFDA.

3.5 Kleinsäugerproben

Abbildung 3.8 zeigt die PFC-Gesamtgehalte in den verschiedenen Kleinsäugerarten sowohl der Waldstandorte als auch der PFC-belasteten Standorte. Die höchsten Werte fanden sich in den Kleinsäufern der belasteten Flächen,

wobei Spitzmäuse die höchsten Gehalte aufwiesen, obwohl sie, wie oben beschrieben, ihre Nahrung sehr wahrscheinlich nicht nur auf den belasteten Flächen sammelten. Selbst herbivore Feldmäuse zeigten mit bis zu 1,4 µg/g Frischgewicht einen beträchtlichen PFC-Anteil in der Leber. Insgesamt wurden nur langkettige Verbindungen in den Kleinsäufern nachgewiesen, wobei die Substanz PFOS bei fast allen untersuchten Kleinsäufern den größten Anteil mit bis zu 96 % ausmachte. Kleinsäuger der belasteten Flächen reicherten neben PFOS auch beträchtliche Gehalte an PFDA, PF-3,7-DMOA und PFDoA an.

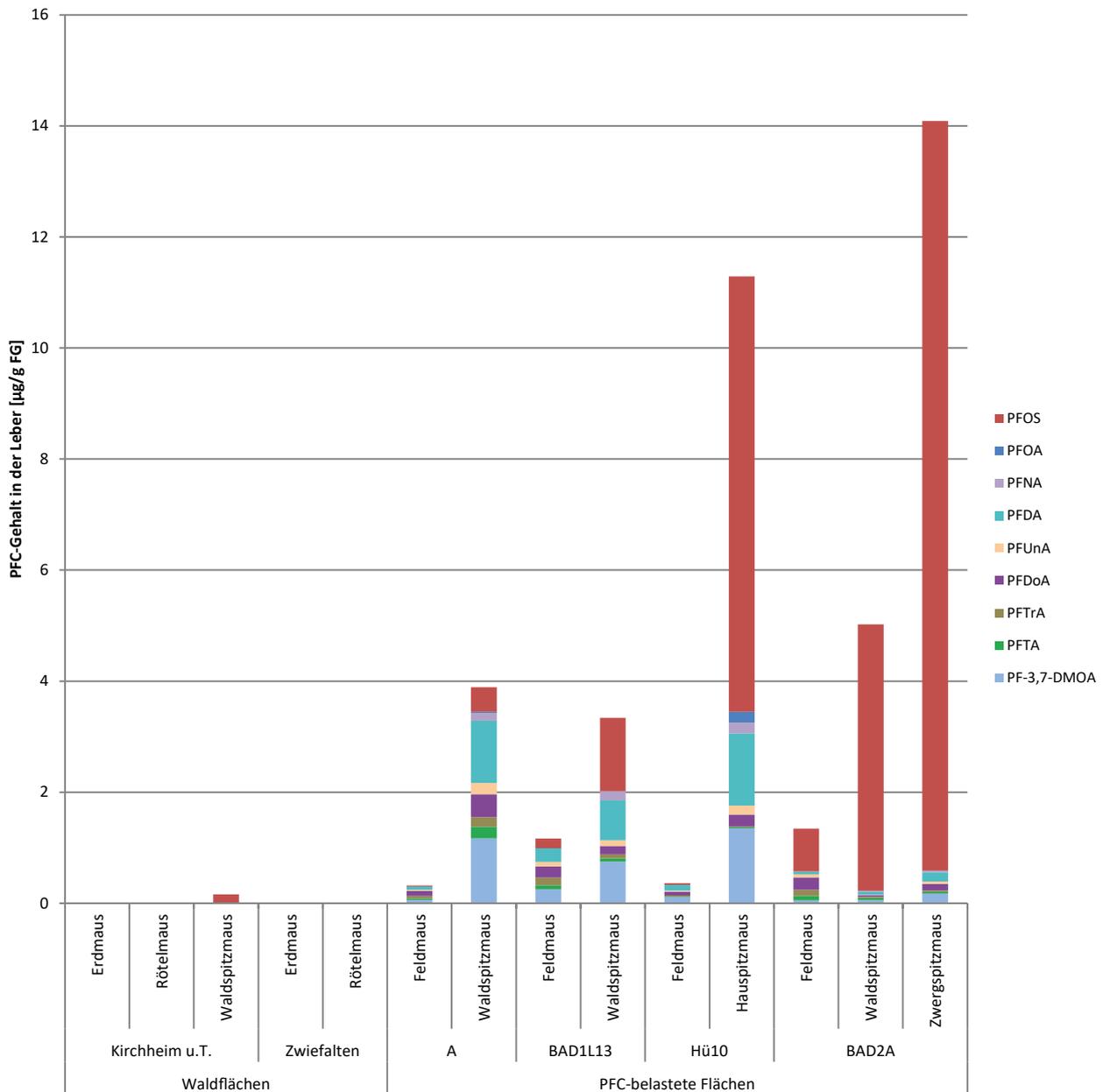


Abbildung 3.8: PFC-Gehalte der untersuchten Kleinsäugerleberproben [µg/g Frischgewicht] sowohl von Waldstandorten als auch von PFC-belasteten Standorten.

3.6 Kleinsäugerproben der Waldstandorte

Abbildung 3.9 zeigt die PFC-Gehalte in den Lebern von Kleinsäufern sowie in den Regenwürmern der beiden untersuchten hintergrundbelasteten Waldstandorte. Am Standort Kirchheim u. T. wurden Erdmäuse, Rötelmäuse und Spitzmäuse gefangen. Die fleischfressende Spitzmaus, zu deren Nahrung auch der Regenwurm zählt und die zudem einen immensen Stoffwechsel und damit einen sehr hohen Nahrungsbedarf hat, reichert mit 159 ng/g Frischgewicht etwa 30-mal mehr PFC an als die pflanzenfressende Erdmaus und die überwiegend pflanzenfressende Rötelmaus. Im Vergleich zur Regenwurmart *A. longa*, bei welcher neben PFOS vor allem kurzkettenige Verbindungen (PFBS, PFBA) gemessen wurden, reicherte die Waldspitzmaus insgesamt etwa 4-mal mehr PFC und 26-mal mehr PFOS an. Somit kann für diesen Standort eine deutliche Anreicherung von PFC im Nahrungsnetz festgestellt werden. Am

Standort Zwiefalten konnten trotz hoher Fallenanzahl keine Spitzmäuse, sondern nur Erd- und Rötelmäuse gefangen werden. Die PFC-Gehalte mit der sich überwiegend pflanzlich ernährenden Mäuse überschritt mit 8 bzw. 5 ng/g PFC die Gehalte der Regenwürmer nicht. In allen untersuchten Kleinsäugerarten der Waldstandorte stellte PFOS mit 67 – 100% den weitaus größten Anteil der PFC dar.

3.7 Kleinsäugerproben der PFC-belasteten Flächen

Abbildung 3.10 zeigt die PFC-Gesamtgehalte in den Lebern von Kleinsäufern sowie in den Regenwürmern der mit PFC belasteten Flächen. Dargestellt sind die PFC-Verbindungen, die sowohl in Regenwürmern als auch in Kleinsäufern gemessen wurden. Von den verschiedenen Kleinsäugerarten reicherten Spitzmäuse auch bei diesen Untersuchungsstandorten PFC am stärksten an. Die An-

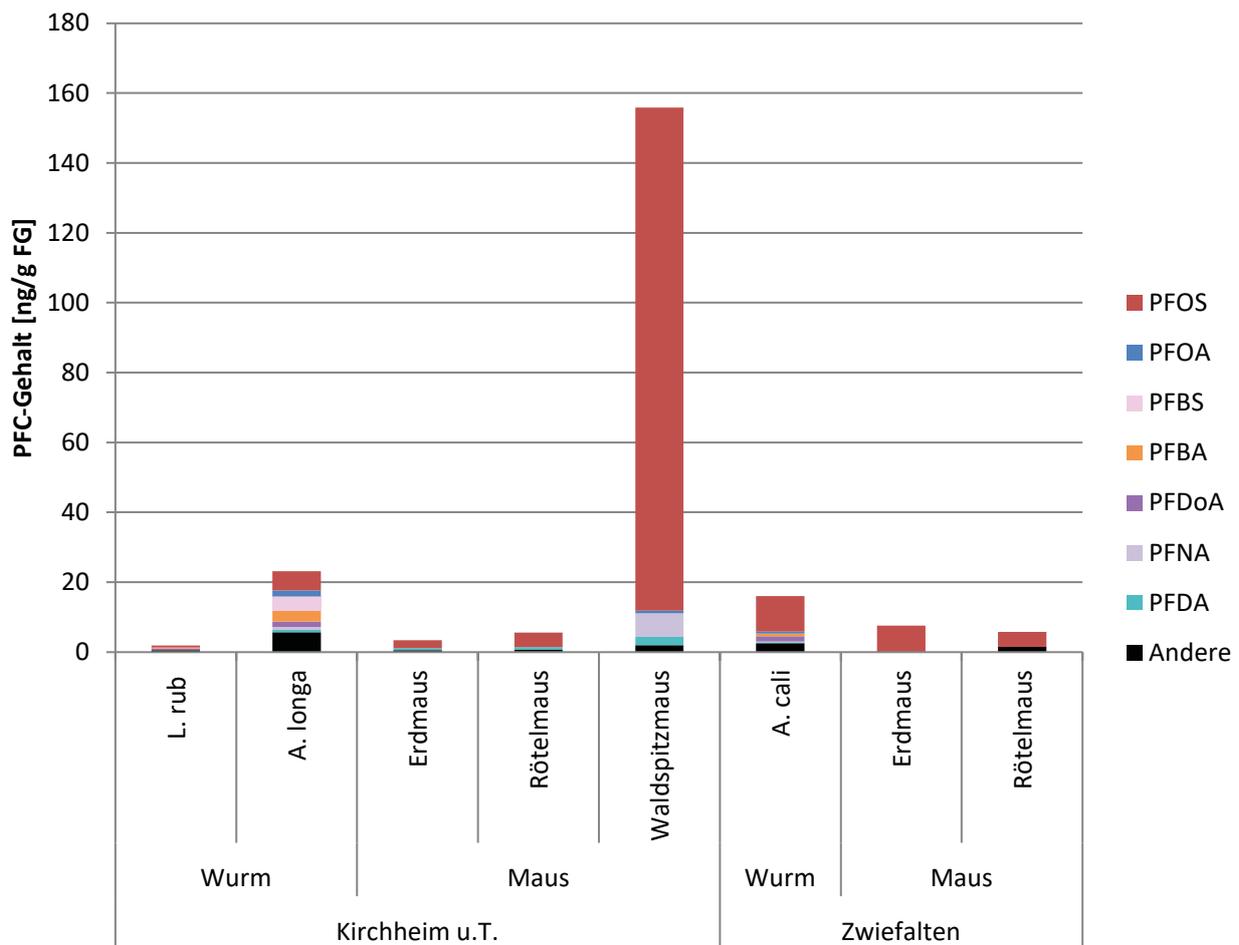


Abbildung 3.9: PFC-Gehalte in Regenwurmproben sowie in Lebern von Kleinsäufern der Waldstandorte Kirchheim u. T. und Zwiefalten [ng/g Frischgewicht].

reicherung im Nahrungsnetz wird jedoch nicht so deutlich wie am hintergrundbelasteten Standort Kirchheim u. T., da, wie oben bereits erwähnt, die Kleinsäuger nicht nur Nahrung aus den belasteten Bereichen, sondern vermutlich zum großen Teil auch von unbelasteten Flächen im Umkreis aufnehmen. An den Standorten BAD2A und Hü10 zeigte sich jedoch, dass Zwergspitzmäuse mit 14 µg/g und Hausspitzmäuse mit 10 µg/g PFC stärker anreicherten als die Regenwurmart *A. caliginosa* mit 9 bzw. 5 µg/g. Kleinsäuger der anderen Arten sowie der anderen beiden Standorte wiesen alle PFC-Werte in den Lebern auf, die unterhalb der Werte in der Regenwurmart *A. caliginosa* lagen. An allen belasteten Standorten reicherten Spitzmäuse jedoch mehr PFOS an als die Regenwürmer.

3.8 Anreicherungsmuster der PFC in den verschiedenen Matrices je Standort

An den Waldstandorten reicherte die Regenwurmart *L. rubellus* besonders die Substanzen PFDoA und HPPH_pA an sowie am Standort Kirchheim u. T. ebenfalls die Substanz PFOS. *A. longa* zeigt ein starkes Anreicherungsvermögen für die kurzkettigen Substanzen PFBA und PFBS sowie für PFOS und die Art *A. caliginosa* zeigt ein starkes Anreicherungsvermögen für PFOS gefolgt von PFDoA. Alle untersuchten Kleinsäuger der beiden hintergrundbelasteten Waldstandorte Kirchheim u. T. und Zwiefalten reicherten maßgeblich PFOS an.

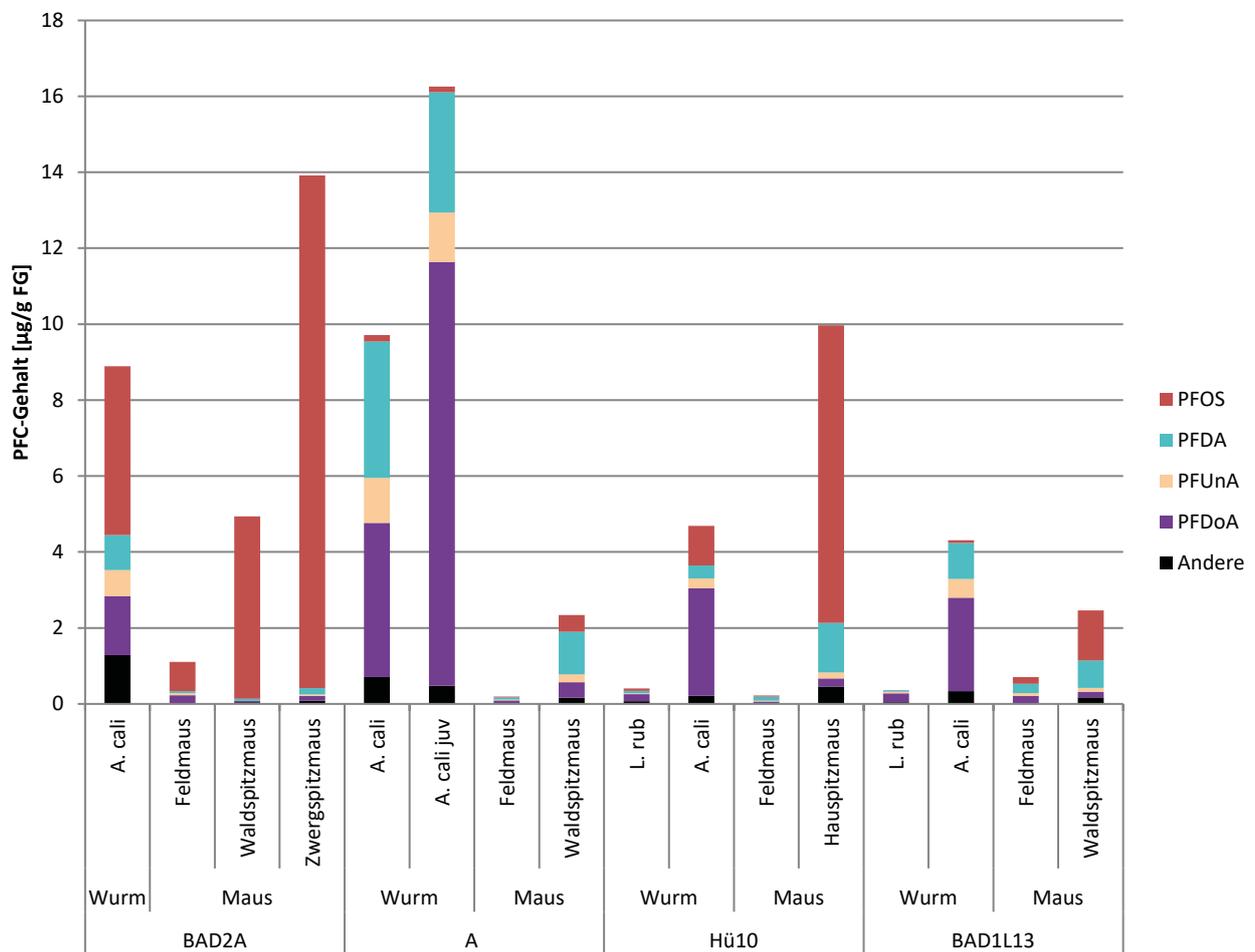


Abbildung 3.10: PFC-Gehalte in Regenwurmproben sowie in Lebern von Kleinsäufern der PFC-belasteten Standorte [µg/g Frischgewicht].

Tabelle 3.1: Abnehmende Reihenfolge der jeweils drei PFC-Verbindungen, die in den Probenmatrizes je Standort der Waldflächen mit den höchsten Werten gemessen wurden. Abkürzung n. m.: not measured (wurde nicht gemessen), < BG: Wert lag unterhalb der Bestimmungsgrenze

	Kirchheim u. T.	Zwiefalten	Karlsruhe	Tauberbischofsheim
Boden (Feststoff)	PFOS	PFOA	PFOS	< BG
L. rubellus	PFOS>PFD _o A=HPFH _p A	n. m.	PFD _o A=HPFH _p A>PFBA	PFD _o A>HPFH _p A>PFBA
A. longa	PFOS>PFBS>PFBA	n. m.	n. m.	n. m.
A. caliginosa	n. m.	PFOS>PFD _o A>PFUnA	n. m.	n. m.
Rötelmaus	PFOS> PFDA>PFUnA	PFOS>PFTrA	n.m	n.m
Erdmaus	PFOS>PFUnA>PFDA	PFOS	n.m	n.m
Waldspitzmaus	PFOS>PFNA>PFDMOA	n.m	n.m	n.m



Tabelle 3.2: Abnehmende Reihenfolge der jeweils drei PFC-Verbindungen, die in den Probenmatrizes je Standort der PFC-belasteten Flächen mit den höchsten Werten gemessen wurden. n. m.: not measured (wurde nicht gemessen)

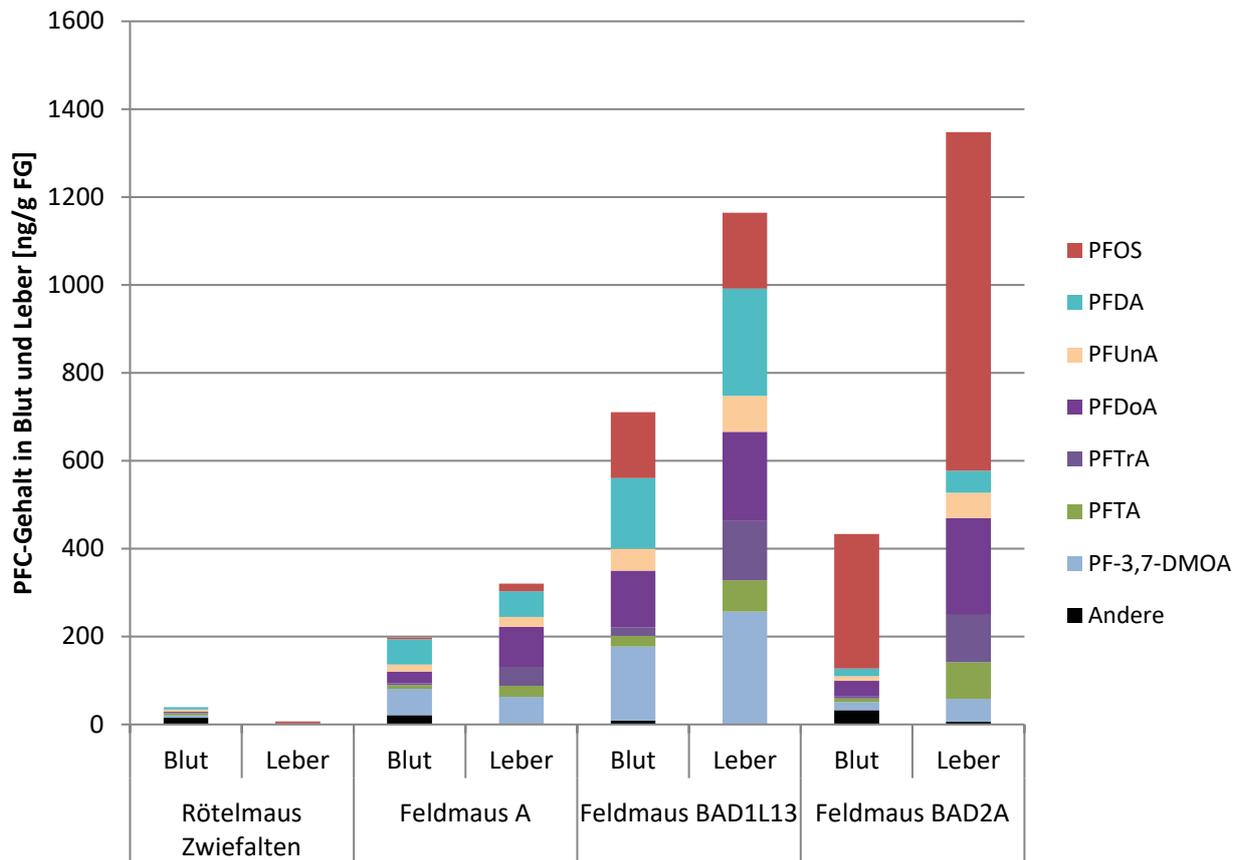
	BAD2A	BAD1L13	E	A	Hü10	BAD3_C
Boden (Feststoff)	PFOS>PFDA>PFD _o A	PFDA>PFD _o A>PFUnA	PFDA>PFD _o A>PFUnA	PFDA>PFD _o A>PFUnA	PFDA>PFD _o A>PFOS	PFDA>PFD _o A>PFUnA
L. rubellus	n. m.	PFD _o A> PFUnA>PFDA	PFD _o A>PFUnA>PFDA	n. m.	PFD _o A>PFDA>PFUnA	n. m.
A. caliginosa	PFOS>PFD _o A>PFDA	PFD _o A>PFDA>PFUnA	PFD _o A>PFDA>PFUnA	PFD _o A>PFDA>PFUnA	PFD _o A>PFOS>PFDA	PFDA>PFD _o A>PFUnA
Feldmaus	PFOS>PFD _o A>PFTrA	PFDMOA> PFDA>PFD _o A	n. m.	PFD _o A> PFDMOA>PFDA	PFDMOA>PFDA>PFD _o A	n. m.
Waldspitzmaus	PFOS>PFDMOA>PFDA	PFOS>PFDMOA>PFDA	n. m.	PFDMOA>PFDA>PFD _o A	n. m.	n. m.
Hausspitzmaus	n. m.	n. m.	n. m.	n. m.	PFOS>PFDMOA>PFDA	n. m.
Zwergspitzmaus	PFOS>PFDMOA>PFDA	n. m.	n. m.	n. m.	n. m.	n. m.



In den Böden der PFC-belasteten Flächen wurden im Wesentlichen die vier Substanzen PFDA, PFD_oA, PFOS und PFUnA gemessen. Das PFC-Muster in der Regenwurmart *A. caliginosa* entspricht bei allen Probestellen dem des Bodens (Abbildungen 3.3 und 3.7), wobei allerdings die Substanz PFD_oA in dieser Art im Vergleich zu den Bodenwerten stark angereichert wurde. Auch von der Art *L. rubellus* wurde PFD_oA besonders angereichert. Auch in den Kleinsäufern wurden vor allem die vier genannten Verbindungen gemessen, allerdings zeigt sich im Vergleich zum Verteilungsmuster in Boden- und Wurmproben, dass die Spitzmäuse besonders die Substanz PFOS anreichern. Besonders deutlich wird dies an den Probestellen BAD2A und Hü10, da dort auch schon hohe PFOS-Gehalte im Boden und im Wurm *A. caliginosa* vorzufinden waren. Bei den Feldmäusen spiegelt sich annähernd das Verteilungsmuster, wie es im Boden gefunden wurde.

3.9 Blutproben der Kleinsäuger

Von manchen Kleinsäufern konnten neben den Lebern auch ausreichende Mengen an Blut für eine PFC-Analyse gewonnen werden. Die Leberproben der Kleinsäuger der drei PFC belasteten Standorte waren bei den Standorten A und BAD1L13 um den Faktor 1,6 höher belastet als die jeweiligen Blutproben. Am Standort BAD2A war die Leberprobe 3,1-fach höher belastet als die Blutprobe. Anders zeigte es sich für den Waldstandort Zwiefalten: dort war die Blutprobe 6-fach höher mit PFC belastet als die Leberprobe (Abbildung 3.11). In allen Proben waren die PFOS-Gehalte in der Leber höher als im Blut. Die sehr geringen PFOA-Gehalte von etwa 5 ng/g Frischgewicht waren dagegen nur im Blut vertreten. Die kurzkettigen Vertreter (PFBA, PFHxA, PFHpA) überwogen im Blut, wohingegen die langkettigen Verbindungen vor allem in der Leber angereichert waren.



LUBW

Abbildung 3.11: PFC-Gehalte (ng/g Frischgewicht) in Blut- und Leberpoolproben von Rötelmäusen vom Standort Zwiefalten und Feldmäusen von den belasteten Standorten A, BAD1L13 und BAD2A.

3.10 Schwermetallgehalte in Nierenproben der Kleinsäuger

Von Rötelmäusen des Waldstandortes Zwiefalten sowie von Feldmäusen der mit PFC-belasteten Flächen A, BAD1L13 und BAD2A wurden Nierenproben auf die Schwermetalle Cadmium, Blei und Quecksilber untersucht. Es zeigte sich, dass Rötelmäuse des hintergrundbelasteten Waldstandortes mit 0,57 µg/g FG einen etwas höheren Cadmiumwert aufwiesen als Feldmäuse der PFC-belasteten Flächen mit 0,1 – 0,2 µg/g (Abbildung 3.12). Cadmium gelangt sowohl durch industrielle Emissionen als auch über Klärschlämme und Düngemittel in die Böden. Gewöhnliche Cadmiumkonzentrationen in nicht kontaminierten Böden liegen unterhalb von 1 µg/g [COOKE & JOHNSON 1996]. Waldböden und Ackerböden in Schleswig-Holstein wiesen mittlere Hintergrundwerte von 0,1 – 0,3 µg/g TS auf [LLUR 2011]. In Anbetracht dieser Werte und der Tatsache, dass Cadmium leicht für Pflanzen und Bodenorganismen verfügbar ist, liegen die Cadmiumkonzentrationen in den untersuchten Kleinsäufern sowohl vom Wald-

standort Zwiefalten als auch von den landwirtschaftlichen Flächen und der Grünlandfläche in einem niedrigen Bereich. Auch andere Untersuchungen von Kleinsäufern zeigen mit einem Wert von 0,5 µg/g FG in Gelbhalsmäusen [ALLGÖWER et al. 1996, Waldstandorte in Baden-Württemberg] und in Rötelmäusen [JANČOVÁ et al. 2002, Slowakei] eine ähnliche Größenordnung wie sie in der vorliegenden Studie gefunden wurde. Cadmium ist in der Lage, entscheidende Enzymprozesse zu beeinflussen, sodass sein kritischer Wert für eine Nierenbelastung in Ratten mit 40 µg/g TS angegeben wird [VESTERGAARD & SHAIKH 1994, entspricht etwa 10 µg/g FG]. Die in den vorliegenden Untersuchungen gefundenen Werte liegen deutlich darunter, sodass keine Gesundheitsgefährdung der Kleinsäuger durch Cadmium zu erwarten ist.

Die in den vorliegenden Untersuchungen festgestellten Bleibelastungen in den Kleinsäufernieren von 0,05 – 0,38 µg/g FG sind sehr gering. Im Vergleich zu früheren Untersuchungen (6 µg/g in Wühlmäuse aus Kärnten

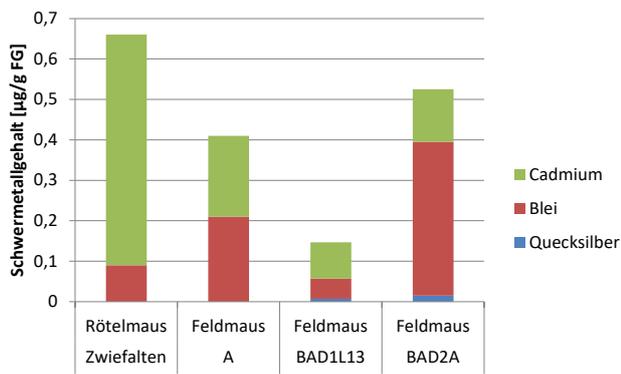


Abbildung 3.12: Schwermetall-Gehalte in Nierenproben [ng/g Frischgewicht] von Rötelmäusen des Waldstandortes Zwiefalten sowie von Feldmäusen belasteter Standorte

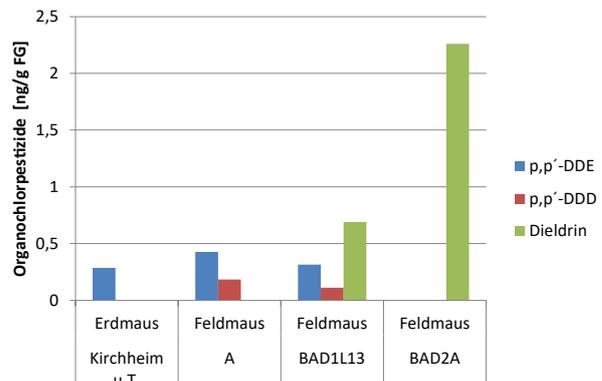


Abbildung 3.13: Organochlorpestizid-Gehalte (p,p'-DDE, p,p'-DDD sowie Dieldrin) in Leberproben [ng/g Frischgewicht] von Erdmäusen des Waldstandortes Kirchheim u. T. sowie von Feldmäusen der mit PFC-belasteten Standorte A, BAD1L13 und BAD2A

[GUTLEB et al. 1992] und 15 – 16 µg/g in Feld- und Rötelmäusen westlich von Tübingen [SCHAAL 1994]) sind die dargestellten Konzentrationen deutlich geringer, was auf das Verbot des verbleiten Benzins seit dem Jahre 1988 zurückzuführen ist. Untersuchungen der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung der LUBW [2013] zeigen zwischen 1988 und 2011 einen Rückgang der Bleigehalte in Pflanzen von Waldstandorten um mehr als 90%. Ein kritischer Level für durch Blei induzierte Effekte in den Nieren von Kleinsäugetieren liegt bei 7 – 8 µg/g FG [MA 1989]. Die in den vorliegenden Untersuchungen gefundenen Werte liegen deutlich darunter.

3.11 Persistente organische Schadstoffe in Leberproben der Kleinsäuger

Im Rahmen der Stockholm-Konvention über persistente organische Schadstoffe sind mittlerweile rund 30 Stoffe weltweit verboten oder beschränkt. Dazu gehören auch Organochlorpestizide und Polychlorierte Biphenyle (PCB). Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT) und Dieldrin wurden Anfang der 1970-er in Deutschland verboten, dennoch finden sie sich aufgrund ihrer Langlebigkeit Jahrzehnte später, wenn auch i. d. R. in Konzentrationen von weniger als 10 ng/g [BVL 2009], noch immer in der Umwelt. Dichlordiphenyldichlorethan (DDE) ist ein Abbauprodukt des DDT, welches länger als DDT selbst nachweisbar ist. Heute, viele Jahre nach dem DDT-Verbot, liegt das Verhältnis DDT zu DDE deutlich zugunsten des DDE, bzw. DDT ist, wie in den vorliegenden Untersuchungen, gar nicht mehr nachweisbar. In drei der vier untersuchten Leberproben (Standorte Kirchheim u. T., A und BAD1L13) wurde der Metabolit DDE im Bereich 0,3 – 0,4 ng/g FG und in zwei der Proben (A und BAD1L13) der

weitere Metabolit DDD im Bereich 0,1 – 0,2 ng/g FG nachgewiesen. Dieldrin fand sich in zwei Proben der Standorte BAD1L13 und BAD2A mit den Werten 0,7 und 2,3 ng/g FG (Abbildung 3.13). Im Jahr 1996 wurden in omnivoren Gelbhalsmäusen von Waldstandorten der damaligen LfU (heute LUBW) mittlere Konzentrationen von 0,4 ng/g FG DDT und 3,1 ng/g FG DDE sowie 1,8 ng/g FG Dieldrin gemessen [ALLGÖWER et al. 1996]. Vergleiche mit anderen herbivoren Primärkonsumenten zeigen DDE-Werte zwischen 0,1 und 0,2 ng/g FG und Dieldrin-Werte zwischen 0,04 und 0,2 ng/g FG in der Leber des einjährigen Rehs aus Bayrischem und Pfälzer Wald im Zeitraum 2010-2016 [UPB 2019]. Der Lebensmittelhöchstgehalt für Dieldrin liegt bei 20 ng/g [LGL Bayern 2011]. Dieser Wert wurde in den Lebern der Kleinsäuger nicht überschritten.

Die PCB-Produktion in Deutschland wurde 1989 verboten aber auch diese langlebigen Stoffe befinden sich noch immer in der Umwelt. In den vier untersuchten Kleinsäugerproben wurden von den sieben untersuchten nicht dioxinähnlichen Indikator-PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153 und 180) nur die höher chlorierten PCB 153 in drei Proben (Kirchheim u. T., A und BAD2A) und PCB 180 in zwei Proben (A und BAD2A) im Bereich 1,2 – 2,4 ng/g FG nachgewiesen (Abbildung 3.14). Frühere Untersuchungen der LfU (heute LUBW) zeigten im Jahr 1996 mit 13,4 ng/g FG PCB 153 und 10,7 ng/g FG PCB180 noch wesentlich höhere Werte in der Leber der Gelbhalsmaus [ALLGÖWER et al. 1996]. Vergleiche mit PCB-Gehalten in Rehlebern aus Bayrischem und Pfälzer Wald zeigen im Zeitraum zwischen 2010 – 2016 PCB 153-Werte zwischen 0,2 und 0,4 ng/g FG und PCB 180-Werte zwischen 0,05 und 0,4 ng/g FG [UPB 2019]. Der europaweit geltende Lebensmittelhöchstgehalt in Lebern landle-

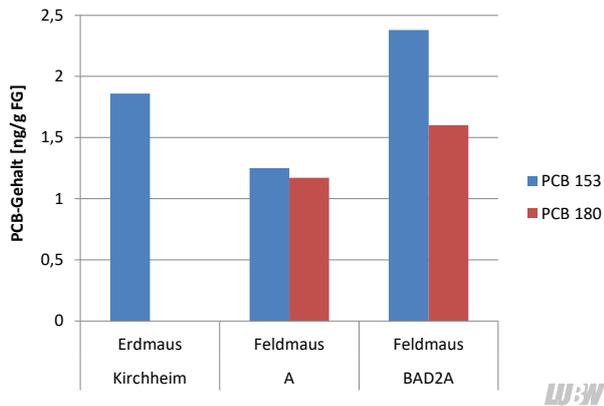


Abbildung 3.14: Polychlorierte Biphenyle (Summe der 7 Indikator-PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) in Leberproben von Erdmäusen des Waldstandortes Kirchheim u. T. sowie von Feldmäusen der mit PFC-belasteten Standorte A und BAD2A [ng/g Frischgewicht].

bender Tiere liegt bei 3 ng/g FG [BMU 2019]. Dieser Wert wurde in den Lebern der Kleinsäuger nicht überschritten.

3.12 Weichmacher und Pestizide in Leberproben der Kleinsäuger

Für die 16 untersuchten, noch im Einsatz befindlichen Pestizide kann hinsichtlich der Anreicherung in den untersuchten Kleinsäufern Entwarnung gegeben werden. Keines der analysierten Pestizide wurde oberhalb der Nachweisgrenze (2 – 200 ng/g TS je nach Verbindung) nachgewiesen. Auch von den 34 untersuchten Weichmachern wurden keine Verbindung oberhalb der Nachweisgrenze (0,07 – 0,5 µg/g FG je nach Verbindung) gefunden.

4 Abschließende Diskussion

Generell gilt zu beachten, dass, auch wenn PFC-Gehalte durch ihre Affinität zu Proteinen in aller Regel in Blut und Leber am höchsten sind [AHRENS et al. 2009, KELLY et al. 2009], ein direkter Vergleich der Regenwurmgesamtkörpergehalte mit den PFC-Werten in Lebern der Kleinsäuger in der vorliegenden Untersuchung nicht möglich ist. Die Gegenüberstellung soll eine Näherung darstellen, um eine Vorstellung über die Größenordnung der PFC-Anreicherung in der Nahrungskette zu erhalten.

In den vorliegenden Untersuchungen zeigte sich ein deutlicher Übertritt der in den Böden gemessenen PFC ins Nahrungsnetz, indem in den Regenwürmern eine extrem starke Anreicherung der PFC vorzufinden war. Regenwürmer haben im Vergleich zu anderen Bodenlebewesen eine lange Lebensdauer (etwa 2 – 8 Jahre) und können daher vorhandene Schadstoffbelastungen über mehrere Jahre akkumulieren. Sie besitzen eine permeable Hautstruktur, sodass neben Wasser und Atemgasen auch Schadstoffe über die Haut aufgenommen werden können und befinden sich in ständigem Bodenkontakt sowohl über die Haut als auch über den Darm. An den Waldstandorten wurde für *L. rubellus* ein mittlerer Anreicherungsfaktor (AF) des Gesamt-PFC-Gehaltes von 7,5 im Vergleich zum Boden berechnet, für *A. caliginosa* ein AF von 106 und für *A. longa* sogar ein AF von 135. An den mit PFC-belasteten Standorten wurde für *L. rubellus* ein mittlerer AF von 10 und für adulte *A. caliginosa* von 135 gefunden. Auch in anderen Untersuchungen wurde für die Schwermetalle Cadmium und Zink gezeigt, dass *A. caliginosa* stärker anreichert als *L. rubellus* [TISCHER 2009] wenn auch nicht mit einem solchen großen Unterschied wie in der vorliegenden Untersuchung. Auch zeigte sich, dass ein hoher organischer Anteil im Boden zu einer geringeren Bioverfügbarkeit der Schadstoffe führt [TISCHER 2008]. Epigäische Arten bevorzugen die Humusschicht, was eine Erklärung für den geringeren PFC-Gehalt in *L. rubellus* darstellen könnte. *A. caliginosa* als endogäische Art hingegen gräbt sich tief in den mineralischen Boden ein, wo der organische Anteil im Boden wesentlich geringer ist. Für die Regenwürmer zeigte sich in den vorliegenden Untersuchungen somit, dass der Grad der PFC-Anreicherung im Vergleich zum Bodenwert weniger abhängig von der PFC-Konzentration im Boden als vielmehr abhängig von der Regenwurmart ist.

Die Höhe der PFC-Anreicherung in den Kleinsäufern zeigte sich in den vorliegenden Untersuchungen als abhängig von deren Ernährungsweise. Lebern der carnivoren Spitzmäuse, welche zudem eine sehr hohe Stoffwechselrate und damit einen großen Nahrungsbedarf haben, enthielten die höchsten PFC-Gehalte. PFOS wurde in den Kleinsäufern in besonderem Maße angereichert und machte in fast allen Proben den Hauptanteil aus. An einer Waldfläche wurde der höchste PFC-Gesamtwert im Regenwurm etwa um ein Vierfaches überschritten und hinsichtlich der Substanz PFOS sogar um das 26-fache. Erd-, Feld- und Rötelmäuse hingegen wiesen auf den hintergrundbelasteten Waldflächen PFC-Gesamtwerte in der Größenordnung der Regenwürmer auf, was auch damit zusammenhängen kann, dass Kleinsäuger, anders als Regenwürmer, effektive Exkretionsmechanismen zur Schadstoffeliminierung besitzen [HEIKENS et al. 2001]. Von zwei der vier PFC-belasteten Acker- und Grünlandflächen war ebenfalls die Anreicherung der PFC-Gesamtwerte in Spitzmäusen höher als in Regenwürmern, jedoch nicht in dem Maße wie bei der Waldfläche Kirchheim u. T.. Dies liegt sehr wahrscheinlich daran, dass sich die gefangenen Kleinsäuger auch außerhalb der belasteten Flächen ernährt haben werden, da der Aktionsradius beispielsweise einer Spitzmaus etwa 500 m² beträgt. Dennoch zeigten sich in den Spitzmäusen beträchtliche PFC-Gehalte von bis zu 14 µg/g FG, die im Vergleich zu den anderen Mäusearten der belasteten Standorte etwa zwölfmal höher ausfielen.

Das Anreicherungsmuster der PFC-Einzelsubstanzen scheint in den untersuchten Organismen artabhängig zu sein: *L. rubellus* weist ein besonderes Anreicherungsvermögen für die Substanz PFDoA und bei den Waldflächen ebenfalls für HPFHpA auf, die Art *A. longa* reichert besonders PFOS sowie die kurzkettigen Verbindungen PFBS und PFBA an und die Art *A. caliginosa* reichert ebenfalls die Verbindung PFDoA im Vergleich zu den Bodenwerten am stärksten an. Alle Kleinsäuger der beiden Waldflächen sowie die Spitzmäuse der PFC-belasteten Flächen reichern maßgeblich die Verbindungen PFOS an. Bei den Feldmäusen der PFC-belasteten Flächen spiegelt sich annähernd das Verteilungsmuster, wie es im Boden gefunden wurde. Auch bei anderen Säugetieren (Otter, Wolf, Elch, Polarbär, arktischer Fuchs, Fuchs Gämse) werden in der Leber vor-

wiegend langkettige Verbindungen gemessen, wobei PFOS ebenfalls den weitaus größten Anteil ausmacht [RIEBE et al. 2015, HANSEN et al. 2019]. Bislang sind nur die beiden Verbindungen PFOS und PFOA hinreichend toxikologisch bewertet. Die vorliegende Datenlage weist jedoch darauf hin, dass sowohl eine Erhöhung der Toxizität als auch eine zunehmende Anreicherung im Organismus mit steigender Kettenlänge einhergeht [BUND 2015, RIEBE et al. 2015].

Joung et al. [2010] und Strubberud [2006] untersuchten die akute Toxizität von PFOS und PFOA auf den Kompostwurm *Eisenia fetida*, welcher in Toxizitätstest routinemäßig als Vertreter für Regenwürmer eingesetzt wird. Erst bei Konzentrationen von mehr als 10 mg PFOS/kg Boden bzw. von 16 mg PFOA/kg Boden wurden negative Auswirkungen auf die Reproduktion gefunden. Bezüglich Mortalität wurden erst bei Konzentrationen größer als 160 mg PFOS/kg Boden bzw. 500 mg PFOA/kg Boden Effekte auf die Würmer beobachtet. Diese Werte wurden selbst in den stark belasteten Böden im Raum Rastatt/Baden-Baden nicht überschritten, sodass kein Hinweis auf eine akute Toxizität für die Regenwürmer vorliegt. Bislang gibt es für PFOS und alle weiteren PFC noch keine festgeschriebenen PNEC bezogen auf Bodenlebewesen (*predicted no effect concentration*, Konzentration eines Stoffes in der Umwelt, unterhalb welcher schädliche Auswirkungen auf den betrachteten Umweltbereich nicht zu erwarten sind). Bei der Fläche BAD2A2 wurde jedoch die errechnete PNEC für PFOS von 100 µg/kg im Boden für Regenwürmer [STUBBERUD 2006] mit 110 µg/kg überschritten sodass ein Risiko für die dort lebenden Regenwürmer allerdings nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Akute Toxizität von PFOS für Ratten und Mäuse wird als mäßig beschrieben: Die mittlere letale Dosis (LD₅₀) beträgt 430 – 680 mg/kg Körpergewicht [KENNEDY JR. et al. 2004]. Die tolerierbare tägliche Aufnahmemenge (TDI; *tolerable daily intake*, beinhaltet den niedrigsten kritischen Toxizitätswert aus Laborversuchen inklusive einem Sicherheitsfaktor von 100) von PFOS für Ratten, welche hier näherungsweise für die Kleinsäuger herangezogen werden, beträgt jedoch 1,1 µg/kg Körpergewicht/Tag [Canadian Environmental Protection Act, 1999]. Dieses bedeutet umgerechnet für Rötelmäuse, dass sie 20 ng PFOS pro Tag zu sich nehmen könnten, ohne nachteilige Effekte zu erwarten. Dies entspricht etwa 4 Würmern der Art

A. caliginosa der hintergrundbelasteten Waldstandorte bzw. wäre bereits mit einem Wurm der Art *A. caliginosa* einer belasteten Fläche um etwa das 100-Fache überschritten. Untersuchungen von Waldmäusen (*Apodemus sylvaticus*) in einem entlegenen Gebiet in Belgien zeigten PFOS-Konzentrationen in der Leber von 0,14 – 1,11 µg/g FG und in unmittelbarer Nähe zu einer PFC-Produktionsstätte von 0,47 – 178,55 µg/g. Für das relative Lebergewicht sowie die mikrosomale Lipid-Peroxidation in der Leber wurde dabei am belasteten Standort eine signifikante Zunahme mit zunehmender PFOS-Konzentration in der Leber gefunden [HOFF et al. 2004]. In den vorliegenden Untersuchungen wurden in den Kleinsäugerlebern, welche an den hintergrundbelasteten Waldstandorten gewonnen wurden, PFOS-Werte zwischen 0,002 (Erdmaus) – 0,14 µg/g FG (Waldspitzmaus) gemessen. Die maximale PFOS-Konzentration von 13,5 µg/g in Kleinsäufern der PFC-belasteten Flächen wurde in einer Zwergspitzmaus gemessen. Somit sind für Kleinsäuger, welche sich von den belasteten Bereichen im Raum Rastatt/Baden-Baden ernähren, mögliche Effekte auf die Leber nicht auszuschließen.

Weiterhin sind Kleinsäuger eine wichtige Nahrungsquelle für Raubvögel und Raubtiere und die in ihnen gemessenen PFC-Gehalte können wiederum Hinweise für eine mögliche Gefährdung der nachstehenden Nahrungskettenglieder liefern und sogar potentielle gesundheitliche Risiken für den Menschen darstellen, wie kürzlich das Chemische und Veterinäruntersuchungsamt (CVUA) Freiburg darstellte: Hierbei wurden 44 Leberproben von Wildschweinen aus ganz Baden-Württemberg, welche sich als Allesfresser unter anderem auch von Mäusen und Regenwürmern ernähren, auf PFC untersucht. Es fanden sich durchgehend PFC-Gehalte in einer Höhe, welche dazu führten, dass diese Wildschweinlebern als nicht verkehrsfähig deklariert wurden, denn die tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge für PFOS bezogen auf den Menschen (TWI-Werte der EFSA, 2018) wäre mit etwa 3 g Wildschweinleber bei einem mittleren PFOS-Wert von 300 ng/g in den Lebern bereits ausgeschöpft gewesen [LAUFER et al. 2019].

Neben den PFC wurden in einigen Lebern und Nieren weitere umweltrelevante Stoffe analysiert. Von den untersuchten Weichmachern sowie den derzeit in Verwendung befindlichen Pestiziden wurden keine Verbindungen in den Kleinsäufern gemessen. Die Organochlorpestizide

DDE und Dieldrin und PCB konnten in den überwiegenden Proben gemessen werden, jedoch in unkritischen Konzentrationen (einstelliger ng/g-Bereich). Im Vergleich zu Kleinsäugeruntersuchungen anhand von herbivoren Gelbhalsmäusen aus dem Jahr 1996 [ALLGÖWER et al. 1996] nahm die Belastung mittlerweile etwa um den Faktor 5 für DDE und PCB 153 ab. In den untersuchten Nieren von Feld- und Rötelmaus fanden sich Cadmiumwerte im Bereich 90 – 570 ng/g und Bleigehalte von 50 – 380 ng/g. Quecksilber wurde in zwei Proben mit Werten von 7 – 15 ng/g nachgewiesen. Im Vergleich zu Monitoringdaten der Umweltprobenbank des Bundes [UPB 2019] von Rehlebern (ebenfalls Pflanzenfresser) liegen die gefundenen DDE-Werte in derselben Größenordnung. Gehalte an Dieldrin, PCB 153 und 180, sowie die gefundenen Schwermetallgehalte in den Mäuselebern liegen jedoch darüber, was an der höheren Stoffwechselrate der Kleinsäuger im Vergleich zu den Rehen liegen könnte. Die gemessenen

Konzentrationen können als sehr gering eingestuft werden und lassen keine gesundheitliche Gefährdung der Kleinsäuger erwarten.

Die Ergebnisse zeigen, dass PFC das Potential besitzen, sich entlang des terrestrischen Nahrungsnetzes anzureichern. Bei Betrachtung der Leitsubstanz PFOS findet sich für den Waldstandort Kirchheim u. T. folgende Beziehung: Im Waldboden wurde eine Hintergrundkonzentration von 1 ng PFOS/g Trockensubstanz gemessen, welche sich im Regenwurm *A. longa* bereits um das 67-fache anreichern kann. In Lebern der untersuchten Waldspitzmäuse, welche sich u. a. von Regenwürmern ernähren, findet sich ein PFOS-Wert von 144 ng/g FG, der etwa um den Faktor 30 höher ist als im Regenwurm *A. longa*. Auch wenn diese niedrigen Konzentrationen keine akuten Wirkungen auf die untersuchten Organismen ausüben, sind doch nachteilige chronische Effekte nicht auszuschließen.

5 Anhang

Tabelle 5.1: Gemessene PFC-Verbindungen in den Matrices Boden, Regenwurm und Kleinsäuger mit der jeweiligen Bestimmungsgrenze (BG) und Einheit. TS: Trockensubstanz, FG: Frischgewicht

	Boden				Regenwurm		Kleinsäuger	
	Eluat		Feststoff		BG	Einheit	BG	Einheit
	BG	Einheit	BG	Einheit				
Perfluorbutanoat (PFBA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
Perfluorpentanoat (PFPA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
Perfluorhexanoat (PFHxA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
Perfluorheptanoat (PFHpA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
Perfluoroctanoat (PFOA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
Perfluorononanoat (PFNA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
Perfluordecanoat (PFDA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
Perfluorundecanoat (PFUnA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
Perfluordodecanoat (PFDoA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,75	ng/g FG
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	–	–
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,75	ng/g FG
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,75	ng/g FG
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
Perfluordecansulfonat (PFDS)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,75	ng/g FG
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,5	ng/g FG
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	1	ng/g FG
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	–	–
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	–	–
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonat (H4PFOS)	0,001	µg/L	1	µg/kg TS	1	µg/kg TS	0,75	ng/g FG
Perfluortridecansäure (PFTrA)	–	–	–	–	–	–	0,5	ng/g FG
Perfluortetradecansäure (PFTA)	–	–	–	–	–	–	0,5	ng/g FG
Perfluor-3,7-dimethyloktansäure (PF-3,7-DMOA)	–	–	–	–	–	–	1	ng/g FG
4:2 Fluortelomersulfonat (H4PFHxS)	–	–	–	–	–	–	1	ng/g FG
8:2 Fluortelomersulfonat (FTS)	–	–	–	–	–	–	1	ng/g FG

LUBW

Tabelle 5.2: PFC-Gehalte im Feststoff der Waldbodenproben der Jahre 2011 und 2017 [µg/kg TS]. Bestimmungsgrenze (BG): 1 µg/kg

	Kirchheim u. T.		Zwiefalten		Karlsruhe		Tauberbischofsheim	
	2011	2017	2011	2017	2011	2017	2011	2017
PFBA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFPA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHxA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHpA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOA	< BG	< BG	< BG	1	< BG	< BG	< BG	< BG
PFNA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFDA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFUnA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFDoA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFBS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFPeS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHxS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

	Kirchheim u. T.		Zwiefalten		Karlsruhe		Tauberbischofsheim	
	2011	2017	2011	2017	2011	2017	2011	2017
PFHpS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOS	1	1	< BG	< BG	2	2	< BG	< BG
PFDS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOSA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
HPFHpA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H2PFDA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFUnA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFOS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

LUBW

Tabelle 5.3: PFC-Gehalte der Eluatproben der Waldstandorte der Jahre 2011 und 2017 [$\mu\text{g/L}$]. Bestimmungsgrenze (BG): 0,001 $\mu\text{g/L}$

	Kirchheim u. T.		Zwiefalten		Karlsruhe		Tauberbischofsheim	
	2011	2017	2011	2017	2011	2017	2011	2017
PFBA	0,062	< BG	0,13	0,022	0,13	0,065	0,083	0,002
PFPA	0,019	< BG	0,039	0,005	0,045	0,015	0,020	< BG
PFHxA	0,030	< BG	0,056	0,011	0,068	0,02	0,033	0,001
PFHpA	0,025	0,001	0,037	0,009	0,055	0,02	0,024	0,002
PFOA	0,061	0,011	0,098	0,019	0,13	0,046	0,072	0,013
PFNA	0,005	0,002	0,009	0,002	0,01	0,007	0,008	0,004
PFDA	< BG	< BG	< BG	< BG	0,003	0,003	0,002	0,002
PFUnA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFDoA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFBS	0,007	< BG	0,007	0,003	0,021	0,012	0,007	0,002
PFPeS	0,001	< BG	< BG	< BG	0,004	0,002	0,002	< BG
PFHxS	0,007	0,002	0,001	< BG	0,012	0,005	0,006	0,001
PFHpS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOS	0,031	0,022	0,010	0,005	0,032	0,024	0,027	0,025
PFDS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOSA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
HPFHpA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H2PFDA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFUnA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFOS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Summe PFC	0,25	0,04	0,39	0,08	0,51	0,22	0,28	0,05

LUBW

Tabelle 5.4: PFC-Gehalte der Feststoffproben der belasteten Flächen des Jahres 2017 [$\mu\text{g/kg TS}$], Bestimmungsgrenze: 1 $\mu\text{g/kg}$

	BAD2A	BAD1L13	E	A	Hü10	BAD3_C
PFBA	3	6	< BG	2	2	3
PFPA	6	11	2	3	4	6
PFHxA	2	8	2	4	4	9
PFHpA	1	4	2	3	3	6
PFOA	4	22	10	22	22	38
PFNA	2	9	11	26	12	40
PFDA	41	100	130	220	230	460
PFUnA	9	20	22	32	47	73

	BAD2A	BAD1L13	E	A	Hü10	BAD3_C
PFDoA	21	40	50	68	96	140
PFBS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFPeS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHxS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHpS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOS	110	2	7	4	98	17
PFDS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOSA	8	< BG	< BG	< BG	15	< BG
HPFHpA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H2PFDA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFUnA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFOS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG

LUBW

Tabelle 5.5: PFC-Gehalte der Eluate der belasteten Flächen des Jahres 2017 [$\mu\text{g/L}$], Bestimmungsgrenze 0,001 $\mu\text{g/L}$

	BAD2A	A	E	BAD3_C	BAD1L13	Hü10
PFBA	1,5	0,65	0,47	0,78	1,8	0,85
PFPA	2,1	1,1	0,73	1,2	3,1	1,7
PFHxA	1,0	1,1	0,80	2,0	3,0	1,3
PFHpA	0,65	1,1	0,81	1,4	1,8	1,1
PFOA	1,5	6,1	2,7	6,1	8,0	7,7
PFNA	0,33	3,9	1,5	2,9	1,8	2,1
PFDA	1,6	12	22	15	14	29
PFUnA	0,080	0,37	0,24	0,54	0,36	0,54
PFDoA	0,078	0,43	0,44	0,65	0,15	0,56
PFBS	0,002	< BG	< BG	< BG	0,001	< BG
PFPeS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHxS	0,003	< BG	< BG	< BG	< BG	0,006
PFHpS	0,010	< BG	< BG	0,002	< BG	0,016
PFOS	6,3	0,28	0,35	0,60	0,16	12
PFDS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOSA	0,067	0,006	0,006	0,008	< BG	0,30
HPFHpA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H2PFDA	< BG	0,002	< BG	0,004	< BG	0,006
H4PFUnA	< BG	< BG	< BG	0,036	< BG	0,003
H4PFOS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Summe PFC	15,22	27,04	30,05	31,22	34,17	57,18

LUBW

Tabelle 5.6: PFC-Gehalte in Regenwürmern (*Lumbricus rubellus*) der Waldstandorte des Jahres 2011. Bestimmungsgrenze (BG): 1 $\mu\text{g/kg TS}$

	Zwiefalten	Kirchheim u. T.	Tauberbischofsheim	Karlsruhe
PFBA	< BG	< BG	< BG	< BG
PFPA	< BG	1	< BG	1
PFHxA	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHpA	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOA	< BG	< BG	< BG	< BG
PFNA	< BG	< BG	< BG	< BG

	Zwiefalten	Kirchheim u. T.	Tauberbischofsheim	Karlsruhe
PFDA	< BG	< BG	< BG	< BG
PFUnA	2	< BG	< BG	< BG
PFDoA	3	5	4	4
PFBS	< BG	< BG	< BG	< BG
PFPeS	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHxS	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHpS	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOS	4	2	2	2
PFDS	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOSA	< BG	< BG	< BG	< BG
HPFHpA	2	2	2	2
H2PFDA	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFUnA	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFOS	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFDS	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFHxS	< BG	< BG	< BG	< BG
PFC-Summe	11	10	8	9

LUBW

Tabelle 5.7: PFC-Gehalte in Regenwürmern der Waldstandorte des Jahres 2017. Bestimmungsgrenze (BG): 1 µg/kg TS

	Tauberbischofsheim	Zwiefalten	Kirchheim u. T.		Karlsruhe
	<i>L. rubellus</i>	<i>A. caliginosa</i>	<i>L. rubellus</i>	<i>A. longa</i>	<i>L. rubellus</i>
PFBA	1	5	2	18	1
PFPA	< BG	< BG	1	3	< BG
PFHxA	< BG	3	< BG	6	< BG
PFHpA	< BG	2	< BG	7	< BG
PFOA	< BG	4	< BG	10	< BG
PFNA	< BG	1	< BG	5	< BG
PFDA	< BG	2	< BG	4	< BG
PFUnA	< BG	6	< BG	5	< BG
PFDoA	3	10	3	9	3
PFBS	< BG	< BG	< BG	24	< BG
PFPeS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHxS	< BG	2	< BG	9	< BG
PFHpS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOS	< BG	67	4	32	< BG
PFDS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOSA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
HPFHpA	2	4	3	3	3
H2PFDA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFUnA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFOS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFDS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFHxS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFC-Summe	6	106	13	135	7

LUBW

Tabelle 5.8: PFC-Gehalte in Regenwürmern der belasteten Standorte des Jahres 2017. Bestimmungsgrenze (BG): 1 µg/kg TS

	BAD2A	BAD3_C	A		E		Hü10		BAD1L13	
	A. cali	A. cali	A. cali	A. cali juv	L. rub	A. cali	L. rub	A. cali	L. rub	A. cali
PFBA	1900	240	400	340	16	260	12	70	43	290
PFPA	2400	380	930	840	50	490	70	210	120	630
PFHxA	690	320	850	810	32	400	34	130	43	220
PFHpA	480	230	250	220	11	160	13	48	17	120
PFOA	290	880	1100	510	12	310	54	140	30	420
PFNA	140	750	790	290	7	160	25	60	12	170
PFDA	5400	23000	23000	21000	230	9900	360	2200	210	5400
PFUnA	4000	8500	7600	8600	270	6200	150	1600	240	2800
PFDoA	9100	18000	26000	74000	2800	18000	1100	18000	1400	14000
PFBS	5	< BG	1	< BG	< BG	2	< BG	< BG	< BG	< BG
PFPeS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHxS	20	3	< BG	< BG	< BG	5	1	3	< BG	< BG
PFHpS	99	6	< BG	2	< BG	< BG	< BG	15	< BG	< BG
PFOS	26000	2600	1100	1000	50	1300	410	6600	19	420
PFDS	45	4	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	3	< BG	< BG
PFOSA	1400	24	26	22	4	20	180	640	2	5
HPFHpA	4	3	4	4	2	4	3	3	2	4
H2PFDA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
H4PFUnA	32	2400	39	33	3	16	11	11	2	8
H4PFOS	2	6	15	9	< BG	3	< BG	5	< BG	5
H4PFDS	13	24	120	73	3	14	5		4	27
H4PFHxS	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG		< BG	< BG
PFC-Summe	52020	57370	62225	107753	3490	37244	2428		2144	24519



Tabelle 5.9: PFC-Gehalte in Kleinsäugerlebern der Waldstandorte [ng/g FG]

	Kirchheim u. T.			Zwiefalten	
	Waldspitzmaus	Erdmaus	Rötelmaus	Rötelmaus	Erdmaus
PFOS	144	2,36	4,18	4,29	7,62
PFOA	0,727	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFBS	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75
PFBA	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFPeA	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFHxS	0,854	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75
PFHxA	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFHpS	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75
PFHpA	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFOSA	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFNA	6,75	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFDS	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75
PFDeA	2,38	0,536	0,729	< 0,5	< 0,5
PFUnA	1,12	0,543	0,661	< 0,5	< 0,5
PFDoA	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFTrA	1,23	< 0,5	0,557	0,829	< 0,5

	Kirchheim u. T.			Zwiefalten	
	Waldspitzmaus	Erdmaus	Rötelmaus	Rötelmaus	Erdmaus
PFTA	0,526	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PF-3,7-DMOA	2,48	< 1	< 1	< 1	< 1
HPFHpA	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
H4PFOS	< 0,75	< 0,75	< 0,75	1,5	< 0,75
H4PFHxS	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
FTS	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

LUBW

Tabelle 5.10: PFC-Gehalte in Kleinsäugerlebern der belasteten Standorte [ng/g FG]

	A, Waldspitzmaus	A, Feldmaus	BAD1L13, Waldspitzmaus	BAD1L13, Feldmaus	Hü10, Hausspitzmaus	Hü10, Feldmaus	BAD2A, Waldspitzmaus	BAD2A, Zwergspitzmaus	BAD2A, Feldmaus
PFOS	442	17,7	1320	173	7840	28	4800	13500	770
PFOA	22,8	< 0,5	4,9	< 0,5	192	< 0,5	2,95	2,28	< 0,5
PFBS	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75
PFBA	< 0,5	1,61	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFPeA	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFHxS	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	32,3	< 0,75	2,92	< 0,75	< 0,75
PFHxA	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFHpS	< 0,75	< 0,75	1,11	< 0,75	7,76	< 0,75	6,09	5,98	< 0,75
PFHpA	0,792	< 0,5	1,37	< 0,5	10,6	< 0,5	< 0,5	1,04	< 0,5
PFOSA	< 0,5	< 0,5	0,642	< 0,5	17,8	< 0,5	16,5	47,9	5,08
PFNA	139	0,754	160	2,57	194	< 0,5	11,2	28,3	0,916
PFDS	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	1,94	< 0,75
PFDeA	1120	58,4	718	244	1300	104	54,6	167	50,5
PFUnA	205	23	105	81,1	163	20,7	6,62	45,2	57,3
PFDoA	409	90,4	150	203	213	65,1	35	116	220
PFTTrA	176	43,3	72,7	135	16	21,7	18,6	27	108
PFTA	207	24,7	60,5	71,5	19,7	11,8	37,9	28,8	82,9
PF-3,7-DMOA	1170	60,8	748	254	1350	108	56,9	174	52,6
HPFHpA	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
H4PFOS	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75
H4PFHxS	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
FTS	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

LUBW

Tabelle 5.11: PFC-Gehalte im Blut der Kleinsäuger [ng/g FG]

	Zwiefalten, Rötelmaus	A, Feldmaus	BAD1L13, Feldmaus	BAD2A, Feldmaus
PFOS	< 2,62	4,06	150	306
PFOA	6,18	4,57	3,79	5,04
PFBS	< 3,93	< 2,67	< 2,35	< 2,74
PFBA	3,03	10,1	2,24	4,37
PFPeA	< 2,62	< 1,78	< 1,57	< 1,82
PFHxS	< 3,93	< 2,67	< 2,35	< 2,74
PFHxA	2,63	1,98	< 1,57	< 1,82
PFHpS	< 3,93	< 2,67	< 2,35	< 2,74

	Zwiefalten, Rötelmaus	A, Feldmaus	BAD1L13, Feldmaus	BAD2A, Feldmaus
PFHpA	< 2,62	< 1,78	< 1,57	1,95
PFOSA	< 2,62	< 1,78	< 1,57	17,1
PFNA	3,49	4,4	2,8	3,88
PFDS	< 3,93	< 2,67	< 2,35	< 2,74
PFDeA	5,11	57,5	161	17,6
PFUnA	4,83	15,8	49,4	10,8
PFDoA	3,49	26,2	129	35,4
PFTTrA	< 2,62	4,53	19,6	4,41
PFTA	4,95	8,62	24,8	8,58
PF-3,7-DMOA	5,32	59,9	168	18,3
HPFHpA	< 5,24	< 3,57	< 3,13	< 3,65
H4PFOS	< 3,93	< 2,67	< 2,35	< 2,74
H4PFHxS	< 5,24	< 3,57	< 3,13	< 3,65
FTS	< 5,24	< 3,57	< 3,13	< 3,65

LUBW

Tabelle 5.12: Schwermetall-Gehalte in Kleinsäugernieren [$\mu\text{g/g}$ FG]

	Zwiefalten, Rötelmaus	A, Feldmaus	BAD1L13, Feldmaus	BAD2A, Feldmaus
Quecksilber (Hg)	< 0,005	< 0,005	0,007	0,015
Blei (Pb)	0,09	0,21	0,05	0,38
Cadmium (Cd)	0,57	0,2	0,09	0,13

LUBW

Tabelle 5.13: Gehalten an Polychlorierten Biphenylen (PCB) in Kleinsäugerlebern [ng/g FG]

	Kirchheim u. T., Erdmaus	Zwiefalten, Rötelmaus	A, Feldmaus	BAD1L13, Feldmaus	BAD2A, Feldmaus
PCB 28	< 0,758	< 0,36	< 0,35	< 0,368	< 0,758
PCB 52	< 0,758	< 0,36	< 0,35	< 0,368	< 0,758
PCB 101	< 1,52	< 0,719	< 0,699	< 0,735	< 1,52
PCB 118	< 0,758	< 0,36	< 0,35	< 0,368	< 0,758
PCB 138	< 1,52	< 0,719	< 0,699	< 0,735	< 1,52
PCB 153	1,86	< 0,719	1,25	< 0,735	2,38
PCB 180	< 0,758	< 0,36	1,17	< 0,368	1,6

LUBW

Tabelle 5.14: Gehalten an Organochlorpestiziden in Kleinsäugerlebern [ng/g FG]

	Kirchheim u. T., Erdmaus	A, Feldmaus	BAD1L13, Feldmaus	BAD2A, Feldmaus	Zwiefalten, Rötelmaus
Pentachlorbenzol	< 0,758	< 0,35	< 0,368	< 0,758	< 0,36
Hexachlorbenzol	< 0,758	< 0,35	< 0,368	< 0,758	< 0,36
HCH, alpha-	< 0,379	< 0,175	< 0,184	< 0,379	< 0,18
HCH, beta-	< 0,379	< 0,175	< 0,184	< 0,379	< 0,18
HCH, gamma-	< 0,379	< 0,175	< 0,184	< 0,379	< 0,18
HCH, delta-	< 0,379	< 0,175	< 0,184	< 0,379	< 0,18
DDT, o,p'-	< 0,152	< 0,0699	< 0,0735	< 0,152	< 0,0719
p,p'-DDT	< 0,152	< 0,0699	< 0,0735	< 0,152	< 0,0719
o,p'-DDE	< 0,152	< 0,0699	< 0,0735	< 0,152	< 0,0719
DDE, p,p'-	0,286	0,427	0,314	< 0,152	< 0,0719

	Kirchheim u. T., Erdmaus	A, Feldmaus	BAD1L13, Feldmaus	BAD2A, Feldmaus	Zwiefalten, Rötelmaus
o,p'-DDD	< 0,152	< 0,0699	< 0,0735	< 0,152	< 0,0719
p,p'-DDD	< 0,152	0,183	0,112	< 0,152	< 0,0719
Aldrin	< 0,244	< 0,0699	< 0,0735	< 0,152	< 0,0719
Dieldrin	< 0,227	< 0,105	0,69	2,26	< 0,108
Endrin	< 0,455	< 0,21	< 0,221	< 0,455	< 0,216
Toxaphen Parlar-Nr. 26	< 0,758	< 0,35	< 0,368	< 0,758	< 0,36
Toxaphen Parlar-Nr. 50	< 0,758	< 0,35	< 0,368	< 0,758	< 0,36
Toxaphen Parlar-Nr. 62	< 1,52	< 0,699	< 0,735	< 1,52	< 0,719
Mirex	< 0,152	< 0,0699	< 0,0735	< 0,152	< 0,0719
Chlordan, cis-	< 0,152	< 0,0699	< 0,0735	< 0,152	< 0,0719
Chlordan, trans-	< 0,152	< 0,0699	< 0,0735	< 0,152	< 0,0719
Chlordan, oxy-	< 0,758	< 0,35	< 0,368	< 0,758	< 0,36
Nonachlor, trans-	< 0,0758	< 0,035	< 0,0368	< 0,0758	< 0,036
Heptachlor	< 0,152	< 0,0699	< 0,0735	< 0,152	< 0,0719
Heptachlorepoxyd, cis-	< 0,227	< 0,105	< 0,11	< 0,227	< 0,108
Heptachlorepoxyd, trans-	< 0,455	< 0,21	< 0,221	< 0,455	< 0,216
Octachlorstyrol	< 0,0758	< 0,035	< 0,0368	< 0,0758	< 0,036



Tabelle 5.15: In den Kleinsäugerlebern analysierte Weichmacher und Pestizide ohne Befunde [$\mu\text{g/g}$ FG]

	Bestimmungs- grenze		Bestimmungs- grenze	
Weichmacher	DINCH	0,5	Aclonifen	0,02
	Diethylhexylphthalat (DEHP)	0,1	Chlorthalonil	0,005
	Dimethylphthalat (DMP)	0,1	Chlorpyrifos (-ethyl)	0,005
	Di-n-octylphthalat (DNOP)	0,1	Chlorpyriphos-methyl	0,01
	Di-n-pentylphthalat (DnPP)	0,1	Cyhalothrin, lambda-	0,002
	Diisoheptylphthalat (DIHpP)	0,5	BifenoX	0,005
	Diethylhexyladipat (DEHA)	0,1	Cypermethrin, alpha-	0,005
	Diisodecylphthalat (DIDP)	0,5	Diffenican	0,005
	Diisobutylphthalat (DIBP)	0,1	Indoxacarb	0,01
	Dicyclohexylphthalat (DCHP)	0,1	Bromoxynil-Heptanoat	0,2
	Diphenylphthalat (DPheP)	0,1	Bromoxynil-Octanoat	0,2
	Diethylphthalat (DEP)	0,1	Thiacloprid	0,005
	Butylbenzylphthalat (BBP)	0,1	Imidacloprid	0,005
	Acetyltributylcitrat (ATBC)	0,1	Clothianidin	0,01
	Dibutylphthalat (DBP)	0,07	Prosulfocarb	0,05
	Diisononylphthalat (DINP)	0,5	Bixafen	0,02
	Tri-n-butylphosphat (TBP)	0,1	Pyraclostrobin	0,005
	Di-isobutyladipat (DIBA)	0,1	Thiamethoxam	0,005
	Dibutyladipat (DBA)	0,1		
	Diethyladipat (DEA)	0,1		
	Bis(4-methyl-2-pentyl)phthalat (BMPP)	0,1		
	Bis(2-ethoxyethyl)phthalat (DEEP)	0,1		
	Dihexylphthalat (DHXP)	0,1		
	Di-(2-methoxyethyl)phthalat (DMEP)	0,1		
	Dibenzylphthalat (DBenzP)	0,1		
	Di-heptylphthalat (DHP)	0,1		
	Diallylphthalat (DAP)	0,1		
	Diisopropylphthalat (DiisopropP)	0,1		
	Triethyl 2-acetylcitrat (ATEC)	0,1		
	Dipropylphthalat (DPrP)	0,1		
Diisopentylphthalat (DiPP)	0,1			
Dimethylisophthalat (DMIP)	0,5			
Dipropylheptylphthalat (DPHP)	0,1			
Triisobutylphosphat (TIBP)	0,1			
		Pestizid-Screening		

LUBW

6 Abbildungen und Tabellen

6.1 Abbildungen

Abbildung 1.1: Hausspitzmaus frisst einen Regenwurm; Quelle: shutterstock_745678465, Eric Isseele/shutterstock.com	10
Abbildung 3.1: PFC-Gehalte der Feststoffproben [ng/g Trockensubstanz] der Waldstandorte aus den Jahren 2011 und 2017. Bestimmungsgrenze: 1 ng/g TS. < BG: kleiner Bestimmungsgrenze.	14
Abbildung 3.2: PFC-Gehalte der 2:1-Schüttel-Eluate [$\mu\text{g/L}$] der Waldstandorte. Proben der Jahre 2011 und 2017. Bestimmungsgrenze: 0,001 $\mu\text{g/L}$.	14
Abbildung 3.3: PFC-Gehalte der Feststoffproben [ng/g Trockensubstanz] der mit PFC belasteten Standorte im Raum Rastatt/Baden-Baden.	15
Abbildung 3.4: PFC-Gehalte der 2:1-Schüttel-Eluate [$\mu\text{g/L}$] der mit PFC belasteten Standorte im Raum Rastatt/Baden-Baden.	15
Abbildung 3.5: PFC-Gehalte in Regenwurm- und Bodenproben der Waldstandorte des Jahres 2011 [ng/g Trockensubstanz]. Über den Balken dargestellt sind die Anreicherungsfaktoren der PFC-Gesamtgehalte in den Regenwurmproben im Vergleich zur jeweiligen Bodenprobe. < BG: kleiner Bestimmungsgrenze.	16
Abbildung 3.7: PFC-Gehalte in Regenwurm- und Bodenproben der mit PFC belasteten Standorte im Raum Rastatt/Baden-Baden des Jahres 2017 [$\mu\text{g/g}$ Trockensubstanz]. Über den Balken dargestellt sind die Anreicherungsfaktoren der PFC-Gesamtgehalte in den Regenwurmproben im Vergleich zur jeweiligen Bodenprobe.	16
Abbildung 3.6: PFC-Gehalte in Regenwurm- und Bodenproben der Waldstandorte des Jahres 2017 [ng/g Trockensubstanz]. Über den Balken dargestellt sind die Anreicherungsfaktoren der PFC-Gesamtgehalte in den Regenwurmproben im Vergleich zur jeweiligen Bodenprobe. < BG: kleiner Bestimmungsgrenze.	16
Abbildung 3.8: PFC-Gehalte der untersuchten Kleinsäugerleberproben [$\mu\text{g/g}$ Frischgewicht] sowohl von Waldstandorten als auch von PFC-belasteten Standorten.	17
Abbildung 3.9: PFC-Gehalte in Regenwurmproben sowie in Lebern von Kleinsäufern der Waldstandorte Kirchheim u. T. und Zwiefalten [ng/g Frischgewicht].	18
Abbildung 3.10: PFC-Gehalte in Regenwurmproben sowie in Lebern von Kleinsäufern der PFC-belasteten Standorte [$\mu\text{g/g}$ Frischgewicht].	19
Abbildung 3.11: PFC-Gehalte (ng/g Frischgewicht) in Blut- und Leberpoolproben von Rötelmäusen vom Standort Zwiefalten und Feldmäusen von den belasteten Standorten A, BAD1L13 und BAD2A.	21
Abbildung 3.12: Schwermetall-Gehalte in Nierenproben [ng/g Frischgewicht] von Rötelmäusen des Waldstandortes Zwiefalten sowie von Feldmäusen belasteter Standorte	22
Abbildung 3.13: Organochlorpestizid-Gehalte (p,p'-DDE, p,p'-DDD sowie Dieldrin) in Leberproben [ng/g Frischgewicht] von Erdmäusen des Waldstandortes Kirchheim u. T. sowie von Feldmäusen der mit PFC-belasteten Standorte A, BAD1L13 und BAD2A.	22
Abbildung 3.14: Polychlorierte Biphenyle (Summe der 7 Indikator-PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) in Leberproben von Erdmäusen des Waldstandortes Kirchheim u. T. sowie von Feldmäusen der mit PFC-belasteten Standorte A und BAD2A [ng/g Frischgewicht].	23

6.2 Tabellen

Tabelle 2.1: Untersuchte Standorte, Informationen zu den Standorten und dazugehörige Bodencharakterisierungen	11
Tabelle 2.2: Art, Altersklasse, Anzahl und für die Analyse zur Verfügung stehende Trockensubstanz in Gramm der Regenwürmer je Standort und Probenahmejahr	12
Tabelle 2.3: Art, Altersklasse (adu=adult, subadu=subadult), Anzahl und untersuchte Organe und Schadstoffgruppen je Standort. Abkürzungen PFC: Per- und polyfluorierte Verbindungen, WM: Weichmacher, Pest: Pestizide, SM: Schwermetalle.	13
Tabelle 3.1: Abnehmende Reihenfolge der jeweils drei PFC-Verbindungen, die in den Probenmatrizes je Standort der Waldflächen mit den höchsten Werten gemessen wurden. Abkürzung n. m.: not measured (wurde nicht gemessen), < BG: Wert lag unterhalb der Bestimmungsgrenze	20
Tabelle 3.2: Abnehmende Reihenfolge der jeweils drei PFC-Verbindungen, die in den Probenmatrizes je Standort der PFC-belasteten Flächen mit den höchsten Werten gemessen wurden. n. m.: not measured (wurde nicht gemessen).	20

Tabelle 5.1:	Gemessene PFC-Verbindungen in den Matrices Boden, Regenwurm und Kleinsäuger mit der jeweiligen Bestimmungsgrenze (BG) und Einheit. TS: Trockensubstanz, FG: Frischgewicht	27
Tabelle 5.2:	PFC-Gehalte im Feststoff der Waldbodenproben der Jahre 2011 und 2017 [$\mu\text{g}/\text{kg}$ TS]. Bestimmungsgrenze (BG): $1 \mu\text{g}/\text{kg}$	27
Tabelle 5.3:	PFC-Gehalte der Eluatproben der Waldstandorte der Jahre 2011 und 2017 [$\mu\text{g}/\text{L}$]. Bestimmungsgrenze (BG): $0,001 \mu\text{g}/\text{L}$	28
Tabelle 5.4:	PFC-Gehalte der Feststoffproben der belasteten Flächen des Jahres 2017 [$\mu\text{g}/\text{kg}$ TS], Bestimmungsgrenze: $1 \mu\text{g}/\text{kg}$	28
Tabelle 5.5:	PFC-Gehalte der Eluate der belasteten Flächen des Jahres 2017 [$\mu\text{g}/\text{L}$], Bestimmungsgrenze $0,001 \mu\text{g}/\text{L}$	29
Tabelle 5.6:	PFC-Gehalte in Regenwürmern (<i>Lumbricus rubellus</i>) der Waldstandorte des Jahres 2011. Bestimmungsgrenze (BG): $1 \mu\text{g}/\text{kg}$ TS	29
Tabelle 5.7:	PFC-Gehalte in Regenwürmern der Waldstandorte des Jahres 2017. Bestimmungsgrenze (BG): $1 \mu\text{g}/\text{kg}$ TS	30
Tabelle 5.8:	PFC-Gehalte in Regenwürmern der belasteten Standorte des Jahres 2017. Bestimmungsgrenze (BG): $1 \mu\text{g}/\text{kg}$ TS	31
Tabelle 5.9:	PFC-Gehalte in Kleinsäugerlebern der Waldstandorte [ng/g FG]	31
Tabelle 5.10:	PFC-Gehalte in Kleinsäugerlebern der belasteten Standorte [ng/g FG]	32
Tabelle 5.11:	PFC-Gehalte im Blut der Kleinsäuger [ng/g FG]	32
Tabelle 5.12:	Schwermetall-Gehalte in Kleinsäugernieren [$\mu\text{g}/\text{g}$ FG]	33
Tabelle 5.13:	Gehalten an Polychlorierten Biphenylen (PCB) in Kleinsäugerlebern [ng/g FG]	33
Tabelle 5.14:	Gehalten an Organochlorpestiziden in Kleinsäugerlebern [ng/g FG]	33
Tabelle 5.15:	In den Kleinsäugerlebern analysierte Weichmacher und Pestizide ohne Befunde [$\mu\text{g}/\text{g}$ FG]	35

7 Literatur und Quellen

- AHRENS L, SIEBERT U, EBINGHAUS R (2009):
Total body burdens and tissue distribution of polyfluorinated compounds in harbor seals (*Phoca vitulina*) from the german bight. *Mar Poll Bull* 58(4): 520-525
- ALLGÖWER R, HÄDRICH J, BAUM F (1996):
Untersuchung der Schadstoffbelastung von Kleinsäugetern mit chlorierten Kohlenwasserstoffen und Schwermetallen im Rahmen des "Ökologischen Wirkungskatasters Baden-Württemberg". Abschlussbericht. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.)
- ANDERSEN C (1979):
Cadmium, lead and calcium content, number and biomass, in earthworms (*Lumbricidae*) from a sewage sludge treated soil. *Pedobiology* 19: 309 - 319
- BMU BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT:
<https://www.bmu.de/themen/gesundheit-chemikalien/gesundheit-und-umwelt/lebensmittelsicherheit/verbraucherschutz/uebersicht-ueber-dioxine-und-pcbs/dioxine-und-pcb/> Zuletzt abgerufen am 18.11.2019
- BUND BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND E. V. (2015):
Praktisch, langlebig und giftig – Organische Fluorverbindungen in Alltagsprodukten, in der Umwelt und im menschlichen Körper: Bewertung und Konsequenzen für Politik und VerbraucherInnen. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/fluor_studie.pdf. Zuletzt abgerufen am 21.04.2020
- BVL BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT (2009):
Kontaminationen von Lebensmitteln mit Rückständen von Pflanzenschutzmitteln. https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/zul_dok_kontaminationen_lm.pdf?sessionid=F4B9D9640F92250BDB06502FD9EB6BAF.2_cid340?__blob=publicationFile&v=3 Zuletzt abgerufen am 14.04.2020
- CANADIAN ENVIRONMENTAL PROTECTION ACT (1999):
Federal Environmental Quality Guidelines, 2017. PFOS. http://www.ec.gc.ca/ese-ees/38E6993C-76AA-4486-BAEB-D3828B430A6E/PFOS_En.pdf Zuletzt abgerufen am 14.01.2020
- COOKE JA AND JOHNSON MS (1996):
Cadmium in small mammals. In *Environmental contaminants in wildlife, a special publication of SETAC*, Lewis Publishers
- EFSA EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY (2018):
Risk to human health related to the presence of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid in food. *EFSA Journal* 16(12): 5194
- GUTLEB AC, GUTLEB B, GUTLEB R (1992):
Blei-, Zink- und Kupfergehalte in Leber und Niere einiger Wirbeltiere aus dem Koflachtal in Kärnten. *Carinthia II*, 182: 627 - 631
- HANSSEN L, HERZKE D, NIKIFOROV V, MOE B, NYGÅRD T, VAN DIJK J, WING GABRIELSEN G, FUGLEI E, YEUNG L, VOGELSANG C, CARLSSON PM (2019):
Screening new PFAS compounds 2018. NILU (Norwegian Institute for Air Research) Report 23
- HEIKENS A, PEIJNENBURG WJGM, HENDRIKS AJ (2001):
Bioaccumulation of heavy metals in terrestrial invertebrates. *Environ Poll* 113: 385 - 393
- HOFF PT, SCHEIRS J, DE VIJVER KV, VAN DONGEN W, ESMANS EL, BLUST R, DE COEN W (2004):
Biochemical effect evaluation of perfluorooctane sulfonic acid-contaminated wood mice (*Apodemus sylvaticus*). *Environ Health Perspect* 112(6): 681 - 686
- JANČOVÁ A, MASSÁNYI P, GÁLOVÁ J (2002):
The concentration of cadmium and lead in liver and kidneys in *Apodemus flavicollis* and *Clethrionomys glareolus*. *Folia Veterinaria* 46(2): 65 - 67
- JOUNG KE, JO EH, KIM HM, CHOI K, YOON J (2010):
Toxicological effects of PFOS and PFOA on Earthworm *Eisenia fetida*. *Environ Health and Toxikol* 25(3) 181 - 186
- KANNAN K, NEWSTED J, HALBROOK RS, GIESY JP (2002):
Perfluorooctanesulfonate and related fluorinated hydro-carbons in mink and river otters from the Unites States. *Environ Sci Technol* 36: 2566 - 2571
- KELLY BC, ILKONOMOU MG, BLAIR JD, SURRIDGE B, HOOVER D, GRACE R, GOBAS FAPC (2009):
Perfluoroalkyl contaminants in an arctic marine food web: Trophic magnification and wildlife exposure. *Environ Sci Technol* 43(11): 4037 - 4043
- KENNEDY JR. GL, BUTENHOFF JL, OLSEN GW, O'CONNOR JC, SEACAT AM, PERKINS RG, BIEGEL LB, MURPHY SR, FARRAR SG (2004):
THE TOXICOLOGY OF PERFLUOROOCTANOATE. *CRITICAL REVIEWS IN TOXICOLOGY* 34, 351 - 384
- LANGE FT, SCHEURER M, BIERRETH C, BORHO W, SEEGER AK, DREHER P, NÖLTNER T (2020):
Air-drying of soil samples – A crucial step in the determination of leachable concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances. *Chemosphere*, Article in press
- LAUFER S, ZWICKEL T, RIEMENSCHNEIDER C, LIPPOLD R (2019):
Befunde und Beurteilung perfluorierter Alkylsubstanzen (PFAS) in Leber und Fleisch von Wildschweinen. CVUA Freiburg. https://www.ua-bw.de/pub/beitrag.asp?subid=3&Thema_ID=5&ID=3061&lang=DE&Pdf=No Zuletzt abgerufen am 19.11.2019
- LGL LANDESAMT FÜR GESUNDHEIT UND LEBENSMITTELSICHERHEIT BAYERN (2011):
Pflanzenschutzmittelrückstände in pflanzlichen Lebensmitteln-Untersuchungsergebnisse 2011. https://www.lgl.bayern.de/lebensmittel/chemie/pflanzenschutzmittel/pestizide_pflanzlich_lm/ue_2011_pflanzliche_lebensmittel.htm Zuletzt abgerufen am 19.11.2019
- LLUR LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND LÄNDLICHE RÄUME SCHLESWIG-HOLSTEIN (2011):
Hintergrundwerte stofflich gering beeinflusster Böden Schleswig-Holsteins. https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/B/boden/Downloads/Hintergrundwerte.pdf?__blob=publicationFile&v=2 Zuletzt abgerufen am 19.04.2020
- LUBW (2013):
Signale aus der Natur. Von der Biologischen zur Medienübergreifenden Umweltbeobachtung in Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg
- LUBW (2015):
Untersuchung von Boden, Grundwasser und Regenwürmern auf organische und anorganische Schadstoffe in den Landkreisen Karlsruhe und Rastatt sowie im Stadtkreis Baden-Baden. Abschlussbericht. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- LUBW (2016):
PFC – Hintergrundgehalte in Böden. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

- MA WC (1989):
Effect of soil pollution with metallic lead pellets on lead bioaccumulation and organ/body weight alterations in small mammals. Arch Environ Contam Toxicol 20: 266 – 270
- REGIERUNGSPRÄSIDIUM (RP) KARLSRUHE (2019):
https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpk/Abt5/Ref541/PFC/Seiten/Einfuehrung_PFC.aspx. Zuletzt abgerufen am 20.02.2020
- RICHTLINIE 2008/105/EG ÜBER UMWELTQUALITÄTSNORMEN IM BEREICH DER WASSERPOLITIK.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0105&from=DE> Zuletzt abgerufen am 18.11.2019
- RIEBE RA, FALK S, GEORGH S, BRUNN H, FAILING K, STAHL T (2015):
Perfluoroalkyl Acid Concentrations in Livers of Fox (*Vulpes vulpes*) and Chamois (*Rupicapra rupicapra*) from Germany and Austria. Arch Environ Contam Toxicol
- SCHAAL C (1994):
Bleibelastung verschiedener Organe bei Rötel- und Feldmäusen von straßennahen und -fernen Standorten. Diplomarbeit der Fakultät Biologie an der Universität Tübingen
- STUBBERUD H (2006):
Ecotoxicological effects of PFOS, PFOA and 6: 2 FTS on earthworms (*Eisenia fetida*). Norwegian Pollution Control Authority (SFT). Oslo, Norwegen. TA-2212/2006
- TISCHER S (2008):
Lumbricidae communities in soil monitoring sites differently managed and polluted with heavy metals Pol J Ecol 56(4): 635 – 646
- TISCHER S (2009):
Earthworms (Lumbricidae) as bioindicators: the relationship between in-soil and in-tissue heavy metal content. Pol J Ecol 57(3): 513 – 523
- UPB UMWELTPROBENBANK DES BUNDES:
Chemische Belastungen – Rechercheergebnis: https://www.umweltprobenbank.de/de/documents/investigations/results/analytes?analytes=10011+10018&sampling_areas=10055+10093&sampling_years=2010..2017&specimen_types=10003. Zuletzt abgerufen am 18.11.2019
- VEESTERGARD P, SHAIKH ZA (1994):
The nephrotoxicity of intravenously administered cadmium-metallothionein: Effect of dose, mode of administration and preexisting renal cadmium burden. Toxicol Appl Pharmacol 126: 240 – 247

