





# Bestimmung von per- und polyfluorierten Verbindungen (PFAS) in Feststoffen

 Vergleich Schüttel- und Säulenelutionsverfahren



# Bestimmung von per- und polyfluorierten Verbindungen (PFAS) in Feststoffen

 Vergleich Schüttel- und Säulenelutionsverfahren

<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, <a href="http://www.lubw.de">www.lubw.de</a>
<b>BEARBEITUNG</b>	TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser Astrid Thoma, Andreas Behr, Andrea Hauck, Heico Schell, Lara Stelmaszyk, Dr. Frank Sacher
<b>REDAKTION</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Referat 22 – Boden, Altlasten
<b>BEZUG</b>	kostenloser Download unter: <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>STAND</b>	September 2019
<b>SATZ UND BARRIEREFREIHEIT</b>	Satzweiss.com Print Web Software GmbH Mainzer Straße 116, 66121 Saarbrücken
<b>ABBILDUNGSNACHWEIS</b>	Alle Bilder: TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

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

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>DURCHFÜHRUNG</b>	<b>8</b>
2.1	Vorbehandlung der Bodenproben	8
2.2	Methodenbeschreibung	10
2.2.1	Schüttelverfahren	10
2.2.2	Perkolationsverfahren	12
2.3	PFAS-Analytik in Eluatproben	15
2.4	Berechnung der Quotientensumme	17
2.5	Berechnung der Frachten	18
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>19</b>
3.1	Statistische Auswertung der Ergebnisse	19
3.2	Abtrennung der Partikel in den Eluaten	21
3.3	DOC-Gehalte der Eluate	25
3.4	Vergleich Schüttelverfahren und Säulenelutionsverfahren	26
<b>4</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>ANHANG</b>	<b>38</b>



# 1 Einleitung

Boden und Grundwasser im Raum Rastatt/Baden-Baden sind großflächig mit per- und polyfluorierten Chemikalien (PFAS) belastet. Zur Charakterisierung der Belastung steht eine Reihe von genormten Verfahren zur Verfügung, die beispielsweise die Bestimmung ausgewählter Perfluoralkylcarbonsäuren und Perfluoralkylsulfonsäuren aus wässrigen oder festen Matrices beschreiben. Zur Ermittlung des aus Feststoffen mit Wasser eluierbaren Anteils wird in vielen Regelwerken auf das Schüttelverfahren nach DIN 19529 und das Säulenelutionsverfahren (Perkolationsverfahren) nach DIN 19528 verwiesen. Auch in dem Schreiben des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg vom 21. August 2018 zur Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte für per- und polyfluorierte Chemikalien zur Beurteilung nachteiliger Veränderungen der Beschaffenheit des Grund- und Sickerwassers aus schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten werden für die Untersuchung von Eluaten beide Verfahren gleichwertig nebeneinander genannt.

Dabei wird vorausgesetzt, dass beide Verfahren vergleichbare Ergebnisse liefern. Während das Schüttelverfahren ein statisches Verfahren ist, bei dem die Feststoffprobe mit einem definierten Wasservolumen für 24 Stunden geschüttelt wird, handelt es sich bei dem Säulenelutionsverfahren um ein dynamisches Verfahren, bei dem die Feststoffprobe kontinuierlich von dem wässrigen Medium durchströmt wird. Aus einigen Untersuchungen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ergaben sich allerdings Hinweise, dass die Vergleichbarkeit beider Verfahren für die Stoffklasse der PFAS nicht uneingeschränkt gegeben ist. Vor diesem Hintergrund wurde das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW) von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) beauftragt, systematische Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von Schüttel- und Säulenverfahren für die Stoffklasse der PFAS durchzuführen. Die Untersuchungen sollten mit verschiedenen Bodenproben, aus dem Gebiet Rastatt/Baden-Baden, die sich sowohl in ihrer Beschaffenheit als auch in ihren PFAS-Gehalten deutlich unterschieden, erfolgen. Neben Bodenproben aus Gebieten mit vergleichsweise hoher PFAS-Belastung (sog. „Verdachtsflächen“) wurden auch Proben aus Gebieten, für die keine PFAS-Kontamination bekannt ist (sog. „Hintergrundstandorte“), untersucht. Ergänzend zu der Durchführung der Elutionsversuche entsprechend der in den Normen vorgeschriebenen Vorgehensweisen sollten Versuche zum Einfluss verschiedener Randbedingungen wie der Trübung der Eluate erfolgen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und die Konsequenzen für die weitere Vorgehensweise werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert.

## 2 Durchführung

### 2.1 Vorbehandlung der Bodenproben

Für die Untersuchungen wurden dem TZW durch die LUBW überwiegend feldfrische Bodenproben übergeben. Tabelle 2.1 fasst einige charakteristische Parameter für die Bodenproben aus neun Verdachtsflächen zusammen. Hierbei handelte es sich um Proben von Flächen, für die bekanntermaßen eine erhöhte PFAS-Belastung vorliegt. An allen neun Standorten wurden zwei verschiedene Tie-

fenhorizonte untersucht, sodass insgesamt 18 Bodenproben aus Verdachtsflächen für die Versuche zur Verfügung standen. Zwei weitere Proben wurden getrocknet angeliefert und nur für die Untersuchungen mittels Schüttelverfahren eingesetzt. Bei dem methodischen Vergleich von Schüttel- und Säulenelution wurden diese Proben nicht berücksichtigt.

Tabelle 2.1: Charakterisierung der Untersuchungsproben aus Verdachtsflächen

Probenkennung	Wassergehalt (%)	TC (%)	TOC (%)	TIC (%)
Bad 2A1, 0,6-2,00	14,3	0,6	0,4	0,2
Bad 2A1, 2,0-3,0	14,0	0,8	0,7	0,1
Sportplatz Oos, 0,6-2,0	15,6	0,8	0,2	0,6
Sportplatz Oos, 2,0-3,0	15,3	1,7	< 0,1	1,8
Sto 7, 30	15,3	2,3	2,1	0,2
Sto 7, 60	10,9	0,6	0,5	0,1
DuHü4, 30	12,3	1,6	1,5	0,1
DuHü4, 60	8,0	0,6	0,5	0,1
Vim5, 30	22,2	2,7	2,5	0,2
Vim5, 60	17,6	1,3	1,2	0,1
Rhm10, 30	12,7	1,2	1,1	0,1
Rhm10, 60	10,6	0,5	0,3	0,2
Steinbach, 0–30 cm	23,6	2,0	1,9	< 0,1
Steinbach, 30–60 cm	17,3	0,6	0,5	< 0,1
Hügelsheim, 0–30 cm	11,7	1,3	1,2	< 0,1
Hügelsheim, 30–60 cm	8,3	0,4	0,3	< 0,1
Forchheim, 0–30 cm	12,5	1,3	1,2	< 0,1
Forchheim, 30–60 cm	8,7	0,4	0,3	< 0,1
Forchheim (0–20 cm)*	-	1,0	0,9	< 0,1
Hügelsheim (0–20 cm)*	-	1,7	1,6	< 0,1

Quelle: TZW

\* Material wurde getrocknet angeliefert und nur für das Schüttelverfahren eingesetzt; die Ergebnisse für diese Proben werden beim Vergleich der beiden Elutionsverfahren nicht berücksichtigt.

Tabelle 2.2 enthält Angaben zur Charakterisierung der Proben aus Hintergrundstandorten, d.h. von Flächen in Baden-Württemberg, für die bislang keine auffälligen PFAS-Befunde bekannt waren. Hier wurden 17 Bodendauerbeobachtungsflächen untersucht, von denen jeweils Proben aus dem Oberboden entnommen wurden.



Tabelle 2.2: Charakterisierung der Untersuchungsproben von *Hintergrundstandorten*

Probenkennung	Wassergehalt (%)	TC (%)	TOC (%)	TIC (%)
3, Rohnhausen, 0–25 cm	14,4	1,3	1,3	< 0,1
5, Rahlenhof, 0–30 cm	16,9	2,8	1,8	0,9
25, Steighof, 0–18 cm	34,2	6,1	6,1	< 0,1
48, Tachenhausen, 0–24 cm	17,0	1,2	1,1	< 0,1
51, Ellwangen 1, 0–30 cm	13,2	1,4	1,3	< 0,1
81, Venusberg, 0–19 cm	26,9	3,6	3,5	< 0,1
89, Stifterhof, 0–21 cm	18,0	1,4	1,4	< 0,1
93, Neuhof, 0–28 cm	18,0	1,1	1,1	< 0,1
100, Neuhaus, 0–17 cm	21,1	6,7	2,7	4,0
105, Rineck, 0–28 cm	18,6	1,4	1,3	< 0,1
133, Erlenboden, 0–16 cm	20,0	1,2	1,2	< 0,1
135, Stöckenhof, 0–30 cm	13,6	1,4	1,3	< 0,1
141, Insultheimerhof, 0–40 cm	14,4	1,9	1,2	0,7
148, Mannheim Sandtorf, 0–25 cm	3,2	0,9	0,9	< 0,1
200, Schloss Neuhaus, 0–27 cm	17,8	1,8	1,1	0,6
50000, Trochtelfingen, 0–24 cm	28,0	3,0	2,9	< 0,1
Trochtelfingen 0–24 cm	26,2	3,4	3,2	0,2

Quelle: TZW

Die Vorbehandlung zur Herstellung einer repräsentativen Untersuchungsprobe erfolgte nach den Vorgaben, die in DIN 19528 und DIN 19529 beschrieben sind. Wurden die Böden in mehreren Probengefäßen angeliefert, wurde das Material zunächst zu einer Gesamtprobe vereinigt. Diese Gesamtprobe wurde dann durch Siebung über ein 31,5 mm Sieb homogenisiert (siehe Abbildung 2.1). Anschließend wurde eine Teilprobe von ca. 1 kg für den Einsatz im Schüttelverfahren entnommen und über ein 5 mm Sieb gesiebt. Das Probenmaterial, das für das Säulenverfahren eingesetzt wurde, wurde entsprechend den Vorgaben der DIN 19528 nicht weiter gesiebt. Für jede Probe wurde an einer Teilprobe der Wassergehalt bzw. die Trockenmasse durch Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz bestimmt. In Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 sind die auf diese Weise ermittelten Wassergehalte der Böden zusammengestellt. Auf Grundlage der Wassergehalte wurden die Einwaagen für die Elutionsversuche berechnet.



Abbildung 2.1: Probenvorbereitung (Quelle: TZW)

## 2.2 Methodenbeschreibung

### 2.2.1 Schüttelverfahren

Die Herstellung der wässrigen Schüttelleuate erfolgte in Anlehnung an die in DIN 19529 beschriebene Vorgehensweise. Die Norm beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung der Eluierbarkeit von anorganischen und organischen Stoffen aus Feststoffen bei einem Wasser/Feststoff-Verhältnis (W/F-Verhältnis) von 2L/kg Trockenmasse. Unter Berücksichtigung der Wassergehalte wurde von den feuchten Proben jeweils eine Menge, die einer Trockenmasse von 250 g entspricht, in 1 L Kunststoffgefäßen eingewogen und mit demineralisiertem Wasser versetzt, so dass sich für die Elution ein W/F-Verhältnis von 2L/kg ergab. Bei der Berechnung des erforderlichen Wasservolumens wurde die bereits in der feuchten Bodenprobe enthaltene Wassermenge berücksichtigt. Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4 fassen jeweils für die Proben aus den Verdachtsflächen und den Hintergrundstandorten die eingewogenen Mengen und die erforderlichen Wasservolumina zusammen.

Die Kunststoffgefäße mit den Bodenproben und dem Wasser zur Elution wurden in einem Überkopfschüttler (RA 20, Firma Gerhardt und Hei-MIX Reax 20, Firma Heidolph) für 24 Stunden bei 5 bis 10 Umdrehungen pro Minute geschüttelt. Nach Absetzen der suspendierten Feststoffe wurde der Überstand in einen Edelstahl-Zentrifugenbehälter dekantiert und für 30 Minuten bei 6000 g in einer Laborzentrifuge (8 KS, Firma Sigma) zentrifugiert. Nach der Zentrifugation wurde das Zentrifugat in 500 mL-Braunglasflaschen abgefüllt. Für die Analyse auf PFAS wurde ein Aliquot des unfiltrierten Eluats verwendet. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Resultaten, die für die Eluate aus dem Perkolationsverfahren erhalten wurden, wurde auf den in DIN 19529 beschriebenen Filtrations-schritt bei den meisten Versuchen verzichtet, da DIN 19528 (Perkolationsverfahren) keine Filtration vorsieht. Auch die Grundlage des in DIN 38407-42 festgelegten Verfahrens zur Bestimmung von PFAS aus Wasserproben ist die Analyse einer unfiltrierten Wasserprobe. Der Einfluss der Filtration auf die Ergebnisse beider Elutionsverfahren wurde in separaten Versuchsreihen untersucht (siehe Kapitel 3.2).

Tabelle 2.3: Einwaagen der Bodenproben aus Verdachtsflächen für die Herstellung der Schüttelleuate und zugegebenes Wasservolumen

Probenkennung	LIMS-Nummer	Einwaage Bodenprobe, feucht (g)	Zugegebenes Wasservolumen (mL)
Bad 2A1, 0,6-2,0	2017020271	292	458
Bad 2A1, 2,0-3,0	2017020272	291	459
Sportplatz Oos, 0,6-2,0	2017020273	296	454
Sportplatz Oos, 2,0-3,0	2017020274	295	455
Sto 7, 30	2017020275	295	455
Sto 7, 60	2017020276	281	469
DuHü4, 30	2017020277	285	465
DuHü4, 60	2017020278	272	478
Vim5, 30	2017020279	321	429
Vim5, 60	2017020280	304	446
Rhm10, 30	2017020281	287	463
Rhm10, 60	2017020282	280	470
Steinbach, 0–30 cm	2017020283	327	423
Steinbach, 30–60 cm	2017020284	302	448
Hügelsheim, 0–30 cm	2017020285	283	467
Hügelsheim, 30–60 cm	2017020286	273	477
Forchheim, 0–30 cm	2017020287	286	464
Forchheim, 30–60 cm	2017020288	274	476

Quelle: TZW

Tabelle 2.4: Einwaagen der Bodenproben aus Hintergrundstandorten für die Herstellung der Schüttelauate und zugegebenes Wasservolumen

Probenkennung	LIMS-Nummer	Einwaage Bodenprobe, feucht (g)	Zugegebenes Wasservolumen (mL)
3, Rohnhausen, 0–25 cm	2018011749	292	458
5, Rahlenhof, 0–30 cm	2018011750	301	449
25, Steighof, 0–18 cm	2018011751	380	370
48, Tachenhausen, 0–24 cm	2018011752	301	449
51, Ellwangen 1, 0–30 cm	2018011753	288	462
81, Venusberg, 0–19 cm	2018011754	342	408
89, Stifterhof, 0–21 cm	2018011755	305	445
93, Neuhof, 0–28 cm	2018011756	305	445
100, Neuhaus, 0–17 cm	2018011757	317	433
105, Rineck, 0–28 cm	2018011758	307	443
133, Erlenboden, 0–16 cm	2018011759	313	438
135, Stöckenhof, 0–30 cm	2018011760	289	461
141, Insultheimerhof, 0–40 cm	2018011761	292	458
148, Mannheim Sandtorf, 0–25 cm	2018011762	258	492
200, Schloss Neuhaus, 0–27 cm	2018011763	304	446
50000, Trochtelfingen, 0–24 cm	2018011763	347	403
Trochtelfingen 0–24 cm	2017020270	339	411

Quelle: TZW

## 2.2.2 Perkolationsverfahren

### 2.2.2.1 Apparatives

Das Perkolationsverfahren zur Elution der PFAS aus Boden wurde nach den Vorgaben der DIN 19528 durchgeführt. Hierbei wurden Glassäulen mit einem Innendurchmesser (ID) von 6 cm und einer Länge von 32 cm verwendet. Als Verbindung zwischen Pumpschlauch und Säule sowie im Säulenablauf wurden Edelstahlkapillaren mit einem Innendurchmesser von 1 mm angebracht. Säulenzu- und -ablauf und die Kapillaren wurden über Silikonschläuche mit einem Innendurchmesser von 2 mm verbunden. Für Ab- und Zulauf der Säulen wurden ebenfalls Glasstücke verwendet, die direkt am Ein- beziehungsweise Ausgang mit

Quarzwolle gefüllt wurden. Die Schichtdicke der Quarzwolle variierte hierbei zwischen 0,5 und 1,5 cm, um ein Blockieren der Kapillaren durch Feststoffanteile im Eluat zu vermeiden. Ebenso wurde in Zu- und Ablauf der Säulen eine circa 2 mm dicke Schicht aus Quarzsand (Korngröße 0,6–1,2 mm) eingebaut. Zum Befüllen der Säulen mit Quarzsand und den Bodenproben wurde die Säule um 180° gedreht (Abbildung 2.2). Nach vollständiger Packung der Säulen wurden sie wieder um 180° gedreht, sodass der Ablauf nach oben gerichtet war, d.h. die Säulen wurden bei den Perkolationsversuchen im Aufstromverfahren betrieben.

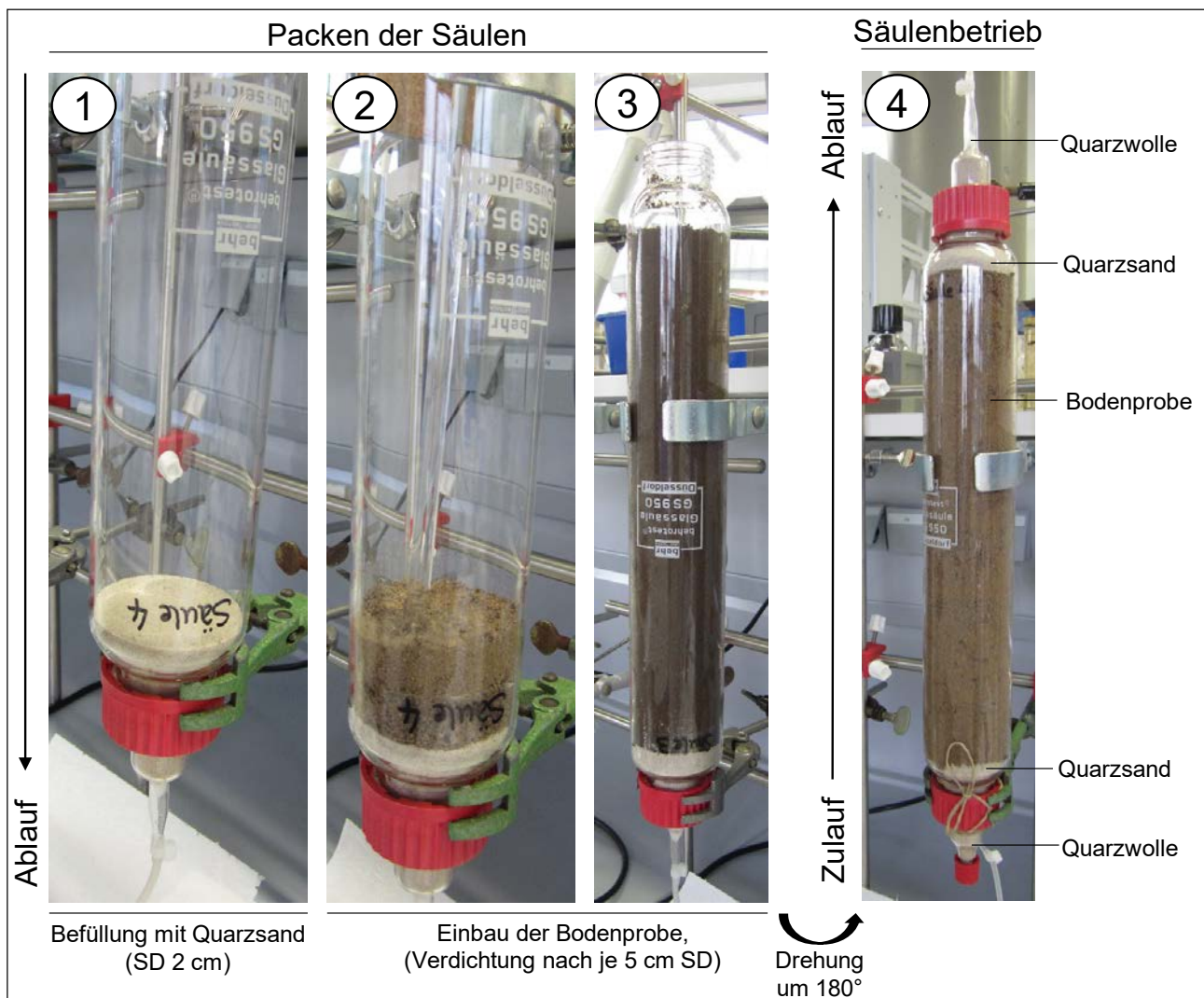


Abbildung 2.2: Säulenpackung nach DIN 19528 für die Elution von PFAS aus Bodenproben mittels Perkolationsverfahren (SD: Schichtdicke) (Quelle: TZW)

### 2.2.2.2 Durchführung der Perkulationsversuche

Die Elution der PFAS aus den Bodenproben erfolgte mit demineralisiertem Wasser. Der Durchfluss durch die Säulen wurde nach Gleichung 1 berechnet, indem die in Absatz 9.3.2 der DIN 19528 angegebenen Zeiten  $t$  sowie die Säulenparameter eingesetzt wurden.

$$\text{Gleichung 1: } q = \frac{l \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \Phi}{t \cdot 60}$$

Hierbei gilt:

$q$  = Volumenstrom in mL/min

$l$  = Länge der Säule in cm (hier 32 cm)

$r$  = Radius der Säule in cm (hier 3 cm)

$\Phi$  = Porosität des zu untersuchenden Feststoffs

$t$  = Sättigungsdauer in h bzw. Kontaktzeit für die Elution in h (hier 5 h)

Die Porendichte der angelieferten Bodenproben war unbekannt. Daher wurde entsprechend den Vorgaben der

DIN 19528, Absatz 9.3.2 eine Korndichte für Quarzsand von  $2,65 \text{ g/cm}^3$  angenommen. Bei einer Füllmasse von  $1469,5 \text{ g}$  wurde mit diesem Wert eine Porosität von  $0,35$  ermittelt.

Die Sättigung des Bodens mit Wasser erfolgte über einen Zeitraum von 2 h mit einem Volumenstrom von  $2,6 \text{ mL/min}$ . Mit einer Kontaktdauer von 5 h und einem Wasser/Feststoff (W/F)-Verhältnis von  $2 \pm 0,4 \text{ L/kg}$  bei einer Säulenfüllung von  $1500 \pm 50 \text{ g}$  erfolgte die Elution mit einem Volumenstrom von  $1,06 \text{ mL/min}$  über einen Zeitraum von rund 48 h. Die exakten Einwaagen an Bodenmaterial sind in Tabelle 2.5 und Tabelle 2.6 dargestellt. Bei sehr bindigen Böden wurden die Proben vor dem Einbau gemäß DIN 19528, Absatz 7 bei  $40^\circ \text{C}$  getrocknet ( $>48 \text{ h}$ ) und auf eine Korngröße  $<2 \text{ mm}$  zerkleinert. Anschließend wurden sie mit  $80\%$  Quarzsand (Korngröße  $0,6 - 1,2 \text{ mm}$ ) vermischt und das Gemisch in die Säulen eingebaut. Die Einwaagen in Tabelle 2.5 und Tabelle 2.6 beziehen sich auf die eingewogene Masse an Boden.

Tabelle 2.5: Informationen zur Probenvorbereitung für Bodenproben aus Verdachtsflächen

Probekennung	Probenvorbereitung	Einwaage $m_{TS}$ (g)	Wasservolumen (mL)
Bad 2A1, 0,6-2,0	trocknen & zerkleinern	296	3049
Bad 2A1, 2,0-3,0	trocknen & zerkleinern	295	3010
Sportplatz Oos, 0,6-2,0	-	1366	2910
Sportplatz Oos, 2,0-3,0	trocknen & zerkleinern	300	2952
Sto 7, 30	-	1309	2975
Sto 7, 60	-	1411	2927
DuHü4, 30	-	1308	3049
DuHü4, 60	-	1365	3024
Vim5, 30	trocknen & zerkleinern	290	2972
Vim5, 60	trocknen & zerkleinern	315	3014
Rhm10, 30	-	1283	2708
Rhm10, 60	-	1366	2964
Steinbach, 0–30 cm	trocknen & zerkleinern	289	3215
Steinbach, 30–60 cm	trocknen & zerkleinern	288	3168
Hügelsheim, 0–30 cm	-	1125	2716
Hügelsheim, 30–60 cm	-	1303	2950
Forchheim, 0–30 cm	-	1405	3010
Forchheim, 30–60 cm	-	1591	3269

Quelle: TZW

Tabelle 2.6: Informationen zur Probenvorbehandlung der Bodenproben, Einwaagen für Bodenproben aus Hintergrundstandorten

Probenkennung	Probenvorbehandlung	Einwaage $m_{TS}$ (g)	Wasservolumen (mL)
3, Rohnhausen, 0–25 cm	-	1202	2452
5, Rahlenhof, 0–30 cm	-	1106	2622
25, Steighof, 0–18 cm	trocknen & zerkleinern	268	2598
48, Tachenhausen, 0–24 cm	trocknen & zerkleinern	270	2446
51, Ellwangen 1, 0–30 cm	-	1180	2737
81, Venusberg, 0–19 cm	trocknen & zerkleinern	270	2667
89, Stifterhof, 0–21 cm	-	1128	2775
93, Neuhof, 0–28 cm	-	1155	2662
100, Neuhaus, 0–17 cm	-	914	2655
105, Rineck, 0–28 cm	trocknen & zerkleinern	269	2567
133, Erlenboden, 0–16 cm	trocknen & zerkleinern	265	2898
135, Stöckenhof, 0–30 cm	trocknen & zerkleinern	283	2795
141, Insultheimerhof, 0–40 cm	-	1154	2851
148, Mannheim Sandtorf, 0–25 cm	-	1231	2719
200, Schloss Neuhaus, 0–27 cm	-	1060	2842
50000, Trochtelfingen, 0–24 cm	-	917	2905
Trochtelfingen 0–24 cm	-	839	2851

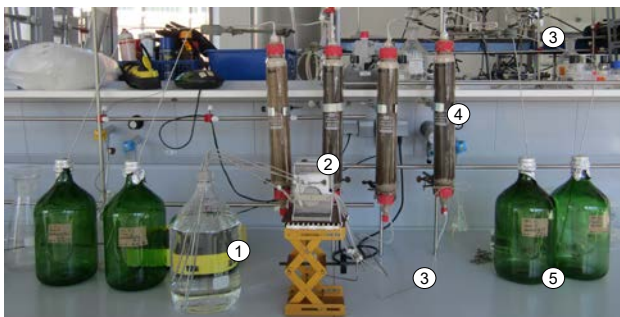
Quelle: TZW

Das gesamte Eluat bis zu einem W/F-Verhältnis von 2L/kg wurde in einer Sammelflasche, die vor dem Einsatz bei 450 °C pyrolysiert worden war, aufgefangen. Tabelle 2.5 und Tabelle 2.6 enthalten auch die Wasservolumina, die bis zu diesem Zeitpunkt durch das Bodenmaterial geflossen waren. Für die Analytik auf PFAS wurde i. d. R. ein Aliquot des Eluats bei 6000 g für 30 min zentrifugiert und nach DIN 38407-42 analysiert.

### 2.2.2.3 Bestimmung von Blindwerten

Der gesamte Labor-Aufbau für die Säulenelution von PFAS aus Bodenproben ist in Abbildung 2.3 zu sehen. Es wurden immer vier Säulen parallel betrieben. Vor der Untersuchung der Bodenproben wurden alle vier Ver-

suchssäulen auf Blindwerte geprüft. Hierfür wurden die Säulen mit der entsprechenden Menge Quarzsand befüllt. Unter den beschriebenen Standardbedingungen wurde jeweils destilliertes Wasser bis zu einem W/F-Verhältnis von 2L/kg durch die Säulen gepumpt. Die in den Blindwertproben gemessenen Konzentrationen lagen für alle PFAS in allen Säulen unter der analytischen Bestimmungsgrenze von 0,001 µg/L. Nach diesen Ergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass alle eingesetzten Materialien blindwertfrei waren.



① Vorrat dH<sub>2</sub>O ② Mehrkanal-Peristaltikpumpe ③ Edelstahl-Kapillaren  
④ Glassäulen mit Bodenproben ⑤ Behältnisse für Eluatfraktionen

Abbildung 2.3: Versuchsaufbau für die PFAS-Elution nach dem Perkulationsverfahren (Quelle: TZW)



### 2.3 PFAS-Analytik in Eluatproben

Alle Eluate wurden auf insgesamt 20 per- und polyfluorierte Verbindungen analysiert (Tabelle 2.7). Die Bestimmung der PFAS erfolgte nach den Vorgaben der Norm DIN 38407-42, welche die Bestimmung von 10 PFAS aus Wasserproben beschreibt. Wie in der Norm angegeben, werden bei Anwendung des Analyseverfahrens sowohl die unverzweigten als auch die verzweigten Verbindungen erfasst und ausgewertet.

Tabelle 2.7: Analytierte PFAS

Perfluorbutanoat (PFBA)
Perfluorpentanoat (PFPA)
Perfluorhexanoat (PFHxA)
Perfluorheptanoat (PFHpA)
Perfluoroktanoat (PFOA)
Perfluorononanoat (PFNA)
Perfluordekanoat (PFDA)
Perfluorundekanoat (PFUnA)
Perfluordodekanoat (PFDoA)
Perfluorbutansulfonat (PFBS)
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)
Perfluoroktansulfonat (PFOS)
Perfluordekansulfonat (PFDS)
Perfluoroktansulfonamid (PFOSA)
7H-Dodekafluorheptanoat (HPFHpA)
2H,2H-Perfluordekanoat (H2PFDA)
2H,2H,3H,3H-Perfluorundekanoat (H4PFUnA)
1H,1H,2H,2H-Perfluoroktansulfonat (H4PFOS)

Quelle: TZW

50 mL des Eluats wurden auf einen pH-Wert von 5 eingestellt, mit einer methanolischen Lösung von verschiedenen isotopenmarkierten internen Standards versetzt und an einem schwach basischen Anionenaustauscher (Strata-X-AW, 200 mg, Firma Phenomenex, Aschaffenburg) angereichert. Falls die Konzentrationen einzelner Verbindungen so hoch waren, dass der Kalibrierbereich überschritten wurde, wurde die Analyse mit einer verdünnten Probe wiederholt. Nach der Beladung wurde die Festphase im Stickstoffstrom für 30 Minuten getrocknet und anschließend mit 2x2 mL Methanol und 3x2 mL 0,1%iger ammoniakalischer Methanollösung eluiert. Das Eluat wurde im Stickstoffstrom zur Trockene eingengt und der Trockenrückstand mit 75 µL Methanol und 75 µL Wasser aufgenommen. Anschließend erfolgte die Analyse der Zielverbindungen mittels einer Kopplung aus Hochleistungsflüssigchromatographie und Elektrospray-Tandem-Massenspektrometrie (HPLC-ESI-MS/MS). Hierfür wurden ein HPLC-System 1200 der Firma Agilent Technologies (Waldbronn) und ein API 4000 Tandem-Massenspektrometer der Firma AB Sciex (Darmstadt) eingesetzt.

Details zu den Anreicherungsbedingungen und den HPLC-MS-MS-Parametern sind in Tabelle 2.8 und Tabelle 2.9 zusammengefasst.

Tabelle 2.8: Anreicherungsbedingungen für die Bestimmung von PFAS

Wasservolumen	50 mL wässriges Eluat
pH-Wert	5
Interne Standards	Mischung verschiedener <sup>13</sup> C-markierter perfluorierter Verbindungen
Festphasenmaterial	200 mg Strata X-AW (Phenomenex)
Elutionsmittel	Methanol, Methanol + 0,1 % Ammoniak
Elutionsvolumen	2 x 2 mL, 3 x 2 mL
Endvolumen	0,15 mL

Quelle: TZW

Tabelle 2.9: HPLC/MS-MS-Parameter für die Bestimmung von PFAS

HPLC-System	HPLC 1200 (Agilent Technologies)		
MS-MS-System	API 4000 (AB Sciex)		
Interface	Elektrospray (ESI)		
Injektionsvolumen	5 µL		
Trennsäule	Gemini C18, 250 mm x 2 mm, 5 µm (Phenomenex)		
Eluenten	A: HPLC-Wasser + 10 mM Ammoniumacetat B: Methanol + 10 mM Ammoniumacetat		
Eluentenprogramm	0 min:	55 % A	45 % B
	24 min:	3 % A	97 % B
	31 min:	3 % A	97 % B
	32 min:	55 % A	45 % B
Fluss	0,2 mL/min		
Ionisierungsmodus	negativ		
Ionisierungsspannung	- 4500 V		

Quelle: TZW

Detaillierte Informationen zu den Verfahrenskennwerten der PFAS-Bestimmung lassen sich aus den Validierungs- und Qualitätssicherungsdaten ableiten. Tabelle 2.10 fasst die Ergebnisse für die Validierungsparameter Nachweisgrenze, Bestimmungsgrenze und relative Verfahrensstandardabweichung zusammen. Die Daten wurden am TZW aus einer 10-Punkt-Kalibrierung in Trinkwasser entsprechend den Vorgaben der DIN 32645 ermittelt. Die angegebenen Nachweis- und Bestimmungsgrenzen gelten für unverdünnte Proben. Müssen Proben verdünnt werden (was bei vielen Eluaten der Fall war), ergeben sich höhere Werte. Die relative Verfahrensstandardabweichung charakterisiert die Reproduzierbarkeit eines Analyseverfahrens. Die Tabelle enthält auch Angaben zur Wiederholbarkeit des Analyseverfahrens in Trink- und Oberflächenwasser. Dieser Parameter wurde aus den Ergebnissen von jeweils fünf unabhängigen Analysen einer mit 0,010 µg/L dotierten Wasserprobe errechnet. Ähnlich wie die Verfahrensstandardabweichung ist die Wiederholbarkeit ein Maß für die Reproduzierbarkeit eines Analyseverfahrens.

Tabelle 2.10: Kenndaten der Verfahrensvalidierung für die Bestimmung von PFAS: Nachweisgrenze (NG), Bestimmungsgrenze (BG), relative Verfahrensstandardabweichung ( $V_{x0}$ ) und Wiederholbarkeit in Trink- und Oberflächenwasser ( $W_{TW}$  und  $W_{OW}$ )

	NG (ng/L)	BG (ng/L)	$V_{x0}$ (%)	$W_{TW}$ (%)	$W_{OW}$ (%)
PFBA	0,29	1,0	4,7	1,3	2,1
PFPA	0,19	0,65	3,0	1,5	1,6
PFHxA	0,21	0,72	3,3	2,8	2,4
PFHpA	0,15	0,55	2,5	2,0	2,3
PFOA	0,16	0,56	2,5	2,0	1,8
PFNA	0,28	0,97	4,5	3,2	2,0
PFDA	0,22	0,77	3,5	3,6	3,6
PFUnA	0,56	1,9	9,0	5,2	3,7
PFDoA	0,65	2,1	10	4,9	5,9
PFBS	0,16	0,56	2,6	1,3	2,3
PFPeS	0,28	0,98	4,6	2,4	1,3
PFHxS	0,27	0,95	4,4	1,1	2,9
PFHpS	0,29	0,99	4,8	3,9	5,2
PFOS	0,19	0,66	3,0	1,5	3,3
PFDS	0,63	2,0	11	2,9	9,8
PFOSA	1,1	3,3	11	6,6	4,3
HPFHpA	0,49	1,5	4,5	7,1	3,6
H2PFDA	0,98	3,0	10	17	16
H4PFUnA	2,6	7,9	27	9,0	9,9
H4PFOS	0,24	0,83	3,7	3,6	2,3

Quelle: TZW



Informationen zur Messunsicherheit des Analysenverfahrens erhält man auch aus den Kontrollkarten. Im Rahmen der regelmäßigen Qualitätssicherungsmaßnahmen werden Kontrollkarten geführt. Messtäglich wird hierfür eine Kontrollprobe bekannter Konzentration analysiert und ausgewertet. Die Ergebnisse für diese Probe werden dokumentiert und ausgewertet. Die statistische Auswertung der Einzelergebnisse liefert die Standardabweichung, aus der sich die erweiterte Messunsicherheit (doppelte Standardabweichung plus Abweichung vom Sollwert plus 1,5%) berechnen lässt. Die erweiterte Messunsicherheit ist die Größe, die mögliche Messwertschwankungen am besten beschreibt und damit bei der Beurteilung von Messergebnissen berücksichtigt werden sollte. Tabelle 2.11 fasst Standardabweichung und erweiterte Messunsicherheit für die vier PFAS, für die Kontrollkarten geführt werden, zusammen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Kenndaten der weiteren PFAS in der gleichen Größenordnung liegen.

*Tabelle 2.11: Standardabweichung und erweiterte Messunsicherheit für ausgewählte PFAS*

	Standardabweichung (%)	Erweiterte Messunsicherheit (%)
PFBS	6,5	18
PFOA	16	44
PFOS	19	48
H4PFOS	11	26

Quelle: TZW

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der Einzelstoffanalytik auf PFAS aus wässrigen Proben mit Messunsicherheiten bzw. mit Abweichungen bei Mehrfachbestimmungen in der Größenordnung von 20 bis 30 % gerechnet werden muss. Diese Unsicherheiten, die aus der analytischen Bestimmung der PFAS resultieren, müssen beim Vergleich von Ergebnissen, die beispielsweise für Schüttel- und Säuleneluat ermittelt wurden, berücksichtigt werden.

## 2.4 Berechnung der Quotientensumme

Zur Bewertung der Ergebnisse aus den Elutionsversuchen wurden neben den in den Eluat gemessenen Konzentrationen der einzelnen PFAS auch die Summe der Konzentrationen der 20 in Tabelle 2.7 aufgeführten PFAS sowie die sogenannte Quotientensumme herangezogen. Die Quotientensumme ist ein von Behörden in Baden-Württemberg häufig herangezogenes Maß für die Beurteilung von Boden oder Wasser hinsichtlich der Belastung

mit PFAS. Auch in dem Schreiben des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg vom 21. August 2018 zur Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte für per- und polyfluorierte Chemikalien zur Beurteilung nachteiliger Veränderungen der Beschaffenheit des Grund- und Sickerwassers aus schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten wird die Quotientensumme zur Beurteilung der Beschaffenheit von Grund- und Sickerwässern sowie zur Beurteilung der Beschaffenheit von wässrigen Eluat herangezogen. Unterschreitet die Quotientensumme den Wert von 1, ist für das betreffende Grund- oder Sickerwasser keine Gefährdung zu besorgen.

Die Quotientensumme ist ein Bewertungsindex, der sich als Summe aller Quotienten aus gemessener Konzentration und stoffspezifischen Geringfügigkeitsschwellenwerten (GFS-Werten) ergibt. Die GFS-Werte sind human-toxikologisch begründet und entsprechen den Leitwerten, die durch das Umweltbundesamt für sieben PFAS festgelegt wurden (Tabelle 2.12). Bei Einhaltung der Leitwerte im Trinkwasser, kann davon ausgegangen werden, dass auch bei lebenslanger Aufnahme kein gesundheitliches Risiko besteht. Für sechs weitere PFAS wurden durch das Umweltbundesamt gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) festgesetzt. Für diese Substanzen ist die toxikologische Datenbasis nicht ausreichend, um Leitwerte festzulegen. Die GOW wurden in Baden-Württemberg als vorläufige GFS-Werte übernommen. In die Berechnung der Quotientensumme gehen allerdings nur PFAS ein, für die GFS-Werte festgelegt wurden. PFAS, für die bislang nur vorläufige GFS-Werte festgelegt wurden, werden nicht berücksichtigt.

Neben der Quotientensumme werden zur Bewertung von Grund- oder Sickerwässern immer auch die Konzentrationen der Einzelstoffe herangezogen, die mit den Leitwerten oder den gesundheitlichen Orientierungswerten verglichen werden.

Tabelle 2.12: GFS-Werte und vorläufige GFS-Werte für PFAS im Grund- und Sickerwasser

	GFS-Wert [µg/L]	Vorläufiger GFS-Wert [µg/L]
Perfluorbutansäure (PFBA)	10	
Perfluorpentansäure (PFPeA)		3,0
Perfluorhexansäure (PFHxA)	6,0	
Perfluorheptansäure (PFHpA)		0,3
Perfluoroktansäure (PFOA)	0,1	
Perfluornonansäure (PFNA)	0,06	
Perfluordecansäure (PFDA)		0,1
Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)	6,0	
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS)	0,1	
Perfluorheptansulfonsäure (PFHpS)		0,3
Perfluoroktansulfonat (PFOS)	0,1	
1H,1H,2H,2H-Perfluoroktansulfonsäure (H4PFOS)		0,1
Perfluoroktansulfonamid (PFOSA)		0,1
Weitere PFAS (z. B. GenX, ADONA, u. a.)		1,0

Quelle: TZW

## 2.5 Berechnung der Frachten

Um die Ergebnisse der beiden Elutionsverfahren vergleichen zu können, können die in den Eluat gemessenen Konzentrationen auch in Frachten umgerechnet werden. Die Fracht gibt die bei der Elution freigesetzte Menge an PFAS an. Die Umrechnung erfolgte sowohl für das Schütteleluat als auch für das Säulenuat entsprechend den Angaben in den beiden DIN-Normen nach folgender Beziehung:

$$\text{Gleichung 2: } F = \frac{C_{\text{PFAS}} \cdot W}{m_{\text{tr}}}$$

mit:

F = freigesetzte PFAS-Fracht in µg/kg TS

$C_{\text{PFAS}}$  = gemessene PFAS-Konzentration in µg/L

W = Wasservolumen in L

$m_{\text{tr}}$  = eingesetzte Feststoffmenge in kg TS

Im Falle des Schütteleluats wurde für die Frachtberechnung für das Verhältnis W/F stets der Wert 2L/kg verwendet, während im Falle des Säulenuats die auf die Trockenmasse rückgerechnete eingesetzte Bodenmenge F und das durch die Säule zum Zeitpunkt der Probenahme geflossene Wasservolumen W eingesetzt wurden. In den Fällen, in denen der Boden mit Quarzsand gemischt wurde, wurde dies durch einen entsprechenden Faktor bei der Berechnung der Fracht berücksichtigt.

# 3 Ergebnisse

## 3.1 Statistische Auswertung der Ergebnisse

Insgesamt wurden jeweils 18 Schüttel- und Säuleneluate aus Böden von Verdachtsflächen und jeweils 17 Schüttel- und Säuleneluate aus Böden von Hintergrundstandorten auf ihre Gehalte an PFAS analysiert. Alle Einzelergebnisse, d.h. die in den Eluaten gemessenen PFAS-Konzentrationen

sind im Anhang tabellarisch zusammengestellt. Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 fassen die Ergebnisse einer statistischen Auswertung der Einzelergebnisse zusammen. Die Tabellen zeigen für die einzelnen PFAS den Anteil positiver Befunde sowie den Median und die maximale Konzentration, wobei jeweils zwischen Schüttel- und Säuleneluat unterschieden wurde.

Tabelle 3.1: Anteil N%<sub>pos</sub> positiver Befunde sowie Median  $c_{median}$  und maximale Konzentration  $c_{max}$  für PFAS in Schüttel- und Säuleneluat für Böden von Verdachtsflächen

	Schüttel eluat			Säulen eluat		
	N% <sub>pos</sub>	$c_{median}$ (µg/L)	$c_{max}$ (µg/L)	N% <sub>pos</sub>	$c_{median}$ (µg/L)	$c_{max}$ (µg/L)
PFBA	100	0,30	1,0	100	0,29	1,6
PFPA	100	0,65	2,8	100	0,56	4,2
PFHxA	100	0,70	2,2	100	0,61	2,5
PFHpA	100	0,98	2,1	100	0,87	2,4
PFOA	100	5,0	17	100	5,3	12
PFNA	100	1,8	8,7	100	2,7	11
PFDA	100	3,0	9,0	100	2,0	22
PFUnA	94	0,072	0,26	53	0,044	0,22
PFDoA	100	0,020	0,24	42	0,016	0,061
PFBS	28	0,002	0,005	16	0,004	0,005
PFPeS	17	0,005	0,006	11	0,005	0,005
PFHxS	78	0,009	0,085	79	0,010	0,085
PFHpS	78	0,048	0,19	89	0,045	0,32
PFOS	100	1,7	29	100	4,2	165
PFDS	0	-	-	0	-	-
PFOSA	89	0,039	2,0	63	0,11	12
HPFHpA	0	-	-	0	-	-
H2PFDA	6	0,005	0,005	0	-	-
H4PFUnA	0	-	-	0	-	-
H4PFOS	0	-	-	0	-	-

Quelle: TZW

Tabelle 3.2: Anteil N%<sub>pos</sub> positiver Befunde sowie Median  $c_{\text{median}}$  und maximale Konzentration  $c_{\text{max}}$  für PFAS in Schüttel- und Säuleneluat für Böden von Hintergrundstandorten

	Schüttel- eluat			Säulen- eluat		
	N% <sub>pos</sub>	$c_{\text{median}}$ (µg/L)	$c_{\text{max}}$ (µg/L)	N% <sub>pos</sub>	$c_{\text{median}}$ (µg/L)	$c_{\text{max}}$ (µg/L)
PFBA	88	0,003	0,029	100	0,034	0,16
PFPA	24	0,003	0,017	100	0,015	0,12
PFHxA	29	0,004	0,009	100	0,014	0,21
PFHpA	41	0,002	0,010	94	0,015	0,22
PFOA	59	0,004	0,024	100	0,040	1,3
PFNA	24	0,002	0,004	76	0,011	0,10
PFDA	24	0,003	0,015	29	0,004	0,30
PFUnA	6	0,013	0,013	0	-	-
PFDoA	6	0,016	0,016	0	-	-
PFBS	82	0,002	0,004	76	0,003	0,010
PFPeS	0	-	-	6	0,001	0,001
PFHxS	41	0,001	0,004	53	0,002	0,030
PFHpS	0	-	-	18	0,005	0,015
PFOS	88	0,004	0,022	94	0,026	0,65
PFDS	0	-	-	0	-	-
PFOSA	0	-	-	6	0,008	0,008
HPFHpA	0	-	-	0	-	-
H2PFDA	0	-	-	0	-	-
H4PFUnA	0	-	-	0	-	-
H4PFOS	0	-	-	0	-	-

Quelle: TZW

Für die Bodenproben, die aus den Verdachtsflächen entnommen wurden, wurden in allen Eluat PFAS nachgewiesen (Tabelle 3.1). Die perfluorierten Carbonsäuren PFBA, PFPA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA und PFDA sowie die perfluorierte Sulfonsäure PFOS wurden in allen untersuchten Schüttel- und Säuleneluat gefunden. Die Konzentrationen der Einzelverbindungen lagen zwischen Werten unterhalb der Bestimmungsgrenze und 165 µg/L. In vielen Eluat wurden die höchsten Einzelstoffkonzentrationen für PFOS gemessen. Die Summe der PFAS-Konzentrationen in den Eluat lag zwischen 0,1 µg/L und über 300 µg/L, was die große Heterogenität in der Belastung der untersuchten Böden aus den Verdachtsflächen mit PFAS verdeutlicht. Die Mehrzahl der Eluate wies allerdings in der Summe eine PFAS-Belastung zwischen 10 und 100 µg/L auf.

Große Unterschiede zwischen den Ergebnissen für Schüttel- und Säuleneluat lassen sich aus den statistischen Daten für die Böden aus den Verdachtsflächen nicht ableiten. Abbildung 3.1 zeigt die Verteilung der PFAS-Summenkonzentrationen für die Schüttel- und die Säuleneluate. Man erkennt, dass die Verteilung der Belastung bei beiden

Elutionsverfahren nahezu identisch ist. Nur für einen Boden wurde mit dem Säulenverfahren eine deutlich höhere Summenkonzentration an PFAS gefunden als mit dem Schüttelverfahren. Ein detaillierter Vergleich der Ergebnisse für Schüttel- und Säuleneluate wird in Kapitel 3.4 vorgenommen.

Für die Eluate, die aus Bodenproben von Hintergrundstandorten gewonnen wurden, ergibt sich eine andere Belastungssituation (Tabelle 3.2): Mit Ausnahme des Schüttel- eluats für den Boden „100, Neuhaus“, für das kein positiver Nachweis erhalten wurde, wurden in allen Eluat PFAS nachgewiesen. Allerdings lagen die Anzahl der nachgewiesenen Verbindungen und ihre Konzentrationen deutlich niedriger als in den Eluat aus den Böden von Verdachtsflächen. Im Gegensatz zu den Proben von den Verdachtsflächen wurde in den Proben von den Hintergrundstandorten in allen Schüttel- eluat keine Einzelverbindung nachgewiesen. Dagegen wurden in allen Säuleneluat, sowohl der Verdachts- als auch der Hintergrundflächen, die perfluorierten Carbonsäuren PFBA, PFPA, PFHxA und PFOA gefunden. Die Konzentrationen der einzelnen PFAS

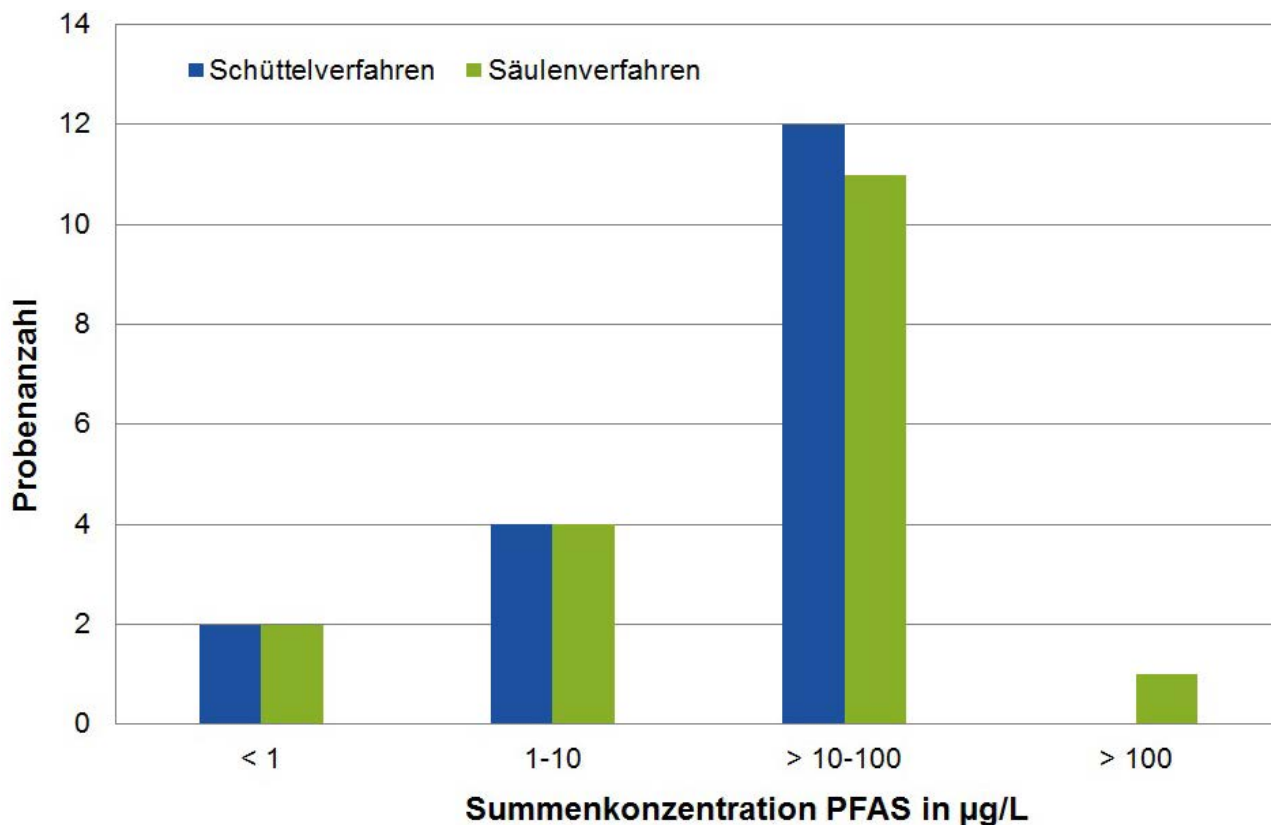


Abbildung 3.1: Verteilung der PFAS-Summenkonzentration in den Schüttel- und Säuleneluates für Böden aus Verdachtsflächen (Quelle: TZW)

lagen zwischen Werten unterhalb der Bestimmungsgrenze und  $1,3 \mu\text{g/L}$ . Die Summe der PFAS-Konzentrationen in den Eluates lag stets unter  $3 \mu\text{g/L}$ .

In Analogie zu Abbildung 3.1 zeigt Abbildung 3.2 die Verteilung der PFAS-Summenkonzentrationen für die Schüttel- und die Säuleneluate, die aus Proben von Hintergrundstandorten gewonnen wurden. Aufgrund der generell niedrigeren Gehalte an PFAS wurden die Konzentrationsbereiche entsprechend angepasst. Im Gegensatz zu den Böden aus den Verdachtsflächen zeigt sich hier ein deutlicher Unterschied in den Ergebnissen zwischen den beiden Elutionsverfahren. Die Verteilung der Summenkonzentrationen für die Eluate aus dem Säulenverfahren ist im Vergleich zur Verteilung der Summenkonzentrationen für die Eluate aus dem Schüttelverfahren zu höheren Werten hin verschoben. Dies deutet darauf hin, dass für gering belastete Böden durch das Säulenverfahren höhere PFAS-Gehalte eluiert werden als durch das Schüttelverfahren. Eine detaillierte Auswertung der Unterschiede zwischen Säulen- und Schütteleluat erfolgt in Kapitel 3.4.

### 3.2 Abtrennung der Partikel in den Eluates

Die beiden DIN-Verfahren zur Herstellung von Schüttel- bzw. Säuleneluat unterscheiden sich hinsichtlich der Vorgehensweise bei der Partikelabtrennung aus den Eluates vor der PFAS-Analytik. Bei der Herstellung der Schütteleluat ist eine Trennung von fester und flüssiger Phase unabdingbar. DIN 19529 sieht das Absetzen der Feststoffe mit anschließendem Dekantieren, eine Zentrifugation und eine abschließende Druckfiltration über Glasfaser-Mikrofilter (mittlerer Abscheidegrad  $> 0,7 \mu\text{m}$ ) vor, während für das Säulenelutionsverfahren nach DIN 19528 eine Feststoffabtrennung nur bei einer Trübung  $> 100 \text{ FNU}$  vorgesehen ist. In diesem Fall soll eine Zentrifugation erfolgen.

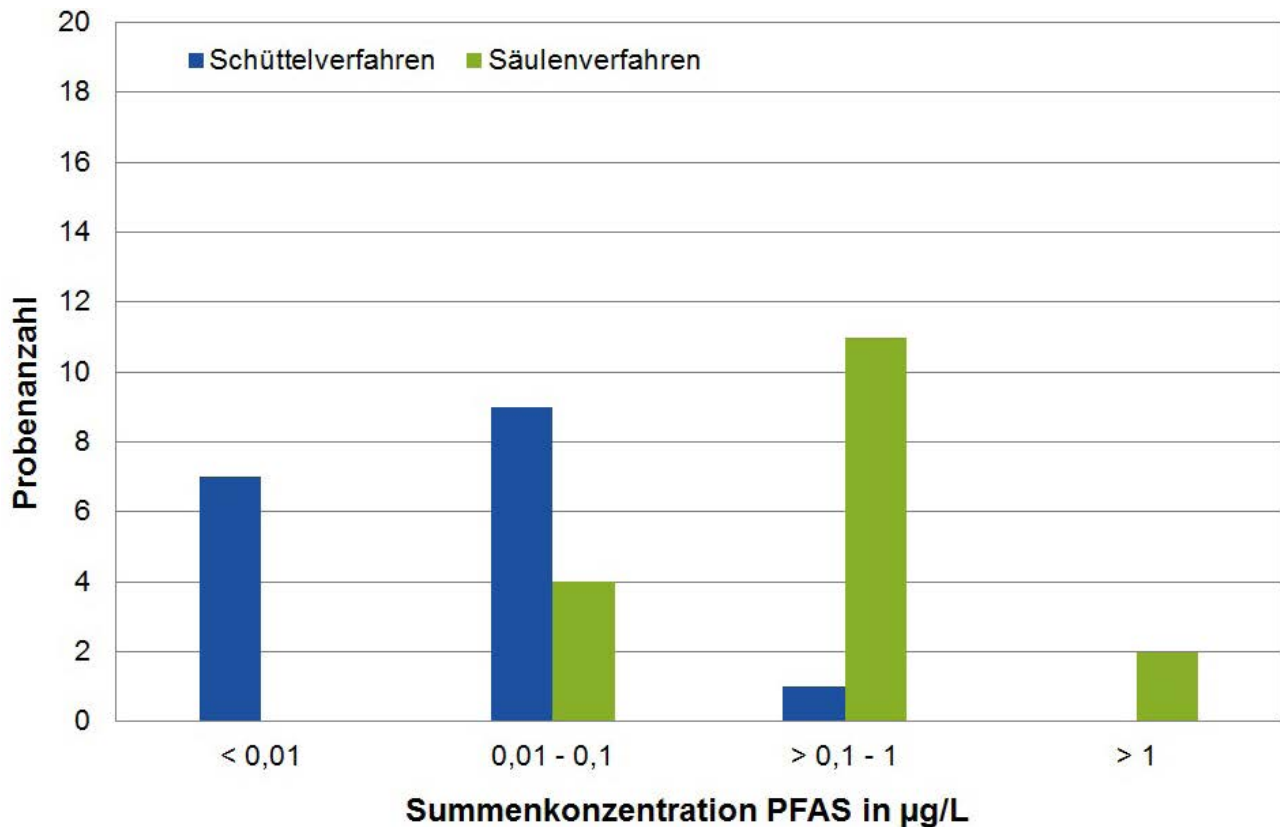


Abbildung 3.2: Verteilung der PFAS-Summenkonzentration in den Schüttel- und Säuleneluaten für Böden aus Hintergrundstandorten (Quelle: TZW)

Wie Abbildung 3.3 und 3.4 exemplarisch für die Eluate zweier Bodenproben, die aus Verdachtsflächen entnommen wurden, zeigen, können sich die bei der Vorgehensweise nach DIN jeweils resultierenden Eluate hinsichtlich ihrer Färbung und ihres Trübungsgehalts deutlich unterscheiden. Für die Eluate aus Böden, die aus Hintergrundstandorten entnommen wurden, wurden vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich des Aussehens der Eluate erhalten.



Abbildung 3.3: Eluate aus Schüttel- und Säulenversuchen für Probe Rhm10, 30 (Quelle: TZW)

Um den Einfluss der Trübung der Eluate auf den Gehalt der PFAS beurteilen zu können, wurden die Eluate, die in Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4 dargestellt sind, in Ergänzung zu der Vorgehensweise nach DIN jeweils einer alternativen Feststoffabtrennung unterzogen. So wurden die Schüttel- und Säuleneluate von zwei Bodenproben nicht nur zentrifugiert und filtriert, sondern auch nach der alleinigen Zentrifugation auf ihren Gehalt an PFAS analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.3 zusammengestellt.



Abbildung 3.4: Eluate aus Schüttel- und Säulenversuchen für Probe Forchheim, 30–60 cm (Quelle: TZW)

Tabelle 3.3: Vergleich verschiedener Vorbehandlungsverfahren zur Feststoffabtrennung beim Schüttelverfahren (Konzentrationen der PFAS in µg/L)

TZW-Nr:	2017020281		2017020288	
Bodenprobe:	Rhm10, 30		Forchheim, 30–60 cm	
	zentrifugiert	zentrifugiert, filtriert	zentrifugiert	zentrifugiert, filtriert
PFBA	0,30	0,31	0,022	0,038
PFPA	0,56	0,54	< 0,001	< 0,001
PFHxA	0,51	0,52	0,034	0,032
PFHpA	0,42	0,44	0,029	0,025
PFOA	2,1	2,3	0,075	0,070
PFNA	0,68	0,72	0,020	0,020
PFDA	1,0	1,0	< 0,001	0,028
PFUnA	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,001
PFDoA	< 0,001	0,003	< 0,001	< 0,001
PFBS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFPeS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFHxS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFHpS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFOS	0,083	0,088	0,095	0,13
PFDS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFOSA	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
HPFHpA	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
H2PFDA	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
H4PFUnA	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
H4PFOS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Summe PFAS	5,7	5,9	0,28	0,34
Quotientensumme	33,3	36,0	2,0	2,3

Quelle: TZW

Man erkennt, dass die Ergebnisse für alle PFAS – unabhängig von der Höhe der Belastung der einzelnen Eluate – eine gute Übereinstimmung aufweisen. Auch die Gesamtbelastung mit PFAS und die errechnete Quotientensumme zeigen keine signifikanten Unterschiede. Nach diesen Ergebnissen wäre eine alleinige Zentrifugation der Eluate aus den Schüttelversuchen ausreichend, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Bei den Säulenversuchen wurden in Ergänzung zu der Messung der unbehandelten Eluate (entsprechend DIN 19528) Eluate auf PFAS analysiert, die ebenfalls zentrifugiert sowie zentrifugiert und filtriert (jeweils entsprechend der Vorgehensweise bei den Eluaten aus den Schüttelversuchen) wurden. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle 3.4 zusammengestellt.

Tabelle 3.4: Vergleich verschiedener Vorbehandlungsverfahren zur Feststoffabtrennung beim Säulenverfahren (Konzentrationen der PFAS in µg/L)

TZW-Nr:	2017020281			2017020288		
Bodenprobe:	Rhm10, 30			Forchheim, 30–60 cm		
	unbehandelt	zentrifugiert	zentrifugiert, filtriert	unbehandelt	zentrifugiert	zentrifugiert, filtriert
PFBA	0,31	0,31	0,32	0,020	0,022	0,042
PFPA	0,60	0,60	0,52	< 0,001	0,022	< 0,001
PFHxA	0,50	0,50	0,51	0,031	0,031	0,027
PFHpA	0,39	0,38	0,41	0,020	0,023	0,024
PFOA	2,2	2,0	2,6	0,063	0,080	0,081
PFNA	0,99	1,0	1,1	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFDA	1,3	1,3	1,2	< 0,001	0,017	< 0,001
PFUnA	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFDoA	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFBS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFPeS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFHxS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFHpS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFOS	0,094	0,076	0,39	0,062	0,080	0,11
PFDS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
PFOSA	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
HPFHpA	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
H2PFDA	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
H4PFUnA	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
H4PFOS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Summe PFAS	6,4	6,2	7,1	0,20	0,28	0,28
Quotientensumme	39,6	37,5	48,4	1,3	1,6	1,9

Quelle: TZW

Auch hier zeigen fast alle Ergebnisse eine gute Übereinstimmung, unabhängig von der Probenvorbehandlung. Der erhöhte Wert für PFOS in der zentrifugierten und filtrierten Probe Rhm10, 30 lässt sich durch eine Querkontamination bei der Filtration der Probe erklären.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Versuche, dass sowohl für die Schüttelmethode als auch für die Säulenmethode eine Vorbehandlung der Eluate, die von der Vorgehensweise nach DIN abweicht, keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Anscheinend ist die Sorption der PFAS an die Partikel nicht so groß, dass eine weitgehende Partikelentfernung, die sich an der Trübung der Eluate erkennen lässt, einen signifikanten Einfluss auf die Konzentrationen der PFAS hat. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Resultaten, die für die Eluate aus dem Säulenverfahren erhalten wurden, wurde auf den in DIN 19529 beschriebenen Filtrationsschritt bei den meisten Versuchen verzichtet. Die Untersuchungen

zum Einfluss der Partikelabtrennung erfolgten ausschließlich mit Böden aus Verdachtsflächen und nicht mit Böden aus Hintergrundstandorten.



### 3.3 DOC-Gehalte der Eluate

Um mögliche Unterschiede zwischen den beiden Elutionsverfahren beurteilen zu können, wurden in allen Eluaten

Tabelle 3.5: DOC-Gehalte in den Schüttel- und Säuleneluaten für Böden aus Verdachtsflächen

Probenkennung	DOC im Schüttel- eluat (mg/L)	DOC im Säuleneluat (mg/L)
Bad 2A1, 0,6-2,0	7,7	8,4
Bad 2A1, 2,0-3,0	4,3	5,5
Sportplatz Oos, 0,6-2,0	4,5	4,5
Sportplatz Oos, 2,0-3,0	1,6	3,1
Sto 7, 30	18	21
Sto 7, 60	42	27
DuHü4, 30	15	16
DuHü4, 60	23	20
Vim5, 30	13	14
Vim5, 60	10	11
Rhm10, 30	11	17
Rhm10, 60	9,2	8,7
Steinbach, 0–30 cm	13	16
Steinbach, 30–60 cm	80	8,7
Hügelsheim, 0–30 cm	12	14
Hügelsheim, 30–60 cm	41	17
Forchheim, 0–30 cm	12	10
Forchheim, 30–60 cm	43	22
Forchheim	51	nicht untersucht
Hügelsheim	30	nicht untersucht

Quelle: TZW

Die DOC-Gehalte in den Eluaten korrelieren nur eingeschränkt mit den TOC-Gehalten der Böden (Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2). Teilweise werden für Böden, die höhere Gehalte an organischem Material aufweisen, auch erhöhte DOC-Werte im Eluat gefunden (beispielsweise in den Böden Sto 7, 30 oder Steinbach, 0–30 cm aus Verdachtsflächen oder in den Böden Trochtelfingen und 25, Steighof aus Hintergrundstandorten), aber es gibt auch Böden, für die geringe TOC-Gehalte, aber erhöhte DOC-Werte in den Eluaten gemessen werden (beispielsweise Forchheim, 30–60 cm (Verdachtsfläche) oder 3, Rohnhausen und 100, Neuhaus (Hintergrundstandorte)). Der Vergleich der DOC-Werte für die beiden Elutionsverfahren zeigt ein verhältnismäßig heterogenes Bild: Während für eine Vielzahl an Böden die DOC-Gehalte im Schüttel- und im Säuleneluat sehr ähnlich sind, gibt es auch einige Proben, für die signifikante Unterschiede gemessen wurden, die über die analytische Messunsicherheit hinausgehen. Treten signifikante Unterschiede auf, sind i. d. R. die DOC-

neben den PFAS-Konzentrationen die DOC-Gehalte bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.5 und Tabelle 3.6 gegenübergestellt.

Tabelle 3.6: DOC-Gehalte in den Schüttel- und Säuleneluaten für Böden aus Hintergrundstandorten

Probenkennung	DOC im Schüttel- eluat (mg/L)	DOC im Säuleneluat (mg/L)
3, Rohnhausen	27	15
5, Rahlenhof	7,4	6,1
25, Steighof	14	17
48, Tachenhausen	7,5	12
51, Ellwangen 1	13	14
81, Venusberg	12	20
89, Stifterhof	10	11
93, Neuhaus	8,5	8,4
100, Neuhaus	18	17
105, Rineck	6,0	5,2
133, Erlenboden	13	12
135, Stöckenhof	8,2	7,4
141, Insultheimerhof	11	11
148, Mannheim Sandtorf	20	12
200, Schloss Neuhaus	8,0	6,8
50000, Trochtelfingen	14	14
Trochtelfingen	10	27

Quelle: TZW

Gehalte in den Eluaten aus den Schüttelversuchen höher als in den Eluaten aus den Säulenversuchen, allerdings gibt es auch Böden, bei denen die Säuleneluate höhere DOC-Gehalte aufweisen. Ein direkter Zusammenhang zwischen den DOC-Gehalten der Eluate und der Beschaffenheit der Böden lässt sich dabei nicht erkennen. Sehr bindige Böden, die bei der Herstellung der Säuleneluate mit Quarzsand vermischt wurden (siehe Tabelle 2.5 und Tabelle 2.6), unterscheiden sich hinsichtlich ihrer DOC-Gehalte in den Eluaten nicht von den weniger bindigen Böden. Auch treten für diese Böden Unterschiede zwischen den Säulen- und Schüttel-eluaten nicht häufiger oder weniger häufig auf als bei den anderen Böden. Auch ein Zusammenhang mit der PFAS-Belastung der Böden lässt sich aus den vorliegenden Ergebnissen nicht ableiten. Sowohl bei den belasteten Böden aus den Verdachtsflächen als auch aus den weniger belasteten Böden aus den Hintergrundstandorten ergibt sich ein uneinheitliches Bild hinsichtlich der DOC-Gehalte in den Eluaten.

### 3.4 Vergleich Schüttelverfahren und Säulenelutionsverfahren

In den folgenden Abbildungen sind jeweils für alle Bodenproben die Konzentrationen in den Eluaten, die mittels der beiden Elutionsverfahren gewonnen wurden, für PFBA als Vertreter der kurzkettigen PFAS (Abbildung 3.5

und Abbildung 3.6) und für PFOA und PFOS als Vertreter der langkettigen PFAS (Abbildung 3.7 bis Abbildung 3.10) gegenübergestellt. Wie in den vorangegangenen Kapiteln wurde unterschieden zwischen den Ergebnissen für Böden aus Verdachtsflächen und den Ergebnissen für Böden aus Hintergrundstandorten.

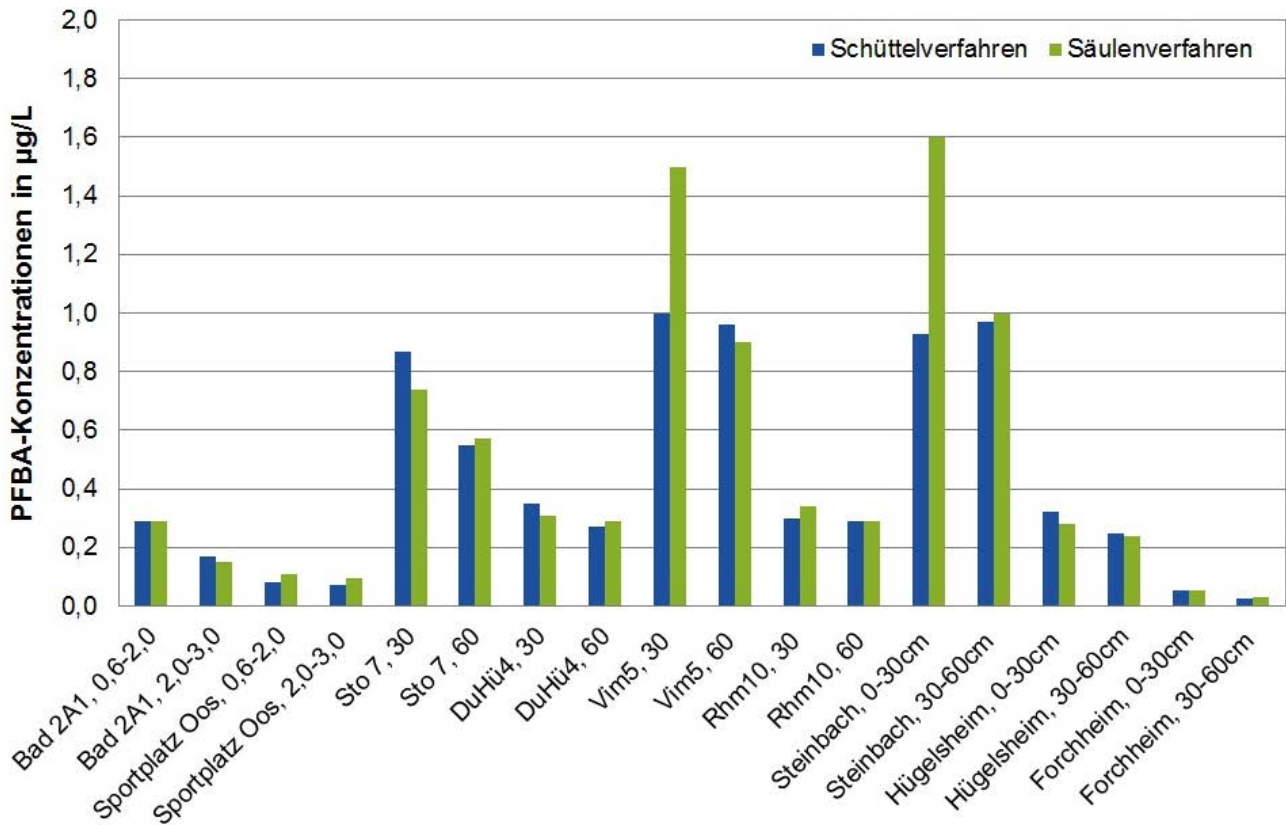


Abbildung 3.5: Eluatkonzentrationen an PFBA aus Schüttel- und Säulenversuchen für Böden aus Verdachtsflächen (Quelle: TZW)

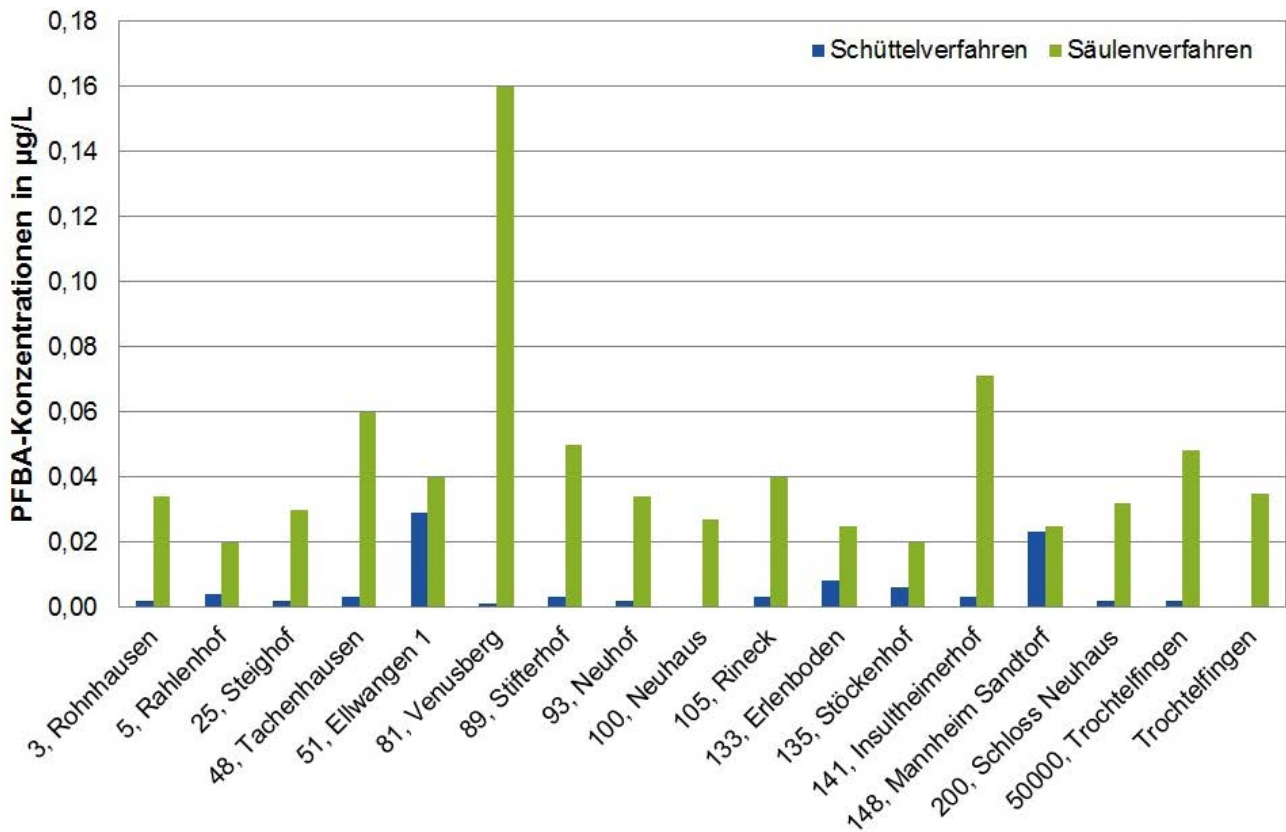


Abbildung 3.6: Eluatkonzentrationen an PFBA aus Schüttel- und Säulenversuchen für Böden aus Hintergrundstandorten (Quelle: TZW)

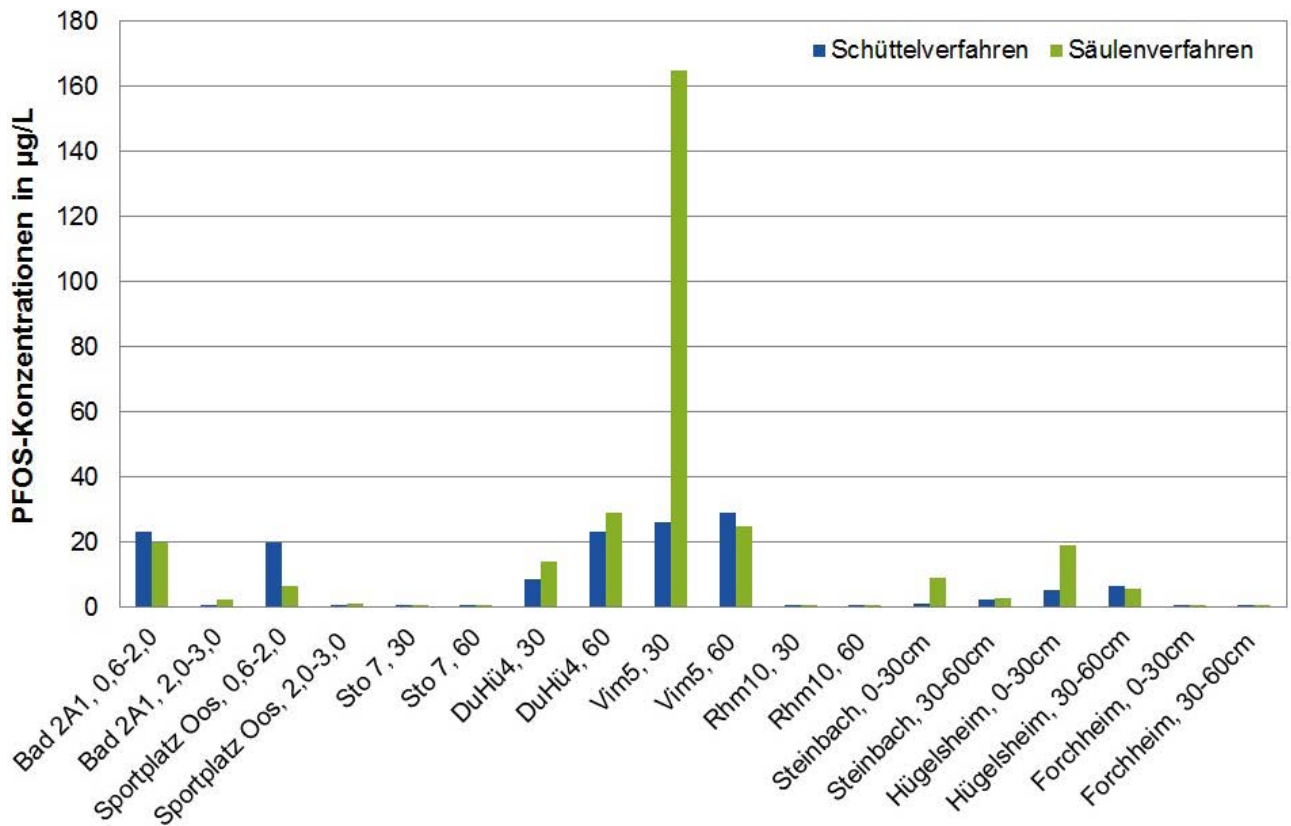


Abbildung 3.7: Eluatkonzentrationen an PFOS aus Schüttel- und Säulenversuchen für Böden aus Verdachtsflächen (Quelle: TZW)

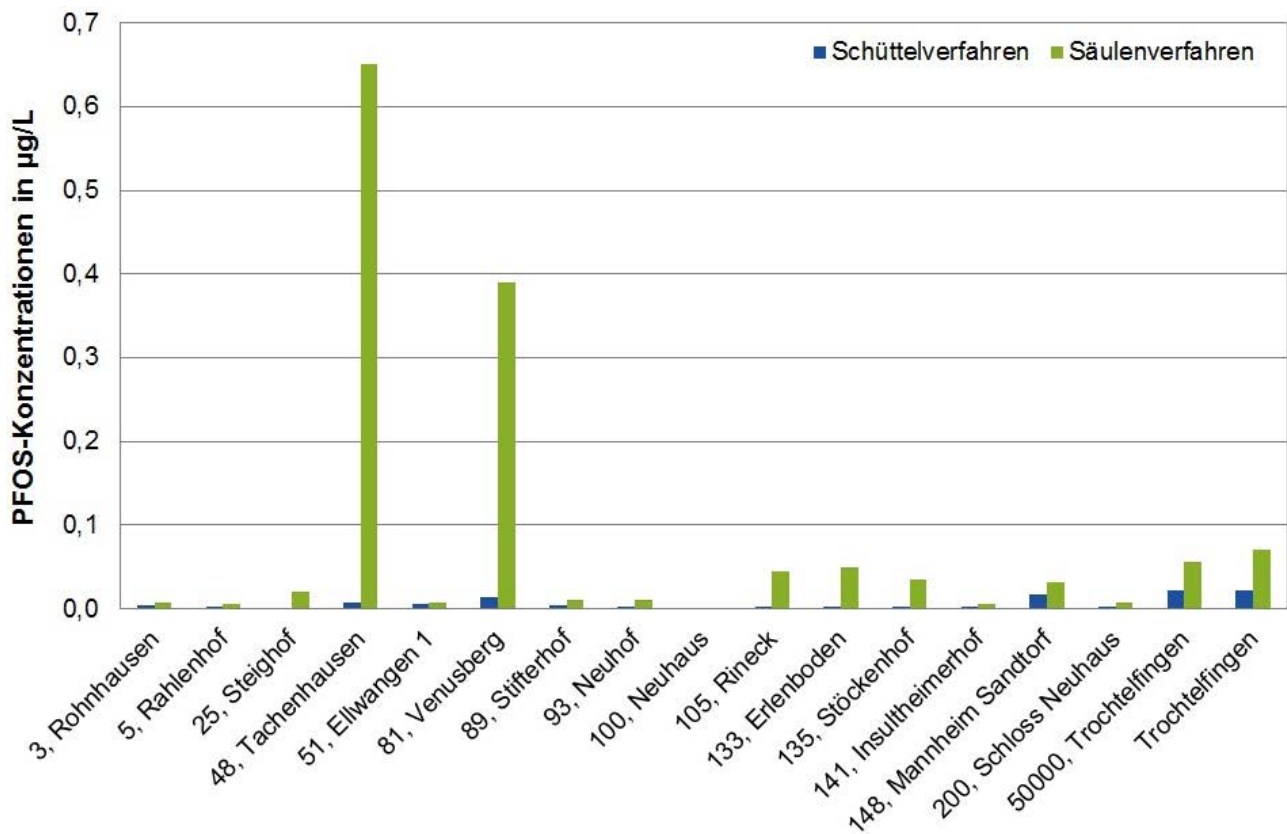


Abbildung 3.8: Eluatkonzentrationen an PFOS aus Schüttel- und Säulenversuchen für Böden aus Hintergrundstandorten (Quelle: TZW)

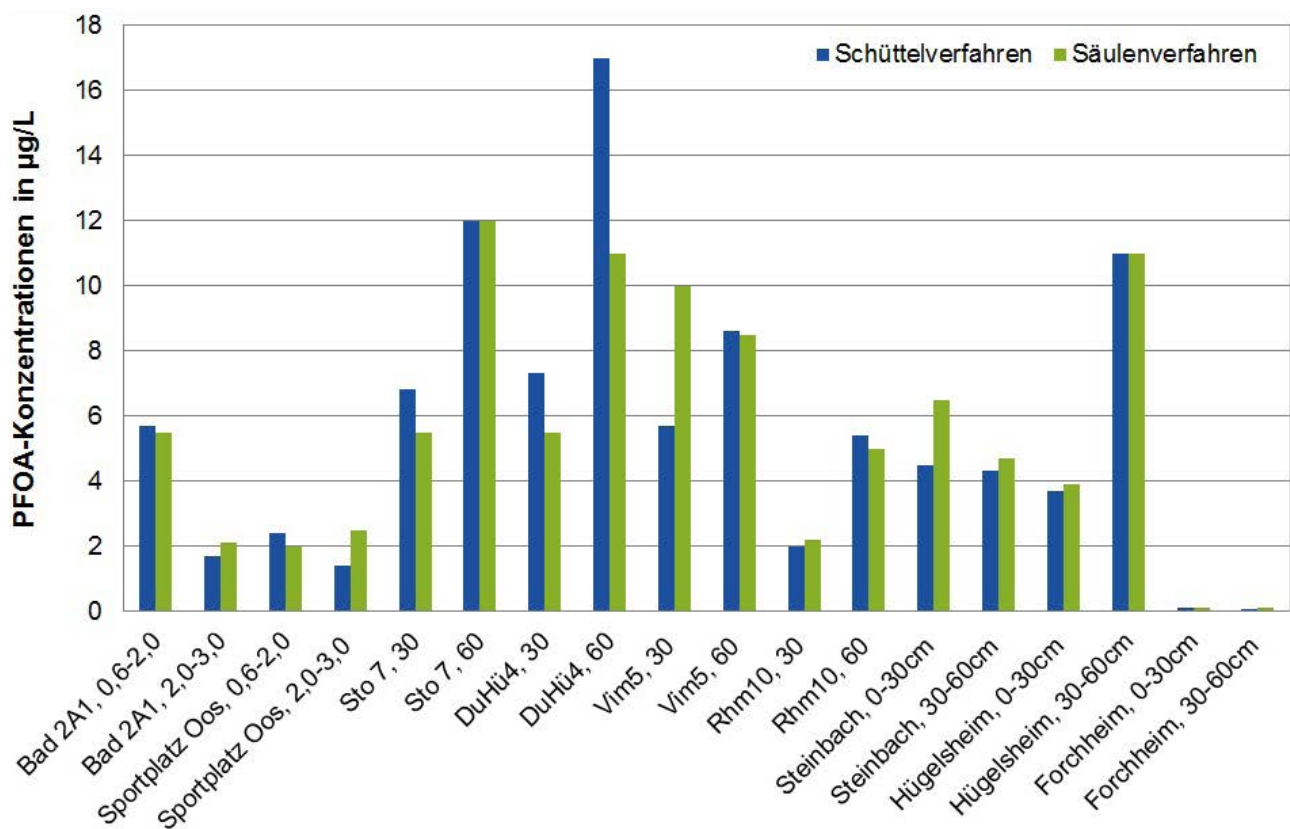


Abbildung 3.9: Eluatkonzentrationen an PFOA aus Schüttel- und Säulenversuchen für Böden aus Verdachtsflächen (Quelle: TZW)

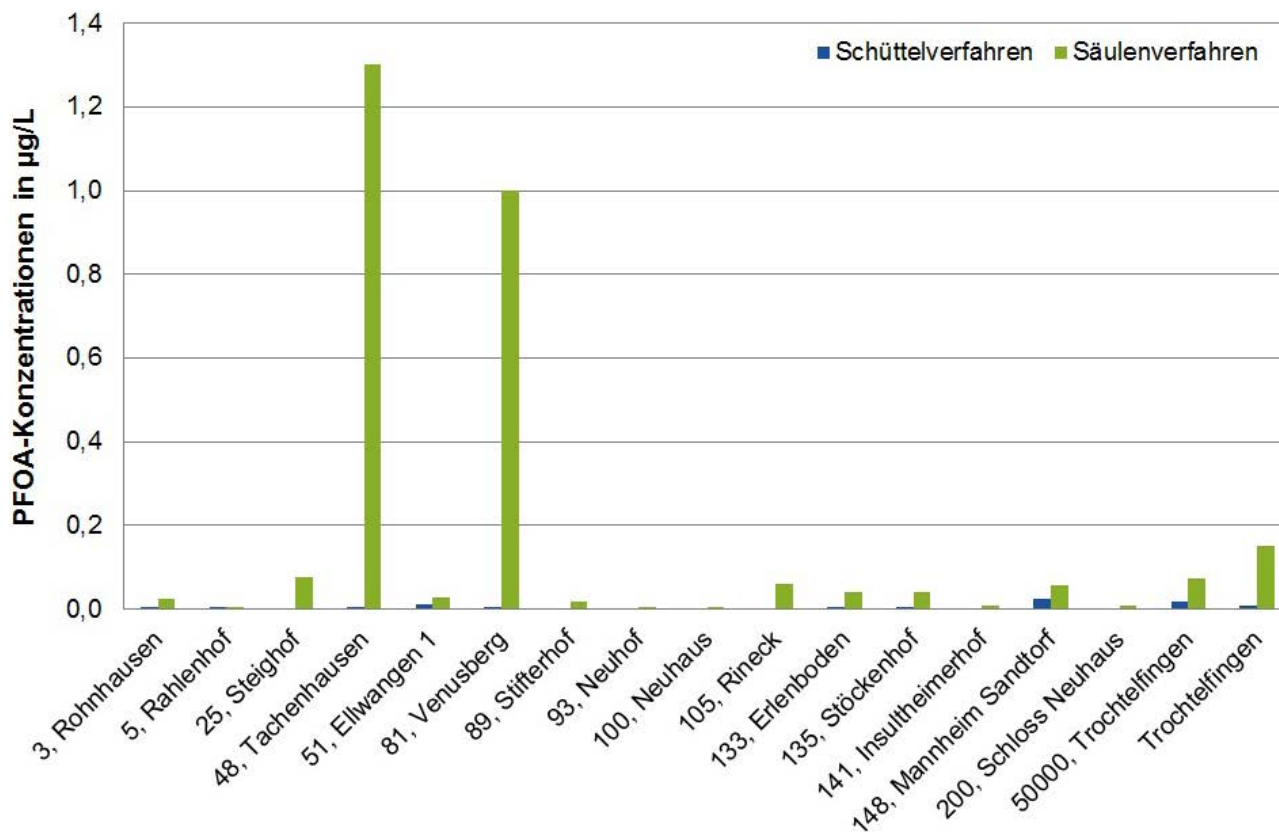


Abbildung 3.10: Eluatkonzentrationen an PFOA aus Schüttel- und Säulenversuchen für Böden aus Hintergrundstandorten (Quelle: TZW)

Wie die Diagramme zeigen, ergibt sich beim Vergleich der Ergebnisse von Schüttel- und Säulenverfahren nicht über alle Bodenproben hinweg ein einheitliches Bild. Betrachtet man die Ergebnisse für PFBA für die Böden aus den Verdachtsflächen (Abbildung 3.5), so gibt es eine große Anzahl an Bodenproben, für die beide Verfahren vergleichbare Konzentrationen im Eluat ergeben. Bei einigen wenigen Bodenproben erhält man mit dem Schüttelverfahren leicht höhere PFBA-Konzentrationen und bei einigen Bodenproben ergeben sich mit dem Säulenverfahren höhere Werte. Insbesondere für zwei Bodenproben aus Verdachtsflächen (Vim5, 30 und Steinbach, 0–30 cm) sind die PFBA-Konzentrationen im Eluat, die man mit dem Säulenverfahren erhält, deutlich höher als die entsprechenden Werte mit dem Schüttelverfahren. Für Bodenproben, die an denselben Stellen, aber aus einer anderen Tiefe entnommen wurden, sind hingegen die PFBA-Konzentrationen im Eluat bei beiden Verfahren jeweils vergleichbar.

Betrachtet man die PFBA-Konzentrationen in den Eluaten für die Böden aus Hintergrundstandorten (Abbildung 3.6) so ergibt sich ein anderes Bild: Für die Mehrzahl der Böden sind die gemessenen Konzentrationen in den Säuleneluaten signifikant höher als in den Schütteleluaten. Nur für zwei von 17 Böden (51, Ellwangen 1 und 148, Mann-

heim Sandtorf) ergeben sich für beide Elutionsverfahren vergleichbare Ergebnisse. Diese Böden weisen einen vergleichsweise geringen TOC-Gehalt auf, während die DOC-Konzentrationen im Eluat relativ hoch sind. Allerdings gibt es auch andere Böden aus Hintergrundstandorten, die dieses Charakteristikum zeigen, für die aber dennoch ein deutlicher Unterschied in den Ergebnissen zwischen Schüttel- und Säuleneluat auftritt.

Für die langkettigen PFAS PFOS (Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8) und PFOA (Abbildung 3.9 und Abbildung 3.10) ergibt sich ein ähnlich inhomogenes Bild. Während für eine Vielzahl an Böden aus Verdachtsflächen vergleichbare Konzentrationen für die beiden Elutionsverfahren resultieren, gibt es einzelne Fälle, in denen ein Verfahren die höheren Werte liefert. Tendenziell sind dabei wiederum die mittels Säulenverfahren ermittelten Konzentrationen höher, allerdings gibt es auch Böden, für die mit dem Schüttelverfahren höhere Werte an PFOS und PFOA erhalten werden. Eindeutige Unterschiede im Elutionsverhalten zwischen dem kurzkettigen PFBA und den längerkettigen PFOS und PFOA lassen sich für die belasteten Böden nicht erkennen. Für die Böden aus Hintergrundstandorten ergeben sich auch für PFOS und PFOA signifikante Unterschiede zwischen den beiden Elutionsverfahren. Für

nahezu alle Proben erhält man durch das Säulenelutionsverfahren deutlich höhere Konzentrationen als durch das Schüttelverfahren. Dabei sind die Unterschiede bei einigen Proben eher gering (weniger als einen Faktor 2), sie können in Einzelfällen aber auch mehr als eine Größenordnung betragen. Ein Zusammenhang zwischen den festgestellten Unterschieden und den Eigenschaften der Böden lässt sich auf der vorhandenen Datenbasis nicht erkennen.

Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12 zeigen – getrennt nach Bodenproben aus Verdachtsflächen und Bodenproben aus Hintergrundstandorten – die in den Eluaten aus den Schüttel- und Säulenverfahren gemessenen Summenkonzentrationen an PFAS. Für die Summenbildung wurden jeweils nur PFAS berücksichtigt, für die ein positiver Nachweis erhalten wurde.

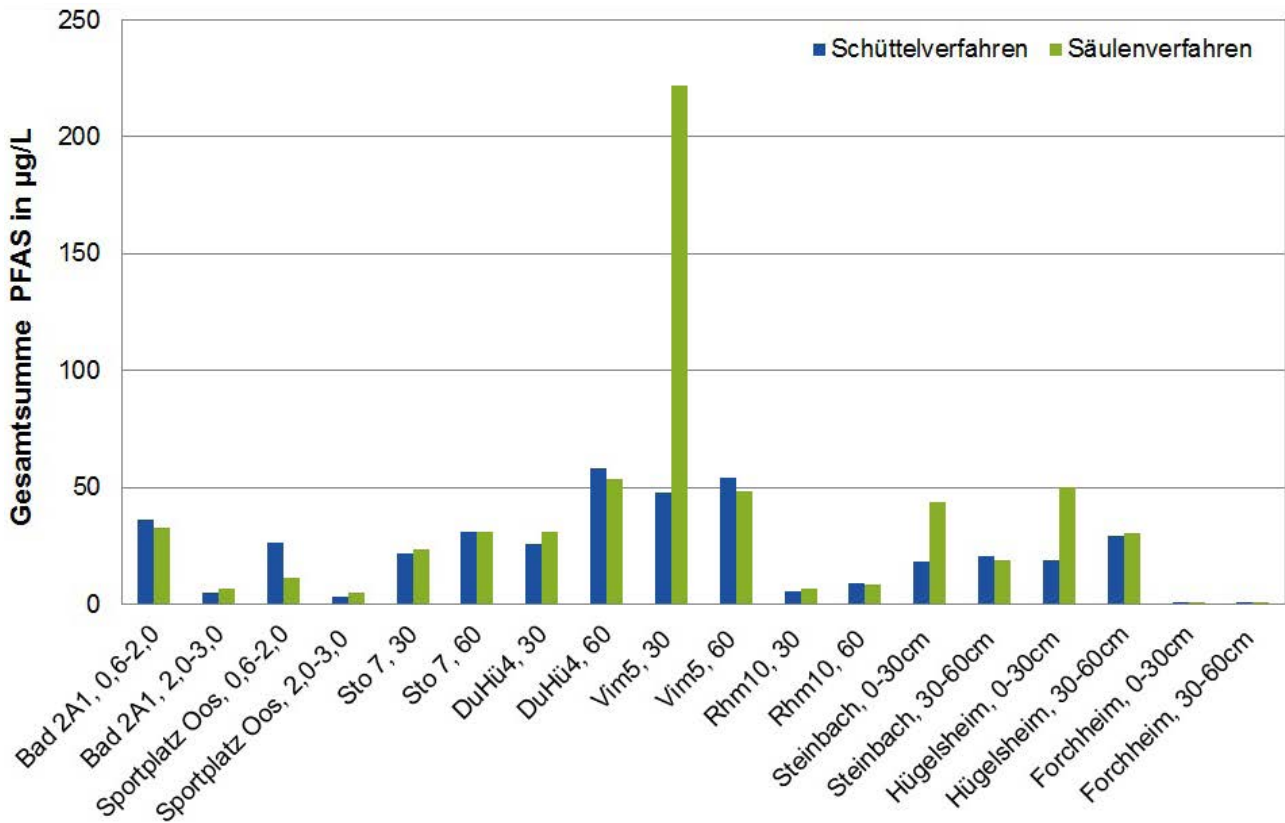


Abbildung 3.11: Summenkonzentrationen an PFAS in den Schüttel- und Säuleneluaten für Böden aus Verdachtsflächen (Quelle: TZW)



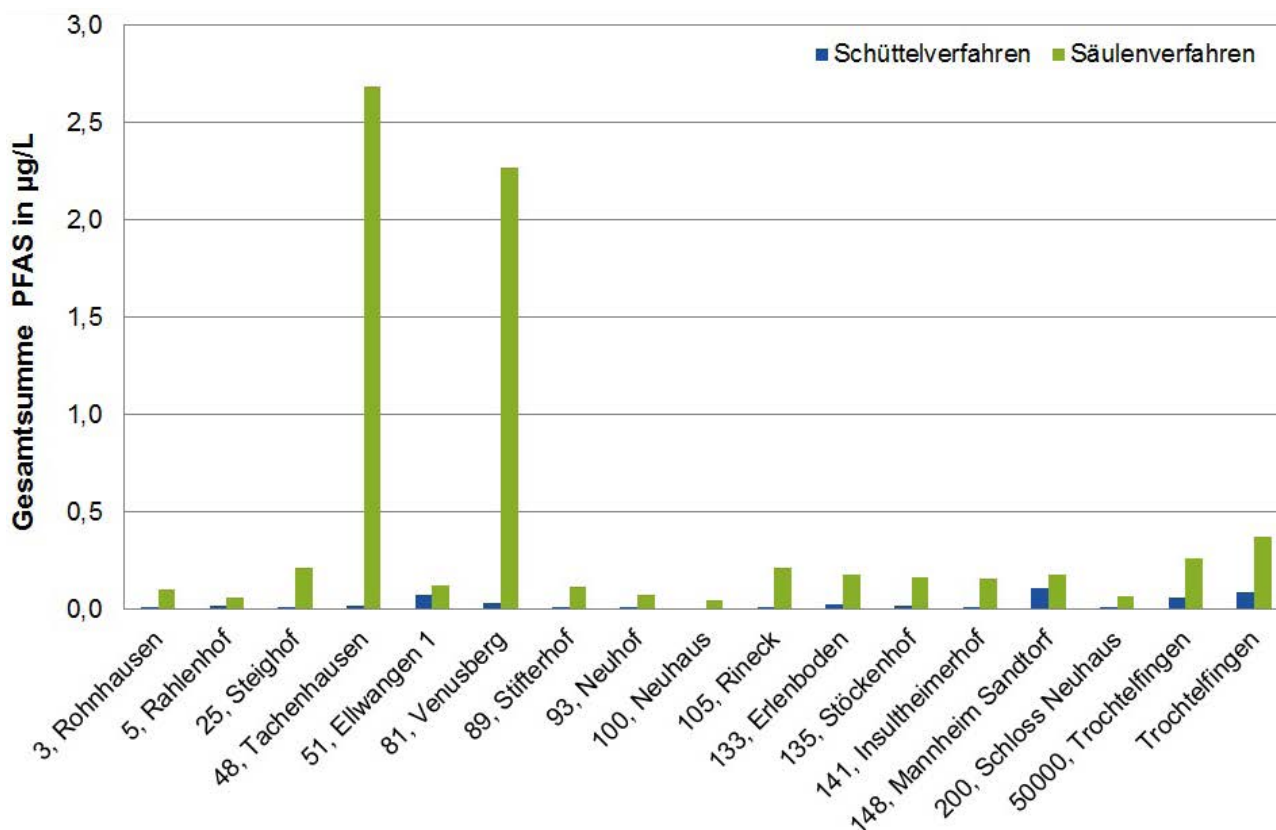


Abbildung 3.12: Summenkonzentrationen an PFAS in den Schüttel- und Säuleneluat für Böden aus Hintergrundstandorten (Quelle: TZW)

Analog zu den Ergebnissen für die Einzelstoffe ergibt sich beim Vergleich zwischen Schüttel- und Säulenelution auch bei summarischer Betrachtung der PFAS-Gehalte in den Eluat ein Unterschied zwischen Böden aus Verdachtsflächen und Böden aus Hintergrundstandorten. Bei den Böden aus Verdachtsflächen (Abbildung 3.11) gibt es eine Reihe von Proben, bei denen beide Elutionsverfahren im Rahmen der experimentellen und analytischen Unsicherheiten identische Resultate liefern. Daneben gibt es aber auch Böden, für die unterschiedliche Konzentrationen erhalten werden, wobei zumeist das Säulenverfahren die höheren Werte ergibt. Die für einige Böden aus Verdachtsflächen festgestellten Unterschiede im Elutionsverhalten lassen sich weder anhand ihrer Beschaffenheit (beispielsweise anhand der TOC-Gehalte in Tabelle 2.1) noch anhand der Trübstoffgehalte der Eluate (siehe Fotos im Anhang) erklären. Insbesondere bei Böden, die an derselben Stelle, aber aus verschiedenen Tiefen entnommen wurden (beispielsweise Vim5, 30 und Vim 5, 60), gibt es keine triviale Erklärung für das unterschiedliche Verhalten. Auch die DOC-Gehalte, die zusätzlich zu den PFAS-Konzentrationen in den Eluat gemessen wurden (siehe Tabelle 3.5), geben keine Hinweise auf die Ursachen für das unterschiedliche Elutionsverhalten der PFAS. Beispielsweise wurde für die Bodenprobe Vim5, 30 im Schüttel

eluat ein DOC-Wert von 13 mg/L und im Säuleneluat ein sehr ähnlicher DOC-Wert von 14 mg/L gemessen. Die in beiden Eluat gemessenen PFAS-Konzentrationen unterscheiden sich hingegen deutlich (1,0 µg/L PFBA, 5,7 µg/L PFOA und 26 µg/L PFOS im Schüttel eluat vs. 1,5 µg/L PFBA, 10 µg/L PFOA und 165 µg/L PFOS im Säuleneluat). Umgekehrte Verhältnisse findet man beispielsweise für die Bodenprobe Sto 7, 60: Während sich die DOC-Werte für das Schüttel- und Säuleneluat mit 42 mg/L bzw. 27 mg/L signifikant unterscheiden, liegen die Konzentrationen der einzelnen PFAS sehr eng beieinander (0,55 µg/L PFBA, 12 µg/L PFOA und 0,18 µg/L PFOS im Schüttel eluat vs. 0,57 µg/L PFBA, 12 µg/L PFOA und 0,23 µg/L PFOS im Säuleneluat). Dies deutet darauf hin, dass sich das Elutionsverhalten der PFAS und der organischen Matrix voneinander unterscheiden, was aufgrund des amphiphilen Charakters der PFAS zu erwarten ist. Die Messung der DOC-Gehalte in den Eluat erlaubt damit keine sichere Vorhersage der Gehalte an PFAS. Für die Mehrzahl der Böden aus Verdachtsflächen wurden allerdings in den Eluat unabhängig vom Elutionsverfahren vergleichbare DOC-Gehalte und vergleichbare PFAS-Konzentrationen ermittelt.

Für die geringer belasteten Böden aus Hintergrundstandorten zeigen auch die Ergebnisse für die summarische Be-

lastung mit PFAS ein eindeutiges Bild (Abbildung 3.12): Für alle Proben wurden mit dem Säulenverfahren höhere Gesamtkonzentrationen erhalten als mit dem Schüttelverfahren. Die Unterschiede in den Summenkonzentrationen liegen dabei zwischen einem Faktor 1,4 und einem Faktor 143. Ein Zusammenhang zwischen dem quantitativen Ausmaß der Unterschiede und den Eigenschaften des Bodens lassen sich nicht ableiten.

Für einen Vergleich der beiden Elutionsverfahren können nicht nur die Konzentrationen im Eluat, sondern auch die freigesetzten Frachten an PFAS herangezogen werden (siehe Kapitel 2.5). In den folgenden beiden Abbildungen sind jeweils für alle Bodenproben die bei den Schüttel- und Säulenversuchen insgesamt freigesetzten Frachten an PFAS gegenübergestellt.

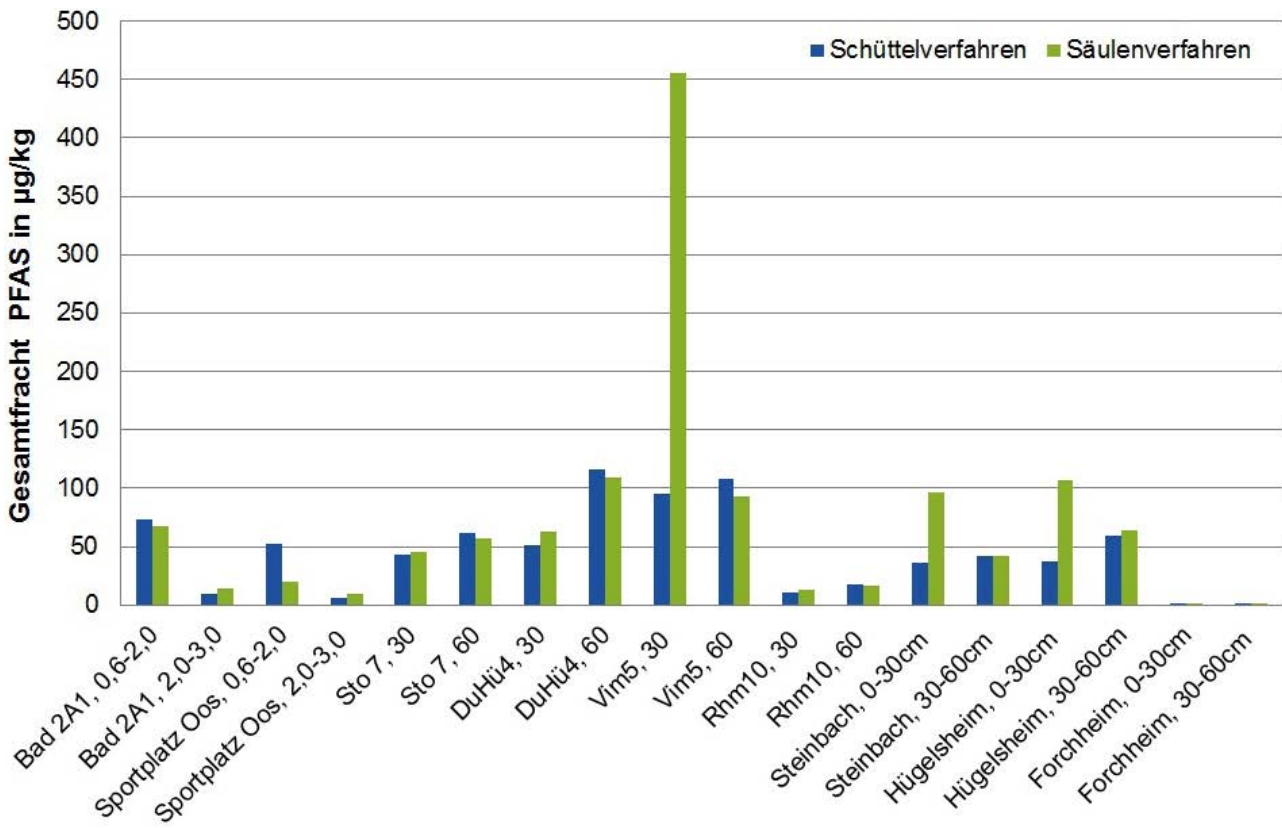


Abbildung 3.13: Freigesetzte Gesamtfrachten an PFAS aus Schüttel- und Säulenversuchen für Böden aus Verdachtsflächen (Quelle: TZW)



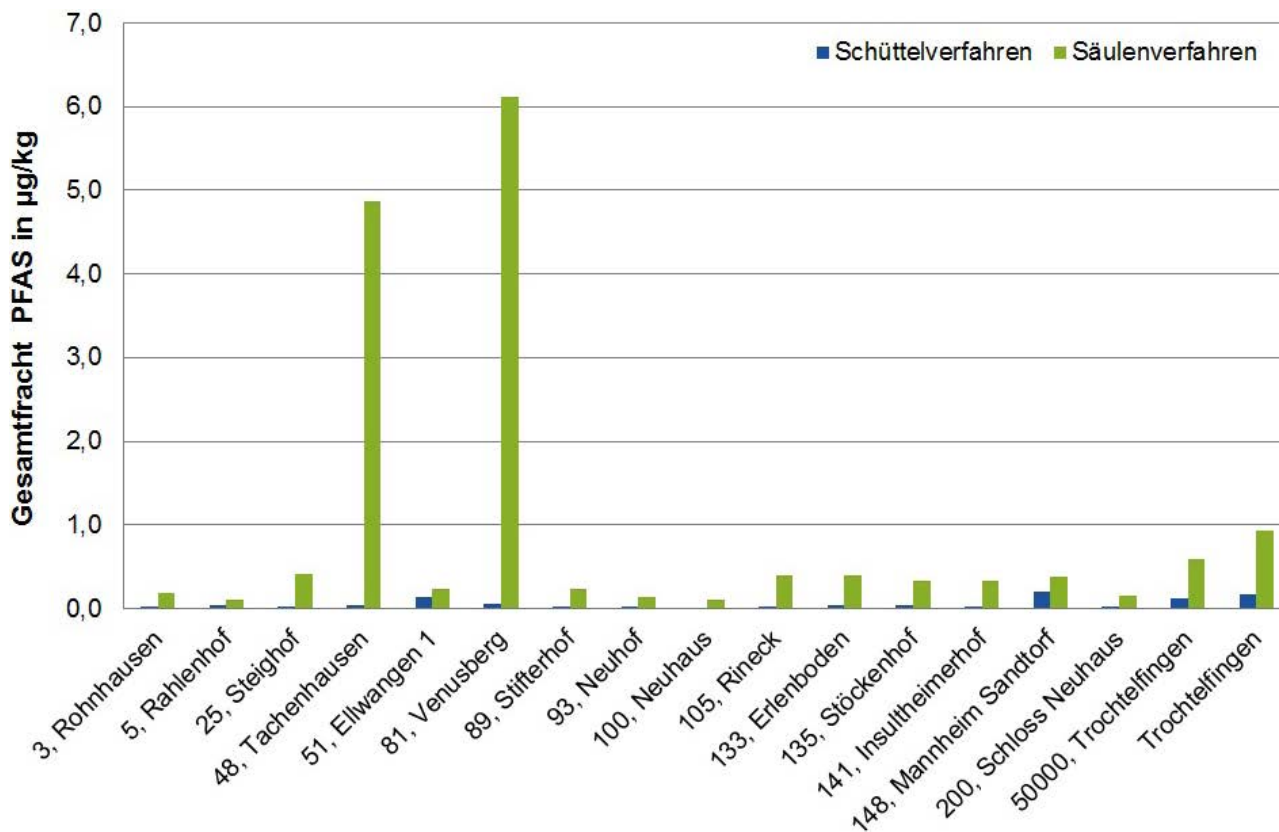


Abbildung 3.14: Freigesetzte Gesamtfrachten an PFAS aus Schüttel- und Säulenversuchen für Böden aus Hintergrundstandorten (Quelle: TZW)

Qualitativ ergibt sich bei Betrachtung der Frachten dieselbe Aussage wie bei Auswertung der Konzentrationen. Bei Böden aus Verdachtsflächen ergeben sich bei Schüttel- und Säulenverfahren vergleichbare Ergebnisse, während bei Böden aus Hintergrundstandorten das Säulenverfahren signifikant höhere Werte liefert. Die Betrachtung der Frachten liefert damit keine weiteren Erkenntnisse gegenüber der Betrachtung der Konzentrationen, weshalb auf eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse für die Frachten verzichtet wird.

Abschließend sind in Tabelle 3.7 und Tabelle 3.8 die Quotientensummen zusammengefasst, die sich aus den Konzentrationen der PFAS in den Eluaten nach dem in Kapitel 2.4 beschriebenen Verfahren errechnen lassen.

Tabelle 3.7: Quotientensumme in den Eluaten aus Schüttel- und Säulenversuchen für Böden aus Verdachtsflächen

Boden	Schüttelverfahren	Säulenverfahren
Bad 2A1, 0,6-2,0	316	288
Bad 2A1, 2,0-3,0	29	53
Sportplatz Oos, 0,6-2,0	254	106
Sportplatz Oos, 2,0-3,0	21	41
Sto 7, 30	116	120
Sto 7, 60	267	306
DuHü4, 30	191	237
DuHü4, 60	474	471
Vim5, 30	348	1850
Vim5, 60	424	395
Rhm10, 30	31	41
Rhm10, 60	70	68
Steinbach, 0–30 cm	86	222
Steinbach, 30–60 cm	115	119
Hügelsheim, 0–30 cm	120	284
Hügelsheim, 30–60 cm	315	352
Forchheim, 0–30 cm	1,9	2,0
Forchheim, 30–60 cm	1,7	1,7

Quelle: TZW

Tabelle 3.8: Quotientensumme in den Eluaten aus Schüttel- und Säulenversuchen für Böden aus Hintergrundstandorten

Probenkennung	DOC im Schütteluat (mg/L)	DOC im Säulenuat (mg/L)
3, Rohnhausen	0,060	0,43
5, Rahlenhof	0,051	0,12
25, Steighof	0,001	1,3
48, Tachenhausen	0,12	21
51, Ellwangen 1	0,19	0,45
81, Venusberg	0,23	16
89, Stifterhof	0,051	0,35
93, Neuhof	0,030	0,18
100, Neuhaus	0	0,034
105, Rineck	0,031	1,3
133, Erlenboden	0,061	1,2
135, Stöckenhof	0,061	1,1
141, Insultheimerhof	0,021	0,17
148, Mannheim Sandtorf	0,48	1,1
200, Schloss Neuhaus	0,030	0,17
50000, Trochtelfingen	0,46	1,5
Trochtelfingen	0,37	2,5

Quelle: TZW

Man erkennt, dass für die Böden aus den Verdachtsflächen (Tabelle 3.7) in den meisten Fällen die Quotientensummen, die mit den beiden Elutionsverfahren erhalten werden, sehr gut übereinstimmen. Allerdings gibt es auch für diesen Parameter Böden, für die Abweichungen auftreten, die einen Faktor 4 bis 5 betragen können. Für die Böden aus den Hintergrundstandorten (Tabelle 3.8) ergeben sich deutlich größere Differenzen in der Quotientensumme zwischen Säulen- und Schütteluat. Diese Differenzen wirken sich in vielen Fällen auch auf die Beurteilung aus. Während für alle Böden aus Hintergrundstandorten mit dem Schüttelverfahren Quotientensummen unter 1 resultieren, ergeben sich bei Anwendung des Säulenverfahrens für mehr als die Hälfte der Böden Quotientensummen von über 1.

## 4 Schlussfolgerungen

Ziel der Untersuchungen war es, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Schüttel- und Säulenverfahren hinsichtlich der Freisetzung von per- und polyfluorierten Verbindungen (PFAS) aus Bodenproben zu prüfen. Hierzu wurden Elutionsversuche mit insgesamt 18 Bodenproben aus dem Raum Mittelbaden, die bekanntermaßen mit PFAS belastet waren (Proben aus „Verdachtsflächen“), und 17 Bodenproben aus Baden-Württemberg, die nur eine geringe PFAS-Belastung aufwiesen (Proben aus „Hintergrundstandorten“), durchgeführt. Die Elution aller Proben erfolgte mit dem Schüttelverfahren nach DIN 19529 und dem Säulenelutionsverfahren nach DIN 19528. In den Eluaten wurden jeweils die Konzentrationen an 20 PFAS bestimmt.

Für die Böden aus den Verdachtsflächen ergab der Vergleich kein einheitliches Bild: Für eine Vielzahl an Boden-

proben lagen die Ergebnisse für beide Elutionsverfahren sehr nah beieinander, so dass bei Berücksichtigung der experimentellen und analytischen Unsicherheiten keine Unterschiede ausgemacht werden konnten (Abbildung 3.11). Es gab allerdings auch belastete Bodenproben, für die bei einem der beiden Elutionsverfahren signifikant höhere Konzentrationen erhalten wurden. Tendenziell waren dabei häufig die mittels Säulenverfahren ermittelten Werte höher, für einige Böden wurden jedoch auch mit dem Schüttelverfahren höhere PFAS-Gehalte erhalten. Eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Bodenbeschaffenheit, dem DOC-Gehalt im Eluat, der Höhe der PFAS-Belastung oder der Kettenlänge der PFAS konnte für die Böden aus den Verdachtsflächen nicht erkannt werden.

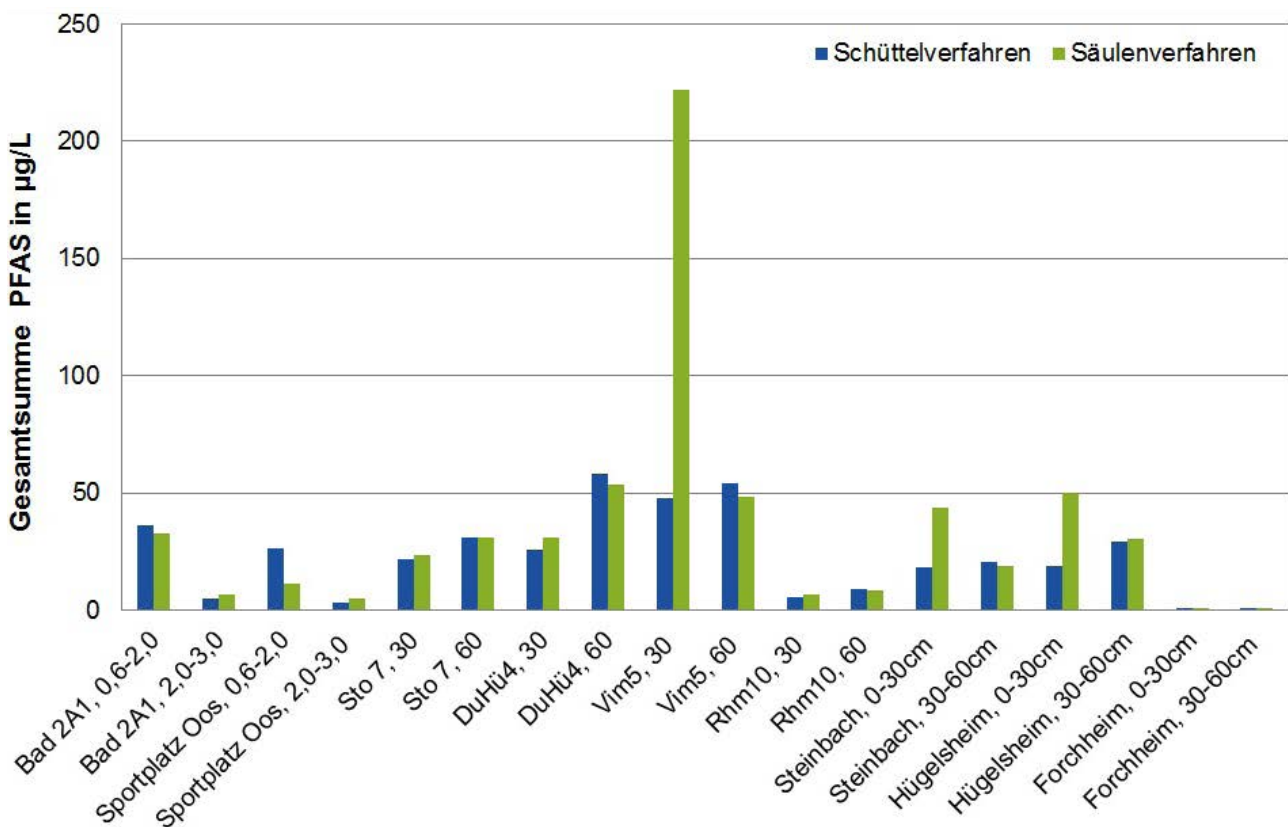


Abbildung 4.1: Summenkonzentrationen an PFAS in den Schüttel- und Säuleneluat für Böden aus Verdachtsflächen (Quelle: TZW)

Ein anderes Bild ergab sich für die Böden aus den Hintergrundstandorten. Nur für wenige Böden wurden beim Vergleich zwischen Schüttel- und Säulenverfahren ähnliche Konzentrationen an PFAS gefunden (Abbildung 3.12). Für die Mehrzahl der Böden ergaben sich mit dem Säulenverfahren signifikant höhere Konzentrationen. Teilweise wurden Unterschiede um mehr als einen Faktor 10 festgestellt, wobei die Unterschiede sowohl für kurz-kettige PFAS als auch für länger-kettige Vertreter auftreten. In keinem

Fall wurden durch das Schüttelverfahren höhere PFAS-Gehalte erhalten als durch das Säulenverfahren. Allerdings lässt sich auch für die Bodenproben aus den Hintergrundstandorten kein allgemeiner Zusammenhang zwischen den Ergebnissen bei den Elutionsverfahren bzw. den beobachteten Unterschieden zwischen Schüttel- und Säulenverfahren und Parametern wie der Bodenbeschaffenheit oder dem DOC-Gehalt im Eluat machen.

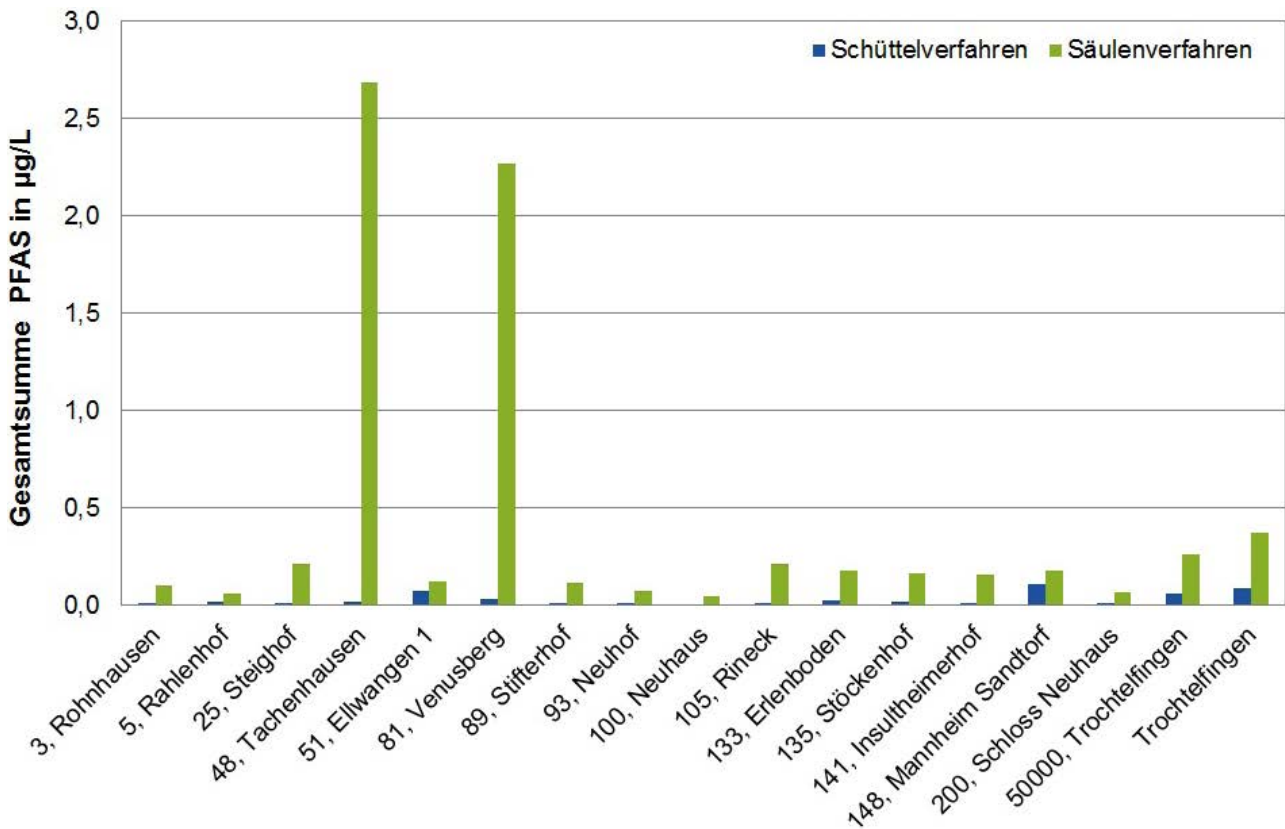


Abbildung 4.2: Summenkonzentrationen an PFAS in den Schüttel- und Säuleneluat für Böden aus Hintergrundstandorten (Quelle: TZW)

Vergleicht man die Ergebnisse für die Böden aus Verdachtsflächen und die Böden aus Hintergrundstandorten, so zeigt sich, dass die PFAS-Belastung eines Bodens allein nicht ausreicht, um die Ergebnisse für die Schüttel- und Säuleneluate vorherzusagen. Deutliche Unterschiede in den ermittelten Konzentrationen werden i. d. R. bei geringen Belastungen der Böden gefunden. Hier liefert das Säulenverfahren die höheren Konzentrationen und Frachten. In Einzelfällen können aber auch für gering belastete Böden vergleichbare Ergebnisse für Säulen- und Schüttel-eluat erhalten werden. Bei höher belasteten Böden sind alle Varianten möglich: Häufig werden mit beiden Elutionsverfahren vergleichbare Ergebnisse erhalten, allerdings gibt es auch höher belastete Böden, für die mit dem Säulenverfahren höhere Ergebnisse resultieren und

Böden, für die mit dem Schüttelverfahren höhere Werte erhalten werden.

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hat ebenfalls Versuche zum Vergleich der beiden Elutionsverfahren zur Bestimmung der Freisetzung von PFAS aus Bodenproben durchgeführt. Auf Grundlage ihrer Ergebnisse kommen sie zu den Schlussfolgerungen, dass bei beiden Elutionsverfahren mit zunehmender Kettenlänge der PFAS eine geringere Freisetzung stattfindet und dass die Freisetzung bei Schüttelversuchen meist niedriger ist als bei Säulenversuchen. Allerdings zeigt eine genauere Betrachtung ihrer Ergebnisse, dass auch bei den Versuchen der BAM für einige Böden mit beiden Elutionsverfahren vergleichbare PFAS-Freisetzungen erhalten wurden bzw.

dass in Einzelfällen aus den Schüttelversuchen höhere Freisetzungen resultierten. Damit bestätigen die Ergebnisse der BAM die hier abgeleiteten Aussagen, dass zwar tendenziell mit dem Säulenverfahren höhere PFAS-Freisetzungen erhalten werden, dass aber eine generelle Aussage, die für alle Bodenarten und für alle Belastungsprofile zutreffend ist, nicht getroffen werden kann.

Die Abhängigkeit der Freisetzung von der Kettenlänge der PFAS ist aufgrund der abnehmenden Polarität und damit der abnehmenden Wasserlöslichkeit der PFAS mit zunehmender Kettenlänge plausibel. Allerdings kann man aus diesem Zusammenhang noch nicht auf die Konzentrationen der PFAS in den Eluaten schließen. Die bei der Elution freigesetzten Mengen an PFAS hängen auch noch von den Gehalten im Boden ab und hier liegen häufig die länger-kettigen PFAS in höheren Konzentrationen vor. Die Überlagerung beider Effekte (höhere Gehalte an länger-kettigen PFAS im Boden und größere Freisetzung der kürzer-kettigen PFAS) führt dann dazu, dass in den Eluaten sowohl kürzerkettige als auch längerkettige PFAS in erhöhten Konzentrationen auftreten können, wie dies bei den vorliegenden Untersuchungen gefunden wurde.

Zusammenfassend lässt sich aus den vorliegenden Ergebnissen ableiten, dass allgemeine Aussagen zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Schüttel- und Säulenverfahren zur Ermittlung der Freisetzung von PFAS aus Bodenproben derzeit nicht getroffen werden können. Bei höher belasteten Proben liefern beide Verfahren häufig vergleichbare Ergebnisse, allerdings gibt es auch Böden, für die mit einem der beiden Verfahren signifikant höhere PFAS-Freisetzungen erhalten werden. Insbesondere für gering belastete Böden führt hingegen das Säulenverfahren zumeist zu höheren Gehalten im Eluat, was dazu führen kann, dass die Quotientensumme bei Anwendung des Säulenverfahrens über 1 und bei Anwendung des Schüttelverfahrens unter 1 liegt. Die bislang vorliegenden Untersuchungsergebnisse erlauben es nicht, Zusammenhänge zwischen der Beschaffenheit der Böden, dem Belastungsprofil und den Ergebnissen der beiden Elutionsverfahren abzuleiten. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um die grundlegenden Zusammenhänge besser zu verstehen.

# 5 Anhang

## Verdachtsflächen

Tabelle 5.1

TZW-Nr.:		2017020271	2017020290
Probenbezeichnung:	Bad 2A1, 0,6-2,0		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,29	0,29
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,94	0,95
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,96	1,0
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	1,1	1,1
Perfluoroctanoat (PFOA)	µg/L	5,7	5,5
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	1,7	2,0
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	2,1	1,6
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,036	0,005
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,016	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,002	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	0,002	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,041	0,035
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,18	0,18
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	23	20
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,39	0,075
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	7,7	8,4

Quelle: TZW



Abbildung 5.1: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.2

TZW-Nr.:		2017020272	2017020291
Probenbezeichnung:	Bad 2A1, 2,0-3,0		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,17	0,15
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,63	0,50
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,61	0,60
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,48	0,50
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	1,7	2,1
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	0,24	0,60
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	0,066	0,12
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,002	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,005	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,012	0,015
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,036	0,040
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,77	2,2
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,003	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	4,3	5,5

Quelle: TZW



Abbildung 5.2: (Quelle: TZW)



Tabelle 5.3

TZW-Nr.:		2017020273	2017020292
Probenbezeichnung:	Sportplatz Oos, 0,6-2,0		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,083	0,11
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,22	0,26
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,28	0,32
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,35	0,37
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	2,4	2,0
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	1,8	1,2
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	0,86	0,18
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,021	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,014	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,008	0,008
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,15	0,17
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	20	6,6
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,19	0,11
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	4,5	4,5

Quelle: TZW



Abbildung 5.3: (Quelle: TZW)



Tabelle 5.4

TZW-Nr.:		2017020274	2017020293
Probenbezeichnung:	Sportplatz Oos, 2,0-3,0		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,072	0,095
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,20	0,20
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,23	0,25
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,27	0,33
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	1,4	2,5
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	0,19	0,44
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	0,041	0,095
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,004	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,004	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,006	0,010
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,052	0,095
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,40	0,85
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,025	0,050
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	1,6	3,1

Quelle: TZW



Abbildung 5.4: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.5

TZW-Nr.:		2017020275	2017020294
Probenbezeichnung:	Sto 7, 30		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,87	0,74
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	1,6	1,3
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	1,7	1,4
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	1,3	1,2
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	6,8	5,5
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	2,8	3,8
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	5,9	9,4
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,24	0,18
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,21	0,026
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,071	0,17
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	18	21

Quelle: TZW



Abbildung 5.5: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.6

TZW-Nr.:		2017020276	2017020295
Probenbezeichnung:	Sto 7, 60		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,55	0,57
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	1,0	0,84
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	1,6	1,4
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	1,5	1,5
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	12	12
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	8,7	11
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	5,3	3,4
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,13	0,007
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,070	0,002
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,001	0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,002	0,002
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,18	0,23
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,003	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	42	27

Quelle: TZW



Abbildung 5.6: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.7

TZW-Nr.:		2017020277	2017020296
Probenbezeichnung:	DuHü4, 30		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,35	0,31
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,76	0,56
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,74	0,59
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,95	0,73
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	7,3	5,5
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	2,0	2,5
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	4,5	6,1
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,17	0,075
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,16	0,012
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,016	0,017
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,043	0,050
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	8,4	14
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,48	0,29
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	15	16

Quelle: TZW



Abbildung 5.7: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.8

TZW-Nr.:		2017020278	2017020297
Probenbezeichnung:	DuHü4, 60		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,27	0,29
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,54	0,54
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,87	0,94
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	1,8	2,0
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	17	11
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	4,4	4,2
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	9,0	5,5
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,16	0,012
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,082	0,002
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,031	0,036
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,076	0,078
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	23	29
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,73	0,23
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	0,005	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	23	20

Quelle: TZW



Abbildung 5.8: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.9

TZW-Nr.:		2017020279	2017020298
Probenbezeichnung:	Vim5, 30		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	1,0	1,5
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	2,8	4,2
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	1,7	2,5
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	1,7	2,4
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	5,7	10
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	1,8	6,0
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	4,3	18
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,18	0,15
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,13	0,020
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,005	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	0,005	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,061	0,070
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,18	0,32
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	26	165
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	2,0	12
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	13	14

Quelle: TZW



Abbildung 5.9: (Quelle: TZW)



Tabelle 5.10

TZW-Nr.:		2017020280	2017020299
Probenbezeichnung:	Vim5, 60		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,96	0,9
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	2,8	2,3
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	2,2	2,0
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	2,1	1,9
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	8,6	8,5
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	2,8	3,5
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	3,8	2,3
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,072	0,010
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,018	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,005	0,005
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	0,006	0,005
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,085	0,085
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,19	0,25
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	29	25
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	1,4	1,5
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	10	11

Quelle: TZW



Abbildung 5.10: (Quelle: TZW)



Tabelle 5.11

TZW-Nr.:		2017020281	2017020300
Probenbezeichnung:	Rhm10, 30		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,30	0,34
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,54	0,59
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,49	0,57
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,40	0,48
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	2,0	2,2
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	0,60	1,1
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	1,0	1,4
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,022	0,004
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,019	0,003
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,078	0,097
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,008	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	11	17

Quelle: TZW



Abbildung 5.11: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.12

TZW-Nr.:		2017020282	2017020301
Probenbezeichnung:	Rhm10, 60		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,29	0,29
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,66	0,55
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,65	0,61
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,58	0,54
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	5,4	5,0
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	0,90	0,99
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	0,46	0,19
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,005	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,004	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,002	0,002
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,067	0,12
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,006	0,008
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	9,2	8,7

Quelle: TZW



Abbildung 5.12: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.13

TZW-Nr.:		2017020283	2017020302
Probenbezeichnung:	Steinbach, 0–30cm		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,93	1,6
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	1,9	2,5
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	1,7	2,1
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	1,1	1,5
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	4,5	6,5
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	1,7	4,0
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	4,6	16
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,22	0,22
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,096	0,030
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,005	0,010
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,007	0,015
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	1,2	9,0
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,008	0,070
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	13	16

Quelle: TZW



Abbildung 5.13: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.14

TZW-Nr.:		2017020284	2017020303
Probenbezeichnung:	Steinbach, 30–60cm		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,97	1,0
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	2,2	1,9
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	1,8	1,7
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	1,0	1,0
Perfluoroctanoat (PFOA)	µg/L	4,3	4,7
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	3,0	2,8
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	5,2	3,3
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,098	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,020	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,004	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,011	0,010
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	2,2	2,5
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,008	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	80	8,7

Quelle: TZW



Abbildung 5.14: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.15

TZW-Nr.:		2017020285	2017020304
Probenbezeichnung:	Hügelsheim, 0–30cm		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,32	0,28
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,50	0,36
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,34	0,28
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,37	0,36
Perfluoroctanoat (PFOA)	µg/L	3,7	3,9
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	2,0	3,3
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	6,0	22
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,26	0,18
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,24	0,061
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,002	0,002
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,015	0,017
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	5,0	19
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,17	0,15
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	12	14

Quelle: TZW



Abbildung 5.15: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.16

TZW-Nr.:		2017020286	2017020305
Probenbezeichnung:	Hügelsheim, 30–60cm		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,32	0,28
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,50	0,36
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,34	0,28
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,37	0,36
Perfluoroctanoat (PFOA)	µg/L	3,7	3,9
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	2,0	3,3
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	6,0	22
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,26	0,18
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,24	0,061
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,002	0,002
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	0,015	0,017
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	5,0	19
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,17	0,15
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	41	17

Quelle: TZW



Abbildung 5.16: (Quelle: TZW)



Tabelle 5.17

TZW-Nr.:		2017020287	2017020306
Probenbezeichnung:	Forchheim, 0–30cm		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,051	0,051
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,035	0,034
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,037	0,036
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,026	0,048
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	0,10	0,11
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	0,017	0,021
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	0,027	0,007
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	0,002	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,004	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,065	0,058
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	0,008	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	12	10

Quelle: TZW



Abbildung 5.17: (Quelle: TZW)



Tabelle 5.18

TZW-Nr.:		2017020288	2017020307
Probenbezeichnung:	Forchheim, 30-60cm		
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,024	0,028
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,017	0,019
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,035	0,040
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,027	0,031
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	0,071	0,083
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	0,015	0,017
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	0,012	0,015
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,002	0,002
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,003	0,003
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,068	0,059
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	43	22

Quelle: TZW



Abbildung 5.18: (Quelle: TZW)

## Hintergrundstandorte

Tabelle 5.19

TZW-Nr.:		2018011749	2018015617
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	3, Rohnhausen	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,002	0,028
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,005
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	0,008
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	0,011
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	0,002	0,020
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	0,006
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,004	0,006
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	27	15

Quelle: TZW

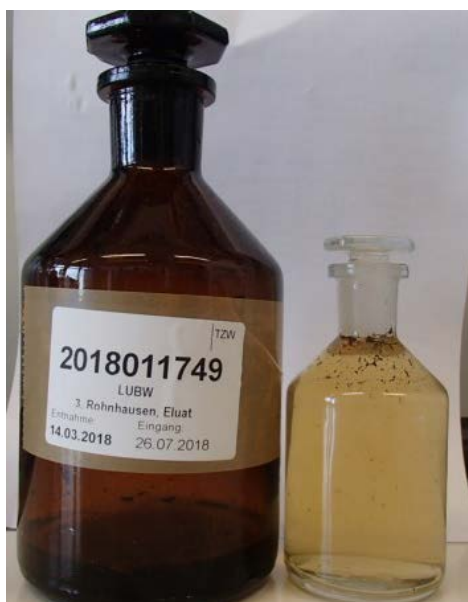


Abbildung 5.19a: (Quelle: TZW)

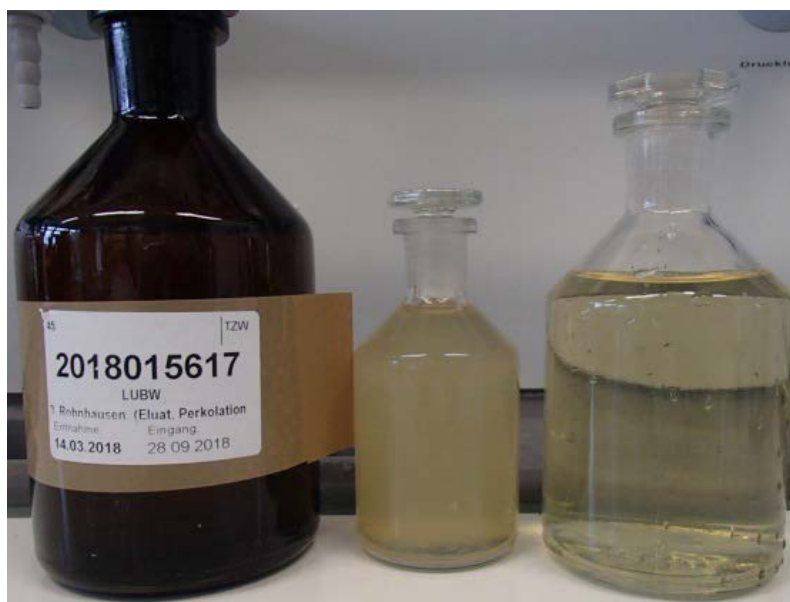


Abbildung 5.19b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.20

TZW-Nr.:		2018011750	2018015618
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	5, Rahlenhof	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,004	0,017
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,006
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	0,006
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	0,003
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	0,001	0,004
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	0,004	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,004	0,005
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,001	0,002
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,003	0,004
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	7,4	6,1

Quelle: TZW

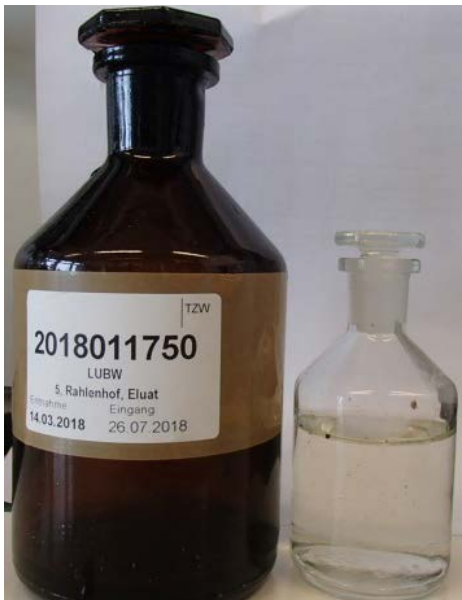


Abbildung 5.20a: (Quelle: TZW)

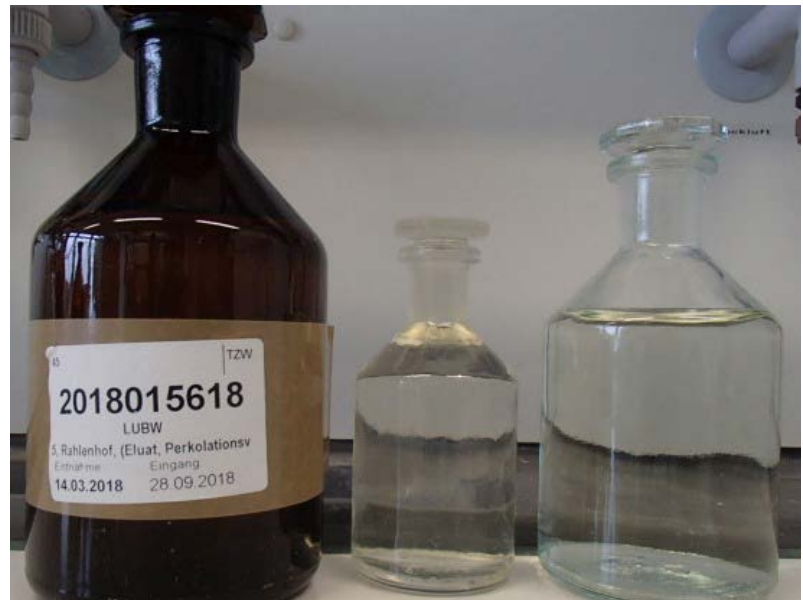


Abbildung 5.20b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.21

TZW-Nr.:		2018011751	2018015619
Nutzung: Grünland	Probenbezeichnung:	25, Steighof	
Methode		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,002	0,030
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,015
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	0,025
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	0,030
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	0,075
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	0,020
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,002	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	< 0,001	0,020
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	14	17

Quelle: TZW

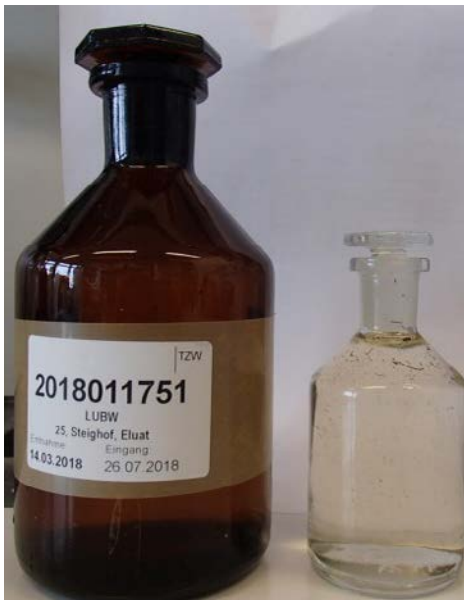


Abbildung 5.21a: (Quelle: TZW)



Abbildung 5.21b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.22

TZW-Nr.:		2018011752	2018015620
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	48, Tachenhausen	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,003	0,060
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,035
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	0,13
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,002	0,12
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	0,003	1,3
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	0,070
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	0,30
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,002	0,010
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,001	0,010
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	0,005
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,008	0,65
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	7,5	12

Quelle: TZW

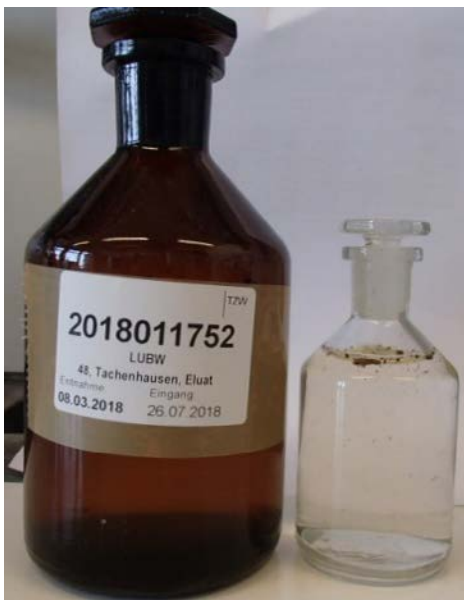


Abbildung 5.22a: (Quelle: TZW)

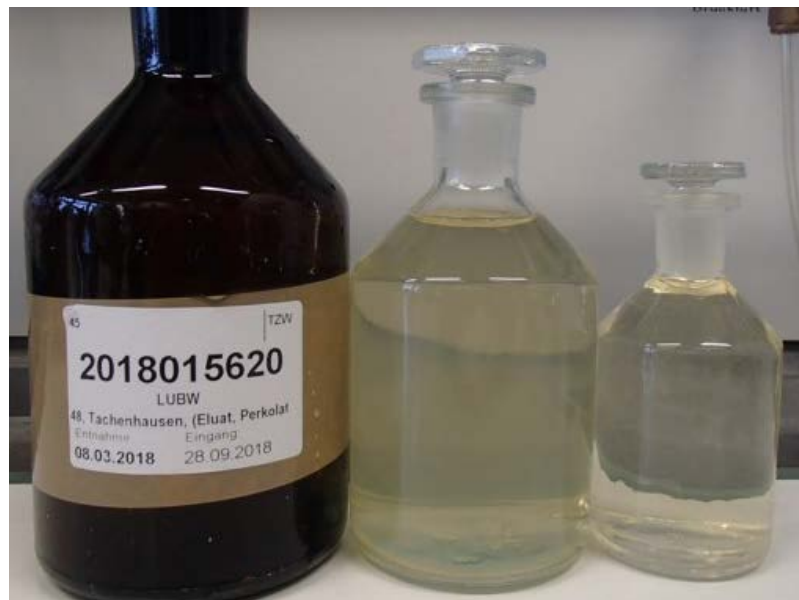


Abbildung 5.22b: (Quelle: TZW)



Tabelle 5.23

TZW-Nr.:		2018011753	2018015621
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	51, Ellwangen 1	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,029	0,033
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,005	0,008
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,008	0,011
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,008	0,012
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	0,011	0,024
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	0,001	0,003
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,003	0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,001	0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,005	0,007
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	13	14

Quelle: TZW

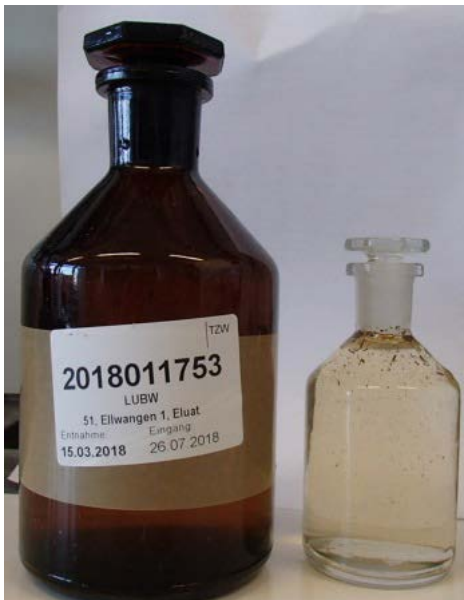


Abbildung 5.23a: (Quelle: TZW)



Abbildung 5.23b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.24

TZW-Nr.:		2018011754	2018015622
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	81, Venusberg	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,001	0,16
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,12
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	0,21
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	0,22
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	0,005	1,0
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	0,095
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	0,001	0,035
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,003	0,010
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,004	0,030
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	0,015
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,014	0,39
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	12	20

Quelle: TZW

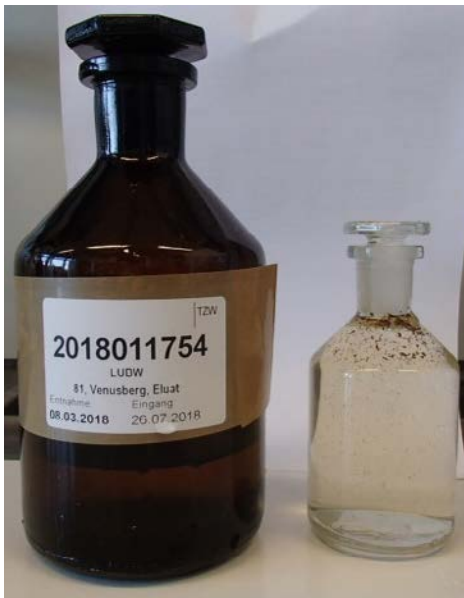


Abbildung 5.24a: (Quelle: TZW)



Abbildung 5.24b: (Quelle: TZW)



Tabelle 5.25

TZW-Nr.:		2018011755	2018015623
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	89, Stifterhof	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,003	0,042
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,007
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	0,010
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	0,009
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	0,015
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	0,002
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,002	0,003
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,001	0,002
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,004	0,009
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	10	11

Quelle: TZW

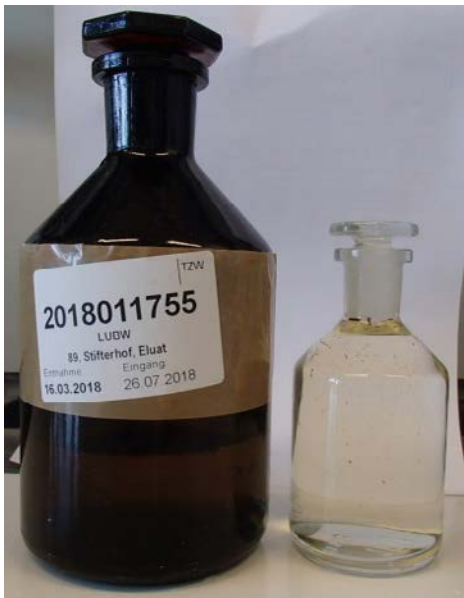


Abbildung 5.25a: (Quelle: TZW)



Abbildung 5.25b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.26

TZW-Nr.:		2018011756	2018015624
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	93, Neuhof	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,002	0,028
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,006
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	0,006
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	0,002
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	0,004
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,001	0,002
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	0,002
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,003	0,009
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	8,5	8,4

Quelle: TZW

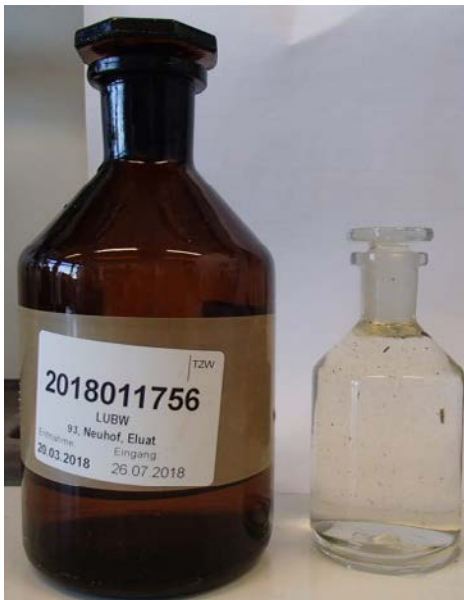


Abbildung 5.26a: (Quelle: TZW)



Abbildung 5.26b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.27

TZW-Nr.:		2018011757	2018015625
Nutzung: Grünland	Probenbezeichnung:	100, Neuhaus	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkulationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	< 0,001	<b>0,021</b>
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	<b>0,005</b>
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	<b>0,004</b>
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	<b>0,002</b>
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	<b>0,003</b>
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	<b>18</b>	<b>17</b>

Quelle: TZW

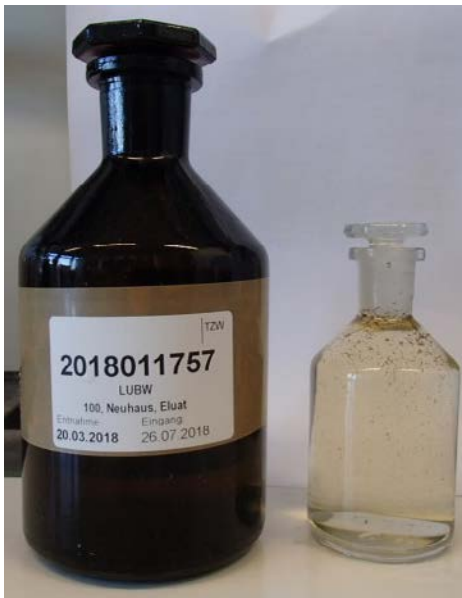


Abbildung 5.27a: (Quelle: TZW)



Abbildung 5.27b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.28

TZW-Nr.:		2018011758	2018015626
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	105, Rineck	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,003	0,040
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,010
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	0,020
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	0,020
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	0,060
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	0,015
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,002	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,003	0,045
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	6	5,2

Quelle: TZW

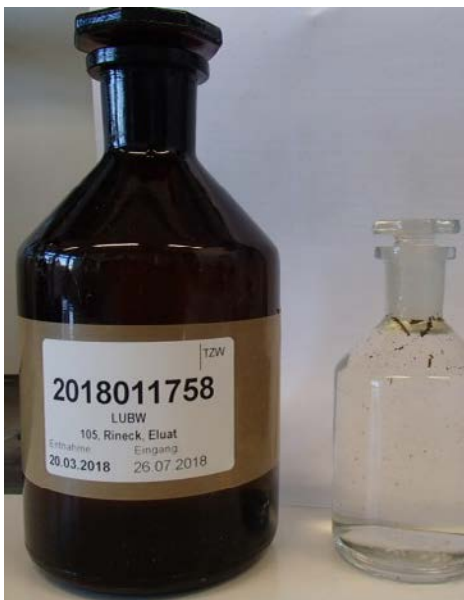


Abbildung 5.28a: (Quelle: TZW)

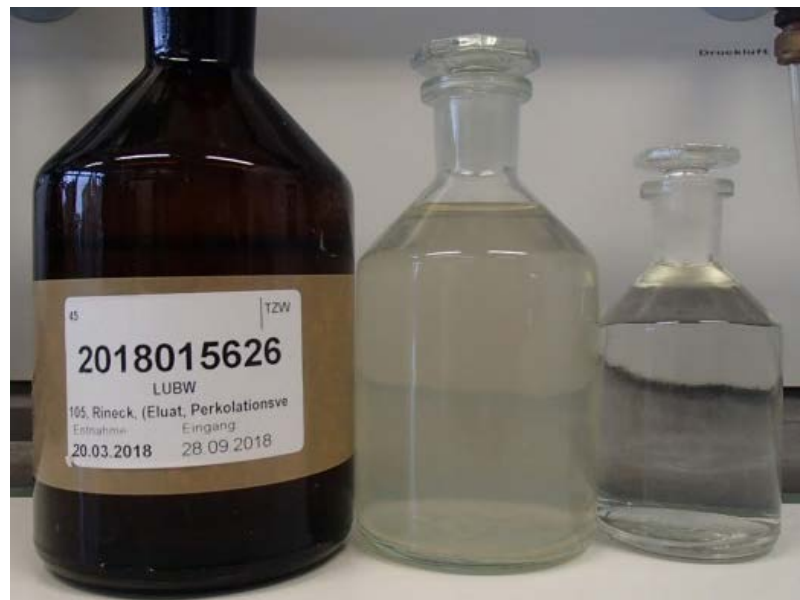


Abbildung 5.28b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.29

TZW-Nr.:		2018011759	2018015627
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	133, Erlenboden	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	< 0,001	<b>0,021</b>
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	<b>0,005</b>
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	<b>0,004</b>
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	<b>0,002</b>
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	<b>0,003</b>
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	<b>18</b>	<b>17</b>

Quelle: TZW

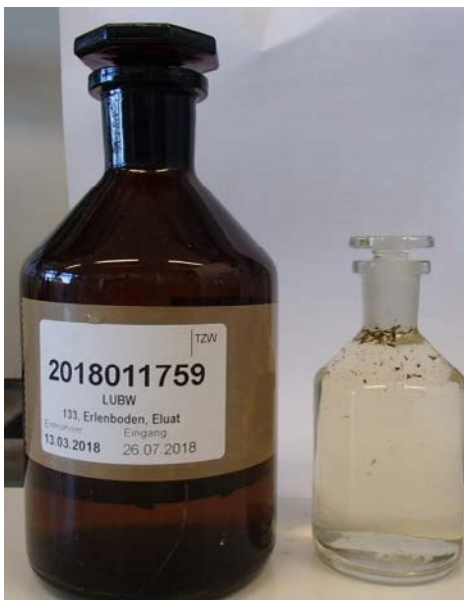


Abbildung 5.29a: (Quelle: TZW)

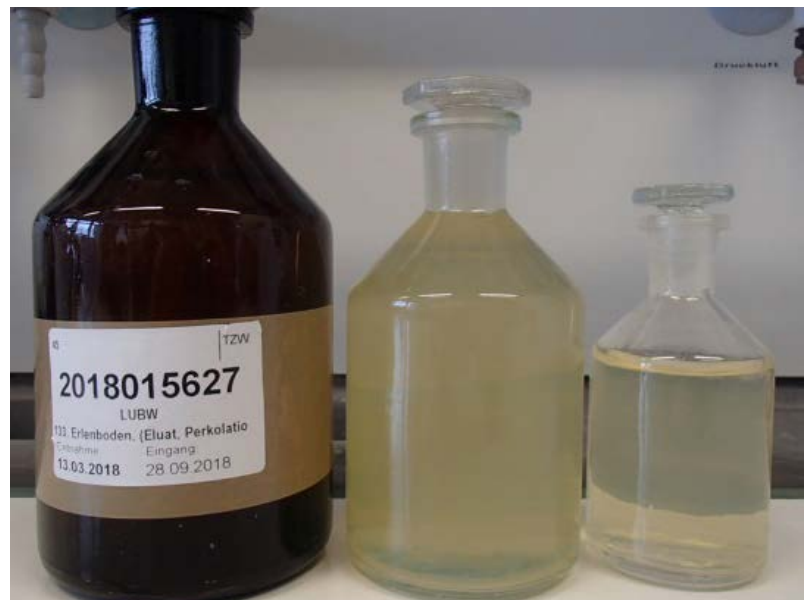


Abbildung 5.29b: (Quelle: TZW)



Tabelle 5.30

TZW-Nr.:		2018011760	2018015628
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	135, Stöckenhof	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,006	0,020
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,015
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,002	0,020
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,002	0,015
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	0,003	0,040
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	0,020
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,001	< 0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,003	0,035
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	8,2	7,4

Quelle: TZW

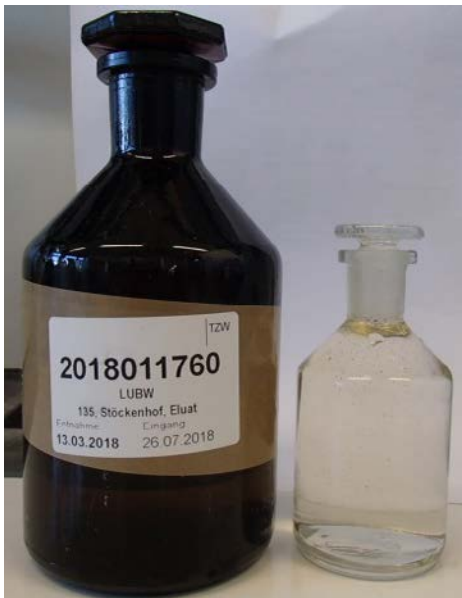


Abbildung 5.30a: (Quelle: TZW)

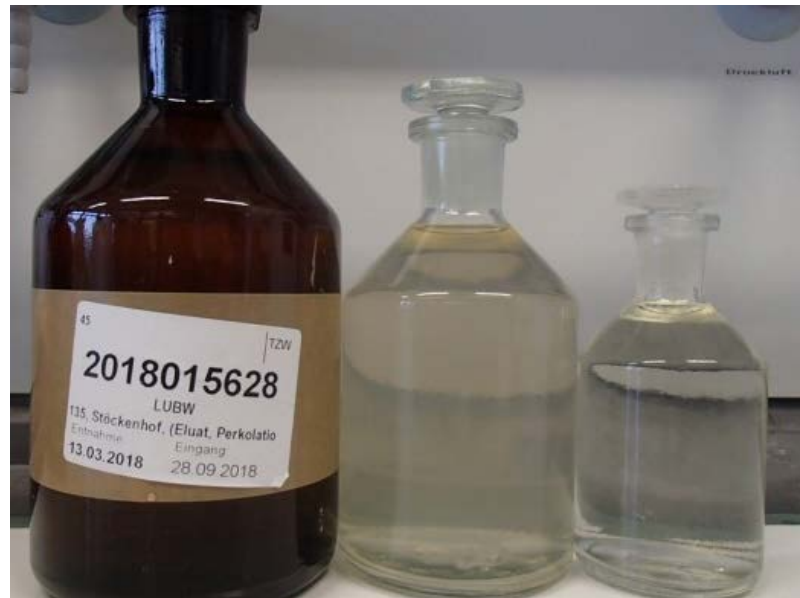


Abbildung 5.30b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.31

TZW-Nr.:		2018011761	2018015629
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	141, Insultheimerhof	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,003	0,059
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,038
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	0,012
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	0,005
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	0,007
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	0,001
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,002	0,002
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,002	0,005
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	11	11

Quelle: TZW

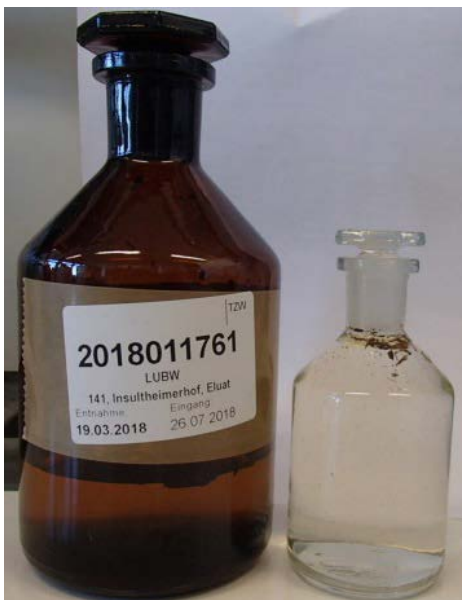


Abbildung 5.31a: (Quelle: TZW)

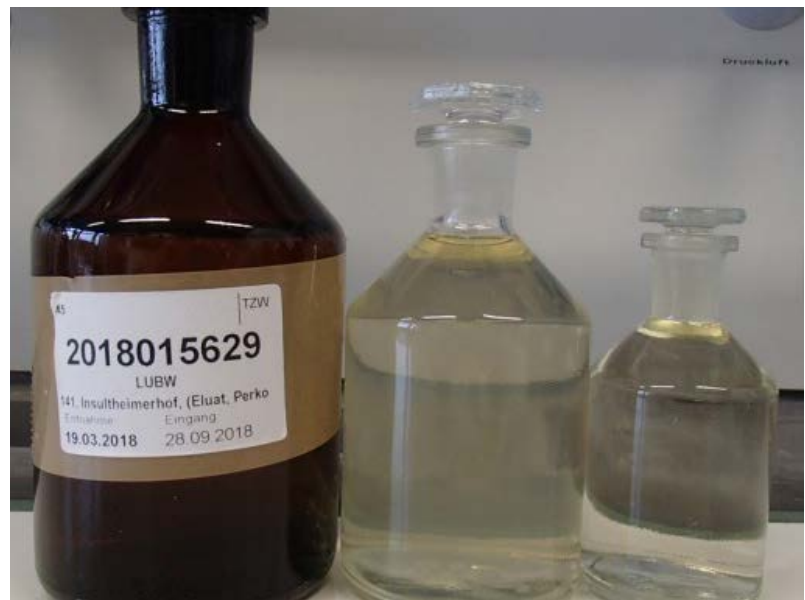


Abbildung 5.31b: (Quelle: TZW)



Tabelle 5.32

TZW-Nr.:		2018011762	2018015630
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	148, Mannheim Sandtorf	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,023	0,024
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,017	0,023
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,009	0,012
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,010	0,012
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	0,024	0,056
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	0,004	0,011
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	0,001	0,004
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	< 0,001	0,001
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,017	0,030
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	20	12

Quelle: TZW

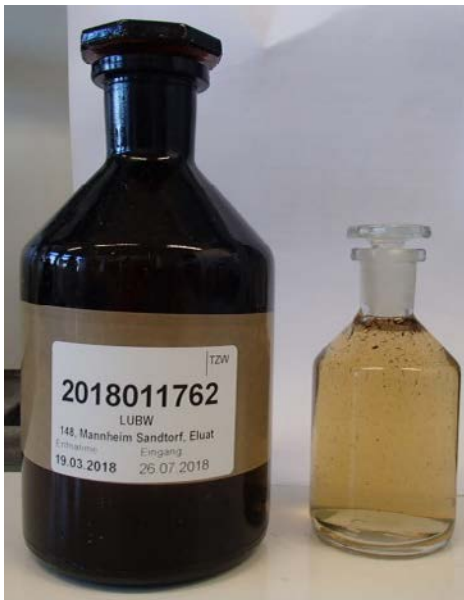


Abbildung 5.32a: (Quelle: TZW)



Abbildung 5.32b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.33

TZW-Nr.:		2018011763	2018015631
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	200, Schloss Neuhaus	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,002	0,027
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	0,004
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	0,006
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	< 0,001	0,003
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	0,007
Perfluoronanoat (PFNA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,001	0,002
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	< 0,001	0,002
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,003	0,006
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	8	6,8

Quelle: TZW

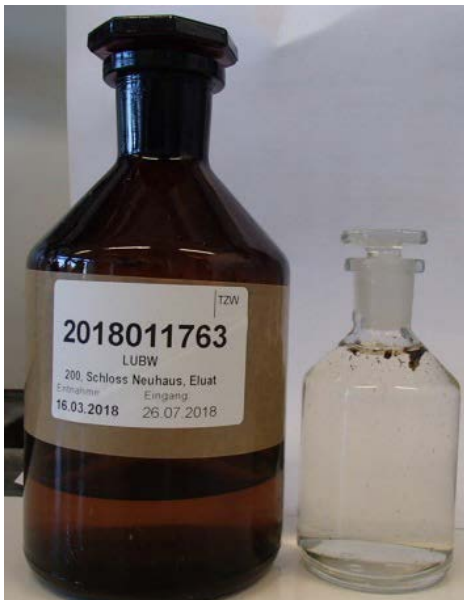


Abbildung 5.33a: (Quelle: TZW)

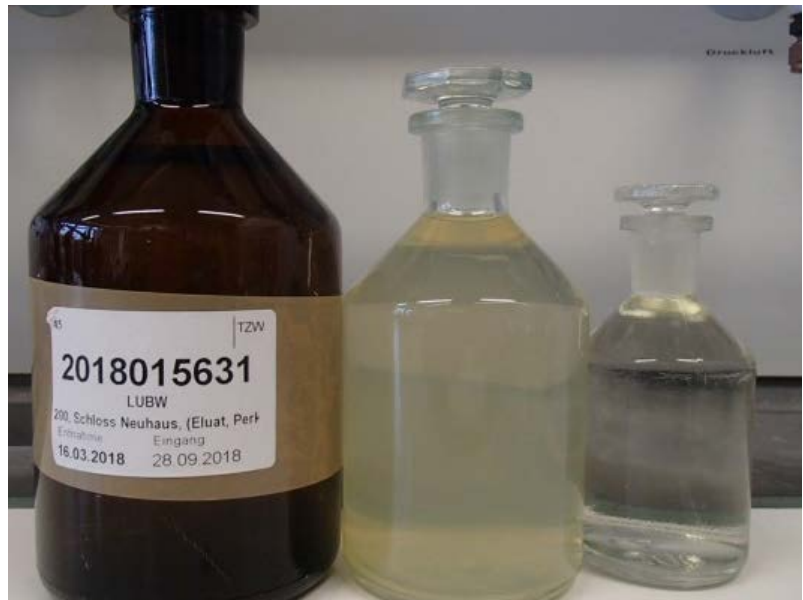


Abbildung 5.33b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.34

TZW-Nr.:		2018011764	2018015632
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	50000, Trochtelfingen	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	0,002	0,034
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	0,001	0,023
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	0,004	0,014
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	0,004	0,011
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	0,017	0,052
Perfluorononanoat (PFNA)	µg/L	0,002	0,004
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	< 0,001	0,001
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	0,003	0,002
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	0,004	0,004
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	0,022	0,040
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	14	14

Quelle: TZW

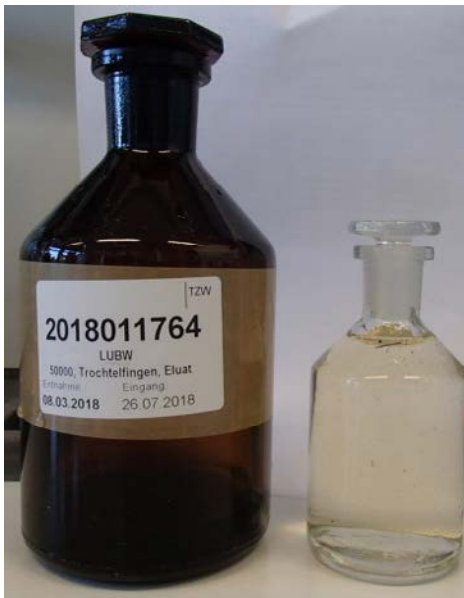


Abbildung 5.34a: (Quelle: TZW)

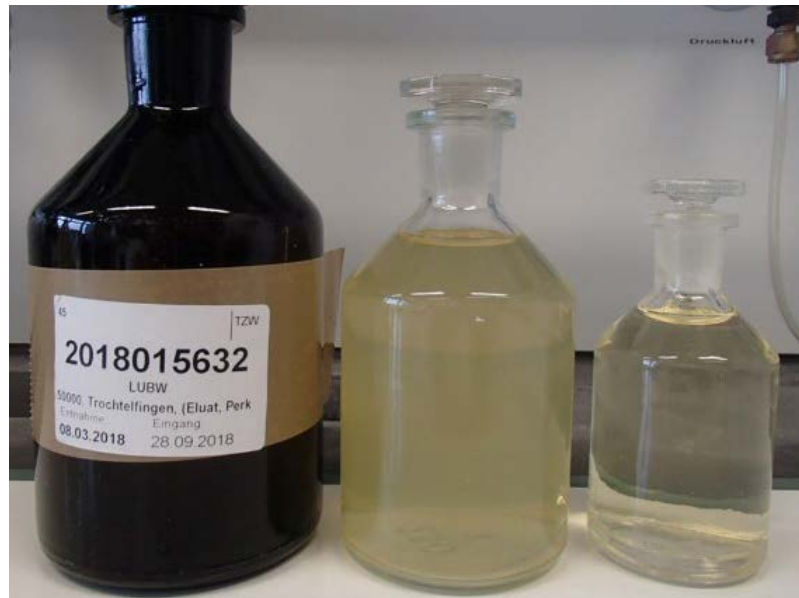


Abbildung 5.34b: (Quelle: TZW)

Tabelle 5.35

TZW-Nr.:		2017020270	2017020289
Nutzung: Acker	Probenbezeichnung:	Trochselfingen	
Methode:		Schüttelverfahren	Perkolationsverfahren
Perfluorbutanoat (PFBA)	µg/L	< 0,001	<b>0,035</b>
Perfluorpentanoat (PFPA)	µg/L	< 0,001	<b>0,022</b>
Perfluorhexanoat (PFHxA)	µg/L	< 0,001	<b>0,032</b>
Perfluorheptanoat (PFHpA)	µg/L	<b>0,001</b>	<b>0,020</b>
Perfluoroctanoat (PFDA)	µg/L	<b>0,009</b>	<b>0,15</b>
Perfluornonanoat (PFNA)	µg/L	<b>0,002</b>	<b>0,011</b>
Perfluordecanoat (PFDA)	µg/L	<b>0,015</b>	<b>0,003</b>
Perfluorundecanoat (PFUnA)	µg/L	<b>0,013</b>	< 0,001
Perfluordodecanoat (PFDoA)	µg/L	<b>0,016</b>	< 0,001
Perfluorbutansulfonat (PFBS)	µg/L	<b>0,003</b>	<b>0,006</b>
Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	µg/L	< 0,001	<b>0,001</b>
Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	µg/L	<b>0,003</b>	<b>0,011</b>
Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	µg/L	< 0,001	<b>0,003</b>
Perfluoroctansulfonat (PFOS)	µg/L	<b>0,022</b>	<b>0,070</b>
Perfluordecansulfonat (PFDS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	µg/L	< 0,001	<b>0,008</b>
7H-Dodecafluorheptanoat (HPFHpA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA)	µg/L	< 0,001	< 0,001
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (H4PFOS)	µg/L	< 0,001	< 0,001
DOC	mg/L	<b>10</b>	<b>27</b>

Quelle: TZW



Abbildung 5.35: (Quelle: TZW)



