

PFAS in Abfallströmen

Literaturstudie im Auftrag des VBSA, Stand Oktober 2024



Ansprechpartner

Dr. Karina Urmann

Fachleiterin Produktkonformität und Nachhaltigkeit

Econetta AG

T 044 732 92 81

Ifangstrasse 11

M 079 855 25 22

8952 Schlieren ZH

Karina.urmann@econetta.com

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Gesetzliche Grundlagen zu PFAS	4
2.1	Stoffverbote und -beschränkungen in der Schweiz	4
2.2	PFAS in der Abfallgesetzgebung	4
2.3	Politische Vorstösse	4
2.3.1	Vorstösse auf Bundesebene	4
2.3.2	Vorstösse auf kantonaler Ebene	6
2.4	Entwicklungen in der EU	7
3	Stoffströme PFAS im Abfall	8
3.1	Literaturdaten (EU)	8
3.2	Abschätzung der Situation in der Schweiz	10
4	PFAS in Abfallbehandlungsanlagen	11
4.1	Deponien	11
4.2	Kehrichtverbrennung	11
4.2.1	Verfahrensbeschreibung	11
4.2.2	PFAS im zugeführten Abfall	12
4.2.3	PFAS im Output	13
4.2.4	Handlungsbedarf	16
4.3	Sonderabfallverbrennung	17
4.3.1	Verfahrensbeschreibung	17
4.3.2	PFAS im zugeführten Abfall	17
4.3.3	PFAS im Output	18
4.3.4	Handlungsbedarf	19
4.4	Sortierung und Recycling	19
4.4.1	Verfahrensbeschreibung	19
4.4.2	Papier und Karton	19
4.4.2.1	PFAS im zugeführten Abfall	19
4.4.2.2	PFAS im Output	20
4.4.3	Kunststoff allgemein	21
4.4.3.1	PFAS im zugeführten Abfall	21
4.4.3.2	PFAS im Output	21
4.4.4	Batterien	22
4.4.4.1	PFAS im zugeführten Abfall	22
4.4.4.2	PFAS im Output	23



4.4.5	Bauabfälle	23
4.4.5.1	PFAS im zugeführten Abfall	23
4.4.5.2	PFAS im Output	23
4.4.6	Handlungsbedarf	24
4.5	Kompostierung und Vergärung	24
4.5.1	Verfahrensbeschreibung	24
4.5.2	PFAS im zugeführten Abfall	25
4.5.3	PFAS im Output	25
4.5.4	Handlungsbedarf	27
5	Fazit	27
	Literatur	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Kantonal veröffentlichte Abfallgrenzwerte für PFAS-belastetes Aushubmaterial. Die Abfallgrenzwerte gelten für die ungewichtete Summe 9 PFAS (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS).	6
Tabelle 2	PFAS-Mengen in Abfallströmen aus relevanten Einsatzgebieten und der prognostizierte Trend	10
Tabelle 3	Daten zur Abfallstatistik in der Schweiz (ohne Deponierung)	11
Tabelle 4	Anlieferung von PFAS-haltigen Abfällen an Schweizer KVA, grobe Abschätzung	13
Tabelle 5	PFAS-Konzentrationen in den Stoffströmen einer KVA aus der Literatur, jeweils Summenkonzentrationen ohne Gewichtung nach Toxizität.	15
Tabelle 6	PFAS-Materialflüsse im Altpapier im Jahr 2020 aus Deutschland [9] und der Schweiz [11].	20
Tabelle 7	Verwertungswege von Kunststoffabfällen in Deutschland [24] und der Schweiz [44].	22
Tabelle 8	Literaturdaten der PFAS-Gehalte in Kompost und kompostähnlichen Produkten, sowie im Gemisch aus Kompost und Verpackungsmaterial.	26
Tabelle 9	Monitoring-Programm während des Kompostiervorgangs in Australien [17].	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Abgeschätzte PFAS-Emissionen der KVA mit und ohne Klärschlammverbrennung [3]	14
Abbildung 2	Massenflussdiagramm 2023 für alle Schweizer KVA, aus [31]	16

Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war die Auswirkungen der PFAS in Abfällen auf den Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA) und deren Mitglieder aufzuzeigen. Dazu wurden die aktuellen Erkenntnisse rund um PFAS und deren Vorkommen in den einzelnen Abfallaufkommen und Abfallflüssen im Sinne einer Bestandesaufnahme zusammengefasst und Wissenslücken identifiziert. Hierzu wurde ausgewählte relevante Literatur mit Stand Oktober 2024 ausgewertet. Im Themengebiet der PFAS findet eine rasche Entwicklung statt, so dass in kurzer Frist mit neuen Informationen zu rechnen ist.

Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) sind langlebige Schadstoffe, die aufgrund ihrer wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften in vielen Produkten verwendet werden. Chemisch gesehen bestehen die organischen Verbindungen aus Kohlenstoffketten verschiedener Länge, bei denen die Wasserstoffatome vollständig (perfluoriert) oder teilweise (polyfluoriert) durch Fluoratomer ersetzt sind. Neben diesen Einzelsubstanzen, werden auch polymere PFAS verwendet, die aus per- oder polyfluorierten Monomereinheiten bestehen. Beispiele hierfür sind PTFE (Teflon[®], Gore-Tex[®]) und PVDF. PFAS sind im Rahmen der Abfallentsorgung und -verwertung relevant, da sie nicht nur in der Umwelt persistent sind, sondern auch nur bei sehr hohen Temperaturen zerstört werden können. Dadurch können sie z.B. beim Recycling von Abfällen im Stoffkreislauf verbleiben oder Restmengen nach der Verbrennung in die Umwelt gelangen.

Problematik der Analytik und fehlender Messstandards

Die Messung von PFAS ist komplex, da PFAS eine sehr grosse und heterogene Gruppe chemischer Verbindungen darstellen. Nur wenige analytische Methoden sind etabliert und decken meist nur ausgewählte PFAS-Verbindungen ab. In der Praxis werden auch Summenparameter wie «Total Organic Fluorine» (TOF) und «Extractable Organic Fluorine» (EOF) verwendet, die jedoch die PFAS-Belastung ungenau darstellen, da auch nicht-PFAS-Fluorverbindungen erfasst werden. Diese methodischen Einschränkungen führen zu Unsicherheiten bei der Interpretation von Messergebnissen und erschweren eine verlässliche Abschätzung der PFAS-Belastung. Derzeit ist nur in wenigen Bereichen ein verbindliches Messprogramm definiert (z.B. Summe von 9 PFAS-Einzelstoffen im Altlastenrecht), zukünftige Grenzwerte könnten erweiterte Messprogramme nötig machen.

PFAS in den wichtigsten Abfall- und Recyclingströmen

Zu den mengenmässig grössten, PFAS-relevanten Abfallströmen gehören Textilien (inkl. Polster, Leder, Kleidung und Teppiche), Lebensmittelverpackungen, Metallbeschichtungen, Kältemittel, Hydrauliköle, medizinische Anwendungen, elektronische Geräte und Baustoffe. Die unterschiedlichen Abfallströme verteilen sich auf verschiedene Behandlungswege: KVA/SAVA (Haus- und Industrieabfälle, Shreddergut, Klärschlamm und Sonderabfall), Recycling (Textilien, Papier, Batterien und Bauschutt) und Kompostierung/Vergärung (biogene Abfälle).

Für die Abfallströme, die dem Recycling zugeführt werden, verbleiben die PFAS in den meisten Fällen langfristig in den Materialkreisläufen (z.B. in Textilien, in Altpapier oder in Rückbaumaterialien). Kompost kann durch Lebensmittelverpackungen (z.B. aus der kommunalen Grüngutsammlung) verunreinigt sein, was als Hauptquelle für PFAS in Kompost identifiziert wurde. Über das Ausbringen des Komposts auf Acker- und Gartenflächen können diese PFAS in Böden gelangen.

Eine Abschätzung der PFAS-Fracht konnte für die Schweiz derzeit aufgrund der begrenzten Daten punktuell für einzelne Abfallströme bzw. Behandlungswege durchgeführt werden.

Situation in der Kehrichtverbrennung in der Schweiz

Die Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) in der Schweiz spielen eine zentrale Rolle in der PFAS-Entsorgung, da viele Abfallströme (z.B. neben dem Kehricht auch aus dem Recycling und der Abwasserbehandlung) dort enden. Erste Analysen zu PFAS-Rückständen in Schlacke aus Schweizer KVAs



zeigen, dass geringe PFAS-Anteile in den Verbrennungsrückständen verbleiben können, die anschliessend deponiert werden. Diese Rückstände erfordern eine genauere Untersuchung, da z.B. mit dem Deponiesickerwasser PFAS wieder freigesetzt werden. In der Flugasche von 5 Schweizer KVA lagen alle bisherigen Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze (0.1 bis 0.2 µg/kg pro Einzelsubstanz). Im Abwasser von 3 Schweizer KVA konnten geringe Konzentrationen (bis 18 ng/L) von kurzkettigen PFAS (PFBA und PFPeA) gefunden werden. Eine Einzelstudie an einer Schweizer KVA konnte zeigen, dass der vorhandene Abgas-Katalysator keinen signifikanten Einfluss auf die PFAS-Emissionen hat.

Sonderabfallverbrennungsanlagen werden allgemein als sicheren Entsorgungsweg für PFAS gesehen. Aus ausländischen Messungen ergeben sich jedoch Hinweise, dass z.B. in der Abluft noch Restbelastungen vorliegen können.

Gehrmann et al. (2024) untersuchten in einer Studie in einem KVA-Testaufbau den Einfluss der Verbrennungstemperatur auf den Mineralisierungsgrad von 40 gängigen im Hausmüll enthaltenen langkettigen Fluorpolymeren. Den Ergebnissen zufolge konnte bei den beiden getesteten Temperaturen (860 °C und 1095 °C für je 2 s) eine PFAS-Zerstörung von >99.9% erzielt werden. Es konnten nur einzelne PFAS in den Outputströmen nachgewiesen werden. Die Autoren weisen in ihrer Studie zusätzlich daraufhin, dass der Zerstörungsgrad in einer realen KVA geringer ausfallen könnte, da die Geometrie des Ofens und daraus entstehenden Turbulenzen in jeder KVA individuell sind.

Fazit

Derzeit sind nur grobe Abschätzungen der abfallrelevanten PFAS-Frachten auf der Grundlage unterschiedlicher, meist ausländischer Studien möglich. Die Unsicherheiten bei der Übertragung auf die Situation in der Schweiz sind für alle Bereiche der Abfallwirtschaft, die dieser Bericht beschreibt, ähnlich:

- wenig Kenntnis über
 - den PFAS-Gehalt des Eingangsmaterials
 - die Verteilung der PFAS-Belastung innerhalb des jeweiligen Prozesses (feste Rückstände, Abwasser, Abluft, Produkte wie Recyclate oder Kompost)
- Messung von unterschiedlichen PFAS-Einzelstoffen (Anzahl und Art) in den einzelnen Studien
- Summenbildung über jeweils unterschiedliche PFAS-Einzelstoffe
- nur sehr vereinzelte Messungen zur Erfassung «aller» PFAS inklusive Vorläuferverbindungen

Aus den gesichteten Literaturdaten lässt sich kein vollständiges Bild für die Schweiz ableiten. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die mengenmässig dominierenden PFAS-Stoffflüsse letztlich in den KVA enden, entweder direkt über den angelieferten Kehrriecht oder indirekt mit dem Klärschlamm aus den Abwasserreinigungsanlagen.

1 Einleitung

Unter per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) versteht man eine umfangreiche Stoffgruppe anthropogenen Ursprungs, die sich als extrem langlebige Umweltschadstoffe herausgestellt haben. Durch ihre wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften und ihre oxidative Beständigkeit finden sie in einer Vielzahl von Produkten Anwendung (z.B. Beschichtung von Textilien, Feuerlöschschäumen, Pestiziden, Kunststoffen, Pharmaka) [21]. Aufgrund ihrer Persistenz und der Tendenz bioakkumulierend und toxisch zu wirken, wurden sie als besorgniserregend für Mensch und Umwelt identifiziert. Nach Freisetzung in die Umwelt ist eine Entfernung von PFAS mit hohem verfahrenstechnischem und kostenintensivem Aufwand verbunden und nicht in allen Fällen möglich.

Chemisch gesehen bestehen die organischen Verbindungen aus Kohlenstoffketten verschiedener Länge, bei denen die Wasserstoffatome vollständig (perfluoriert) oder teilweise (polyfluoriert) durch Fluoratome ersetzt sind. Diese C-F-Bindung ist die stabilste bzw. stärkste chemische Bindung in der Chemie. Die Kohlenstoffketten können sowohl linear als auch verzweigt sein und verschiedene funktionelle Gruppen enthalten. Die «klassischen» PFAS Perfluoroktansäure (PFOA) und Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) gehören (zusammen mit anderen verwandten Verbindungen) zur sogenannten „C8-Fluorchemie“. Seit den Verwendungseinschränkungen von PFOA und PFOS werden alternativ andere Verbindungen eingesetzt, darunter auch PFAS mit kürzeren perfluorierten Kohlenstoffketten (z.B. die «C6-Fluorchemie»). Ausserdem sind zahlreiche sogenannte Vorläuferstoffe im Einsatz, zum Beispiel durch Ether-Bindungen unterbrochene PFAS [62].

Neben diesen Einzelsubstanzen, werden auch polymer PFAS verwendet, die aus per- oder polyfluorierten Monomereinheiten bestehen. Beispiele hierfür sind PTFE (Teflon[®], Gore-Tex[®]) und PVDF. Diese werden einerseits als Ausgangsmaterial für z.B. Rohrleitungen, Dichtungen, Membranen, Labormaterial, Trockenschmierstoffe etc. als auch für Beschichtungen von Metallen und anderen Werkstoffen wie z.B. Antihaft-Beschichtungen, korrosions-resistente und wasserabweisende Beschichtungen eingesetzt.

Die grosse Anzahl (4'000 bis mehr als 10'000, je nach Quelle) an verschiedenen Einzelsubstanzen stellt weiterhin auch die Analytik vor Probleme. Analytische Messmethoden liegen nur für wenige Einzelsubstanzen vor. In Studien zu PFAS werden verschiedene Einzelsubstanzen bestimmt und die Konzentrationen als Summe über eine bestimmte Anzahl PFAS dokumentiert. Es gibt daher nicht einen generellen «PFAS Messwert». Die Summenparameter TOF (total organic fluorine) oder EOF (extractable organic fluorine) bilden die Belastung der gesamtorganischen Fluorverbindungen in einer Probe ab. Neben den PFAS werden hier alle organischen Verbindungen, die Fluor enthalten erfasst. Eine weitere Methode zur Bestimmung unbekannter PFAS ist TOPA (total oxidizable precursor assay) bei dem polyfluorierte Alkylsäuren (Vorläufersubstanzen) unter oxidativen Bedingungen zu bekannten perfluorierten Alkylsäuren transformiert werden und gezielt analysiert werden können. Die PFAS-Gesamtbelastung kann - wie auch bei TOF und EOF - mittels TOPA nicht zu 100 % bestimmt werden [61]. In der Schweiz wird für die Beurteilung der Sanierungsbedürftigkeit von belasteten Standorten gemäss Altlastenverordnung (AltIV) derzeit ein toxizitätsgewichteter Summengrenzwert von 50 ng TEQ/L (K-Wert) angewendet. Der Wert gilt für die Summe von 9 PFAS-Einzelsubstanzen (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS) multipliziert mit dem jeweiligen Toxizitätsäquivalent der Einzelsubstanz, da diese je nach Kettenlänge und funktionellen Gruppen eine unterschiedliche Toxizität aufweisen.

PFAS sind im Rahmen der Abfallentsorgung und -verwertung relevant, da sie nicht nur in der Umwelt persistent sind, sondern auch nur bei sehr hohen Temperaturen zerstört werden können. Dadurch können sie z.B. beim Recycling von Abfällen im Stoffkreislauf verbleiben. Ziel dieser Studie ist die Auswirkungen der PFAS in Abfällen auf den Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA) und deren Mitglieder aufzuzeigen. Dazu sollen die aktuellen Erkenntnisse rund um PFAS und deren Vorkommen in den einzelnen Abfallaufkommen und Abfallflüssen im Sinne einer Bestandesaufnahme zusammengefasst und Wissenslücken identifiziert werden. Hierzu wird ausgewählte relevante Literatur mit Stand Oktober 2024 ausgewertet. Zudem sollen die

derzeit gesetzlich geltenden Rahmenbedingungen und die politischen Entwicklungen und Vorstösse zusammengefasst werden. Darauf basierend soll ein allfälliger Handlungsbedarf identifiziert werden. Die Betrachtung von Deponien wurde hier nicht ausgearbeitet. Hierfür wird auf die Arbeiten des BAFU/VSA sowie des VBSA in den Teilprojekten im Zusammenhang des Gesamtprojekts Motion Maret verwiesen. Im Themengebiet der PFAS findet eine rasche Entwicklung statt, so dass in kurzer Frist mit neuen Informationen zu rechnen ist.

2 Gesetzliche Grundlagen zu PFAS

2.1 Stoffverbote und -beschränkungen in der Schweiz

In der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV, SR 814.81) sind in Anhang 1.16 zurzeit Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) und ihre Derivate, Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) und ihre Vorläuferverbindungen sowie Perfluorooctansäure (PFOA) und weitere langkettige Perfluorcarbonsäuren (C₉-C₁₄-PFCA) einschliesslich ihrer Vorläuferverbindungen reguliert.

- **PFOS** durften noch bis zum 1. April 2024 in der Hartverchromung in geschlossenen Systemen zur Sprühnebelunterdrückung verwendet werden. Beschränkungen in der Schweiz traten im Jahr 2011 in Kraft. Der Ausstieg aus der Verwendung ist abgeschlossen. Es gelten Höchstgehalte von 10 ppm in Stoffen und Zubereitungen sowie spezifisch definierte Höchstgehalte in Gegenständen.
- **PFHxS**: In Zubereitungen und Gegenständen werden seit 1. Oktober 2022 nur niedrige Gehalte von 0.025 ppm an PFHxS bzw. von 1 ppm an PFHxS-Vorläuferverbindungen toleriert.
- **PFOA**: Nach den Vorschriften dürfen seit dem 1. Juni 2021 Zubereitungen und Gegenstände höchstens Gehalte von 0.025 ppm an PFOA bzw. von 1 ppm an PFOA-Vorläuferverbindungen enthalten. Ausnahmen gelten für bestimmte Produkte und Prozesse, in welchen die notwendige Minimierung der Stoffe als Nebenprodukt zurzeit nicht möglich ist.
- **C₉-C₁₄-PFCA**: Im Einklang mit den Vorschriften von Anhang XVII der REACH-Verordnung wurden auch in der Schweiz die Herstellung, das Inverkehrbringen und die Verwendung von C₉-C₁₄-PFCA und ihren Vorläuferverbindungen seit dem 1. Oktober 2022 verboten. Zubereitungen und Gegenstände dürfen höchstens Gehalte von 0.025 ppm an der Summe der regulierten PFCA bzw. von 0.26 ppm an der Summe ihrer Vorläuferverbindungen enthalten. Ausnahmen gelten für bestimmte Produkte und Prozesse, in welchen die notwendige Minimierung der Stoffe als Nebenprodukt zurzeit nicht möglich ist.

2.2 PFAS in der Abfallgesetzgebung

PFAS sind in der Abfallverordnung (Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen, VVEA, SR 814.600) nicht geregelt. In Fällen mit fehlenden Grenzwerten kommen Anh. 3 Ziff. 3 (Verwertung von Aushub- und Ausbruchmaterial) und Anh. 5 Ziff. 6.2 (Ablagerung auf Deponien) der VVEA zur Anwendung, d.h. auf Anfrage und mit Zustimmung des BAFU legt die kantonale Behörde im Einzelfall PFAS-Abfallgrenzwerte fest.

Im Rahmen dieser Einzelfallbeurteilung gibt es bereits Grenzwerte für PFAS. Dies vorwiegend im Zusammenhang mit Altlastensanierungen für Abfälle, welche nach vorgängiger Behandlung verwertet oder abgelagert werden sollen (siehe Kapitel 2.3.2).

2.3 Politische Vorstösse

2.3.1 Vorstösse auf Bundesebene

Auf Bundesebene sind derzeit eine Motion (Motion Maret) sowie ein Postulat (Postulat Moser) bezüglich PFAS in Bearbeitung.

Motion Maret: «Festlegung von PFAS-spezifischen Werten in Verordnungen»¹: «Der Bundesrat wird beauftragt, in den entsprechenden Verordnungen die folgenden PFAS spezifischen Werte festzulegen:

- Grenzwerte und Bedingungen für die Entsorgung von Materialien (Abfallverordnung)
- Konzentrationswerte zur Evaluierung der Belastungen des Bodens und der Untergründe (Altlasten-Verordnung und Verordnung über Belastungen des Bodens)
- Grenzwerte für die Einleitung in Gewässer»

Der Bundesrat beantragte die Annahme der Motion am 9. November 2022. Der Ständerat nahm die Motion am 12. Dezember 2022 an und der Nationalrat am 6. Juni 2023. Auf die am 20. September 2023 eingereichte Frage «Aufnahme von PFAS-spezifischen Werten in der Altlasten-Verordnung: Was ist der Zeitplan?»² antwortete der Bundesrat:

«...Die Motion Maret beauftragt den Bundesrat, in verschiedenen Verordnungen PFAS-Werte einzuführen, namentlich in der Abfallverordnung, der Altlasten-Verordnung, der Verordnung über Belastungen des Bodens sowie in der Gewässerschutzverordnung. Die Herleitung der Werte muss für jede Verordnung eigenständig erfolgen.

In den Bereichen Boden und Gewässer müssen für die Festsetzung der Werte zuerst die Grundlagen erarbeitet werden. Bei den mit PFAS belasteten Standorten stützt sich das BAFU auf Abklärungen der Kantone, die eine erste grobe Abschätzung ihrer Situation erstellen. Erste Ergebnisse werden voraussichtlich 2025 erwartet. Auf dieser Grundlage wird das BAFU einen Wertevorschlag für eine Anpassung der Altlasten-Verordnung und der Abfallverordnung erarbeiten, die anschliessend bei den interessierten Kreisen in die Vernehmlassung geht [...].»

Gemäss Aussage des BAFU geht es in Bezug auf das Thema Abfall «[...] um die Schaffung eines rechtlichen Rahmens, der nicht isoliert über das Abfallrecht angegangen werden kann, die bestehende PFAS-Grundbelastung mitberücksichtigt, schliesslich Behörden sowie Akteuren der Entsorgungsbranche eine rechtliche Abstützung für erforderliche Massnahmen und Handlungen ermöglicht.» Übergeordnet bedeutet dies die «Prüfung der Vollzugstauglichkeit von Grenzwerten und Sicherstellung der umweltverträglichen Entsorgung von PFAS-haltigen Abfällen.»

«Die Herleitung von Grenzwerten - in der Regel eine Einzelstoffbeurteilung - folgt einer definierten Methode (vgl. entsprechende Vollzugshilfe). Diese ist im Fall von PFAS schwierig anzuwenden angesichts tausender PFAS-Einzelstoffe, im Gemisch auftretend, die meisten davon noch unbewertet, zu berücksichtigende Hintergrundbelastung etc.. Weitere Arbeiten im Rahmen der Erfassung der PFAS-Belastungssituation, der Entsorgungsmöglichkeiten und -kapazitätenentwicklung sind lanciert.»

In Bezug auf Gewässer liegt gemäss Aussage des BAFU der Fokus aktuell auf gefasstem Deponiesickerwasser und gepumptem verunreinigtem Grundwasser. Hierfür wird ein VSA Leitfaden zum «Stand der Technik zur Entfernung von PFAS aus gefasstem Deponiesickerwasser und für gepumptes verunreinigtes Grundwasser aus Bau- und Sanierungsprojekten» erarbeitet. Zudem wird die Vollzugshilfe «Anforderungen an die Einleitung von Deponiesickerwasser» um einen Teil zu PFAS erweitert. Diese Arbeiten sollen 2025 bzw. 2026 abgeschlossen werden.

Postulat Moser: «Aktionsplan zur Reduktion der Belastung von Mensch und Umwelt durch langlebige Chemikalien»³. Der Bundesrat beantragte die Annahme des Postulates am 20.02.2023 mit der folgenden Begründung (auszugsweise): «...In der Europäischen Union (EU) werden gegenwärtig

¹ <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefft?AffairId=20223929>

² <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefft?AffairId=20237745>

³ <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefft?AffairId=20224585>



umfassende Beschränkungen ausgearbeitet. Die zuständigen Bundesämter verfolgen die Entwicklungen in der EU und werden entsprechende Regelungen für die Schweiz prüfen... Obwohl bereits einige Massnahmen umgesetzt werden, besteht Handlungsbedarf. Die Prüfung eines Aktionsplans zur Belastungsreduktion von Mensch und Umwelt durch langlebige Chemikalien wird es erlauben, die Belastungssituation in der Schweiz aufzuzeigen. Zudem können die Herkunft und Eintragsquellen, die aktuelle Rechtslage sowie laufende Aktivitäten und allfällige Lücken identifiziert werden. Gegebenenfalls kann auch der Handlungsbedarf unter Berücksichtigung der Zuständigkeiten der verschiedenen staatlichen Ebenen herauskristallisiert werden...».

Der Nationalrat nahm das Postulat am 3. Mai 2023 an. Es ist geplant, bis Ende 2025 den Postulatbericht vorlegen zu können.

2.3.2 Vorstösse auf kantonaler Ebene

Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kt. Zürich (AWEL) hat Grenzwerte von Aushubmaterial und PFAS-haltigen Abfällen vorgeschlagen (Merkblatt vom 20. Juli 2023, [25]). Das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt hat im September 2023 in einem Merkblatt zum Altlastenvollzug die PFAS-Grenzwerte gemäss Empfehlung des BAFU für Aushubmaterial festgelegt [26]. Der Kanton Aargau hat 2024 auf einer Informationsseite für Altlasten-Fachplaner nähere Angaben zum Umgang mit PFAS-belastetem Aushubmaterial veröffentlicht [27]. Diese Angaben sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Es gilt aber weiterhin das in der VVEA festgelegte Vorgehen, dass jeweils eine standortabhängige Bewertung durch den Kanton zu erarbeiten ist, die dann durch das BAFU genehmigt werden muss.

Tabelle 1 Kantonale veröffentlichte Abfallgrenzwerte für PFAS-belastetes Aushubmaterial. Die Abfallgrenzwerte gelten für die ungewichtete Summe 9 PFAS (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS).

	Kt. ZH	Kt. BS	Kt. AG
U-Wert Grenzwert für unverschmutztes Aushubmaterial nach Anh. 3 Ziff. 1 VVEA (Bestimmungsgrenze je Einzelverbindung: 0.1 µg/kg)	< 0.1 µg/kg	0.1 µg/kg	0.1 µg/kg
T-Wert Grenzwert für schwach (oder tolerierbar) verschmutztes Aushubmaterial nach Anh. 3 Ziff. 2 VVEA Bis auf Weiteres ist eine Verwertung von PFAS-haltigen Abfällen nach Art. 19 Abs. 2 VVEA wie folgt möglich: a) als Rohstoff für die Herstellung von hydraulisch gebundenen Baustoffen b) als Baustoff auf Deponien der Typen B-E bei Tiefbauarbeiten am Ort, an dem das Material anfällt, sofern eine allenfalls notwendige Behandlung des Materials am oder direkt neben dem Ort erfolgt; vor-behalten bleibt Art. 3 der AltIV (kein weiterer altlastenrechtlicher Handlungsbedarf ⇒ Gefährdungsabschätzung nötig)	1.25 µg/kg	2.5 µg/kg	Fällt bei einem Bauprojekt PFAS-belastetes Aushubmaterial an, werden je nach festgelegtem Entsorgungsweg (gemäss Entsorgungskonzept) bei Bedarf entsprechende VVEA-(Feststoff-)Grenzwerte festgelegt. Eine Verwertung von Material als Rohstoff für die Herstellung von Zementklinker ist in den Zementwerken des Kantons Aargau derzeit nicht zulässig . Ebenfalls nehmen Aargauer Deponien derzeit keine PFAS-haltigen Abfälle an.
B-Wert Grenzwert für Material zur Ablagerung auf Deponien des Typs B nach Anh. 5 Ziff. 2.3 VVEA, Ablagerung nur nach vorgängiger Behandlung	2.5 µg/kg	5.0 µg/kg	

E-Wert Grenzwert für Material zur Ablagerung auf Deponien des Typs E nach Anh. 5 Ziff. 5.2 VWEA, Ablagerung nur nach vorgängiger Behandlung	5.0 µg/kg	5.0 µg/kg
--	-----------	-----------

2.4 Entwicklungen in der EU

Beschränkung für PFHxA

Mit der Verordnung 2024/2462/EU wurde am 19.9.2024 eine Beschränkung der Undecafluorhexansäure (PFHxA), ihrer Salze und PFHxA-verwandter Stoffe als Ergänzung zum REACH Anhang XVII publiziert. Beschränkt werden insbesondere Verwendungen für die breite Öffentlichkeit und in Feuerlöschschäumen mit Übergangsfristen zwischen 2026 und 2029.

Vorschlag für eine PFAS Gesamtbeschränkung

Im Januar 2023 reichten die Behörden von vier EU-Mitgliedsstaaten (Dänemark, Deutschland, Niederlande und Schweden) sowie Norwegen einen Vorschlag⁴ zur Beschränkung der Herstellung, des Inverkehrbringens und der Verwendung von PFAS bei der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) ein. In der anschliessenden öffentlichen Konsultation wurden über 5'600 Kommentare von 4'400 Organisationen abgegeben⁵. Derzeit wird der eingereichte Vorschlag durch die fünf nationalen Behörden überarbeitet⁶ und anschliessend den Ausschüssen für Risikobeurteilung (RAC) und sozioökonomische Analyse (SEAC) zur Begutachtung vorgelegt. Ein definitiver Zeitplan ist im Moment nicht veröffentlicht.

Hinsichtlich PFAS würden gemäss dem aktuellen Vorschlag für PFAS als Inhaltsstoff, für PFAS in Gemischen und für PFAS in Gegenständen, folgende Beschränkungen für PFAS-Höchstgehalte für das Inverkehrbringen in Kraft treten:

- 25 ppb für PFAS-Einzelstoffe (polymere PFAS werden nicht bestimmt),
- 250 ppb für die Summe der PFAS, optional mit vorherigem Abbau von Vorläuferverbindungen (polymere PFAS werden nicht bestimmt) und
- 50 ppm für PFAS (einschließlich polymere PFAS; wenn der Gesamtfluorgehalt 50 mg/kg übersteigt, legt der Hersteller, Importeur oder nachgeschaltete Anwender den Durchführungsbehörden auf Anfrage einen Nachweis des als Gehalt von PFAS oder Nicht-PFAS gemessenen Fluors vor).

Ausgenommen von diesen Höchstgehalten wären Biozidprodukte, Pflanzenschutzmittel und Wirkstoffe in Human- und Tierarzneimittel. Weitere Ausnahmen (mit zeitlicher Beschränkung) sind z.B: Die Herstellung polymerer PFAS (6.5 Jahre ausser für PTFE, PVDF und FKM), Textilien für persönliche Schutzausrüstung (13.5 Jahre), Imprägnierungsmittel für persönliche Schutzausrüstung (13.5 Jahre), Textilfilter (z.B. HEPA, 6.5 Jahre), Tieftemperaturkältemittel (6.5 Jahre), Kältemittel für Labor Kühlschränke (13.5 Jahre) und viele weitere. Zum Teil unterliegen diese Ausnahmen - wie auch das gesamte Vorhaben - noch der Diskussion im Gesetzgebungsprozess und sind damit noch nicht als abschliessend zu betrachten.

⁴ Restriction Proposal on Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS), <https://echa.europa.eu/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>

⁵ Pressemitteilung von 26. September 2023 der Deutschen Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, <https://www.baua.de/DE/Services/Presse/Pressemitteilungen/2023/09/pm36-23>

⁶ Mitteilung von 15. April 2024 des Helpdesks Reach/CLP/Biozid zum weiteren Vorgehen im Beschränkungsverfahren, https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/SharedDocs/Meldungen/DE/REACH/2024-04-12_Rolle_Aktiv%C3%A4t_PFAS.html

Vorschlag für eine Verpackungsverordnung (ersetzt die geltende Verpackungsrichtlinie)

Im Rahmen des europäischen Green Deals und des neuen Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft hat die Europäische Kommission im November 2022 eine Überarbeitung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle vorgeschlagen⁷. Bis im Jahr 2030 sollen alle Verpackungen wiederverwendbar oder stofflich verwertbar sein, sofern dies wirtschaftlich vertretbar ist. Im März 2024 erzielten das Parlament und der Rat eine vorläufige Einigung über die neue Verordnung. Diese Einigung muss noch von beiden Organen förmlich gebilligt werden.

Hinsichtlich PFAS würden dann für Verpackungen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen, die gleichen PFAS-Höchstgehalte für das Inverkehrbringen in Kraft treten, wie sie im Vorschlag für die PFAS-Gesamtbeschränkung angegeben sind.

Vorschlag zur Beschränkung von PFAS in Feuerlöschschäumen

Im Februar 2022 hat die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) auf Ersuchen der EU Kommission einen Bericht über die Umwelt- und Gesundheitsgefahren, die von der Verwendung von PFAS in Feuerlöschschäumen ausgehen, veröffentlicht. Die Agentur kam zum Schluss, dass eine EU-weite Beschränkung gerechtfertigt ist und arbeitete einen Vorschlag zur Beschränkung aus [32]. Die Ausschüsse für Risikobeurteilung (RAC) und sozioökonomische Analyse (SEAC) haben den Vorschlag grundsätzlich unterstützt, schlagen aber für Teilbereiche der Anwendung/Lagerung/Entsorgung andere Übergangsfristen vor. Der überarbeitete Vorschlag muss nun von der EU Kommission angenommen werden und könnte 2025 in Kraft treten. Die Beschränkung sieht vor, dass Löschschäume mit einem Gesamtgehalt an PFAS von mehr als 1 mg/L (1'000 ppb bzw. 0.0001%) nicht mehr in Verkehr gebracht werden dürfen. Als Übergangsfristen sind - in Abhängigkeit von der Branche bzw. dem Einsatzzweck - 18 Monate bis 10 Jahre vorgesehen. Löschschäume mit einem PFAS-Gesamtgehalt von über 1 mg/L, die in der Übergangszeit in Verkehr gebracht werden, müssen gekennzeichnet werden und auch die Behälter, in denen aufgenommene Löschmittel nach dem Einsatz gelagert werden. Nach der entsprechenden Übergangszeit müssen Löschmittel mit PFAS-Gehalten über 1 mg/L fachgerecht und ohne Gefährdung der Umwelt entsorgt werden. Die fachgerechte Entsorgung ist zu dokumentieren und auf Verlangen den Behörden nachzuweisen. Nach dem Stand der Technik ist dies die Hochtemperaturverbrennung in einer Sonderabfallverbrennungsanlage.

Übernahme in die Schweizer Gesetzgebung

Auch in der Schweiz sind Massnahmen für die Perfluorhexansäure (PFHxA) und ihre Vorläuferverbindungen in Prüfung (Produkte der «C6-Fluorchemie»). Es ist davon auszugehen, dass auch weitere entsprechende Beschränkungen wie oben für die EU aufgeführt in der Schweiz geprüft werden.

Je nach finaler Ausgestaltung der Beschränkungen, Übergangsfristen und dem Zeitpunkt des Inkrafttretens in der EU und in der Schweiz ist in Zukunft mit einer Abnahme der Gehalte an PFAS in Abfällen zu rechnen.

3 Stoffströme PFAS im Abfall

3.1 Literaturdaten (EU)

PFAS werden vielfältig verwendet, wie etwa in der Textil-, Leder- und Papierindustrie. In der Galvanik werden PFAS als Netzmittel eingesetzt. Darüber hinaus finden sie Anwendung in Kältemitteln, in Treibmitteln und in Feuerlöschschäumen. Weitere Anwendungsgebiete sind Farben, Lacke und

⁷ Legislative Entschliessung des Europäischen Parlaments vom 24. April 2024, https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0318_EN.html

Beschichtungen. D.h. PFAS-haltiger Abfall entsteht aus einer Vielzahl von Quellen. Im EU Restriction Report [8] werden die folgenden Bereiche als Abfall- bzw. Recycling-relevant eingestuft:

- Textilien (inkl. Polster, Leder, Kleidung und Teppiche)
- Lebensmittelverpackungen
- Metallbeschichtung, Oberflächenbehandlung
- Transportsektor (Kältemittel, Hydrauliköle)
- Medizinische Anwendungen
- Elektronische Geräte
- Energiesektor
- Baustoffe

Es wurden Gesamtmengen von PFAS im Abfall aus den relevanten Anwendungen hergeleitet (siehe Tabelle 2). Grundlage dafür sind teils gemessene und teils abgeschätzte PFAS-Gehalte in den Produkten und der jährliche Anteil, der entsorgt wird. Im Bericht wird darauf hingewiesen, dass bislang keine verlässlichen Daten zur Verteilung der PFAS-Frachten aus den einzelnen Anwendungen/Produkten in die jeweilige Entsorgungskategorie (Deponierung/Kompostierung/Verbrennung/Recycling) vorliegen. Für diese Verteilung wurden sehr generelle Annahmen getroffen (38% Deponie, 38% Recycling und 24% Verbrennung). Die während und nach der Entsorgung entstehenden PFAS-Emissionen wurden mit Hilfe von Standard-Emissionsfaktoren ermittelt. Die Autoren weisen darauf hin, dass die so abgeschätzten PFAS-Emissionen aus den Entsorgungskategorien im Vergleich zu den (wenigen) Messungen teilweise um einen Faktor 1'000 höher sind.

In einem Untersuchungsbericht aus Dänemark [30] wurden auf der Grundlage des EU Restriction Reports und eigener Erhebungen ebenfalls die Stoffströme im Abfallsektor untersucht. Generell wurden die Mengen aus dem EU Restriction Report pro-capita auf Dänemark umgerechnet (1.1%), Ausnahmen bilden die Sektoren «Medizinische Anwendungen», «Elektronik», «Energiesektor» und «Baumaterialien» für die eigene Daten erhoben wurden. Hierbei wurde auch die Verteilung auf die Entsorgungswege angegeben, die sich aus den lokalen Gegebenheiten ableiten liessen. Für die Kategorie Textilien wurde so z.B. die Kleidersammlung berücksichtigt (39% Recycling), die nicht für die restlichen Produkte dieser Kategorie angewendet wurde (Teppiche, Polster, etc.). Der polymere PFAS-Anteil liegt für die unterschiedlichen Kategorien zwischen 73% für Elektronik und 96% für Metallbeschichtungen am gesamten PFAS-Gehalt im Abfall (siehe Tabelle 2).

In Tabelle 2 ist zusätzlich die mengenmässig erwartete Veränderung («Trend») der PFAS-Frachten im Abfall angegeben. Diese ist aus dem EU Restriction Report übernommen und wurde dort aus zahlreichen Annahmen hinsichtlich der Marktentwicklung in den verschiedenen Sektoren der letzten 10 Jahre (2011 bis 2021) ermittelt. Wo solche Daten fehlten, wurde ein gleichbleibender Trend postuliert. Ein etwaiges Verbot oder Einschränkungen der Verwendung von PFAS wurden dabei nicht berücksichtigt.

Der EU Restriction Report kommt zum Schluss, dass aufgrund der derzeitigen Bestände und der Tatsache, dass die Verwendung von PFAS in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat, Abfall noch viele Jahre lang eine wichtige Quelle für PFAS-Emissionen bleiben wird, selbst im Falle eines raschen vollständigen Verbots von PFAS [8].



Tabelle 2 PFAS-Mengen in Abfallströmen aus relevanten Einsatzgebieten und der prognostizierte Trend

PFAS-Mengen im Abfall	EU [8]	Dänemark [30]				Entsorgungsweg	Trend (ohne Verwendungsbeschränkung) [8]
		PFAS inkl. Polymere t/a	PFAS und Vorläufersubstanzen t/a	polymere PFAS t/a	Summe PFAS t/a		
Textilien (inkl. Polster, Leder, Kleidung und Teppiche)	69'118	172	920	1'092	1.1%	60-100% KVA 39% Recycling (Kleidersammlung)	gleichbleibend
Lebensmittelverpackungen	26'566	50	230	280	1.1%	80% KVA 20% Recycling (Papiersammlung)	zunehmend
Metallbeschichtungen	954	0.4	10	10.4	1.1%	100% Recycling	gleichbleibend
Transportsektor	12'850	7	140	147	1.1%	63% KVA 27% Deponie 10% Recycling	zunehmend
Medizinische Anwendungen	5'901	30	100	130	2.2%	100% Sonderabfall	zunehmend
Elektronik	3'752	15	40	55	0.6%	100% Recycling	stark zunehmend (10%/a)
Energiesektor	2'995	4	40	44	0.7%	80% KVA 20% Recycling	stark zunehmend (10%/a)
Baumaterialien	6'495	22	90	112	1.2%	80% KVA 20% Deponie	eher abnehmend

3.2 Abschätzung der Situation in der Schweiz

Eine Aufteilung in die Kategorien wie im vorhergehenden Kapitel ist für die Schweiz nur für wenige der potenziell PFAS-belasteten Abfallströme möglich. Insbesondere für die Direktanlieferungen an die KVA (gewerbliche Anlieferer und Privathaushalte) sind – im Gegensatz zum Kehricht in Kehrichtsäcken – kaum detaillierte Daten verfügbar. Insgesamt macht dieser Anteil ca. 40% des gesamten verbrannten Abfalls aus. Für die einzelnen Behandlungswege (KVA/SMVA, Recycling und Kompostierung/Vergärung) werden deshalb Abschätzungen der erwarteten PFAS-Fracht in den jeweiligen Kapiteln spezifisch hergeleitet.

Auch wenn auf eine allgemeine Abschätzung zu PFAS-Frachten verzichtet wurde, ist ein Überblick über die verfügbaren Daten zu den Abfallmengen gemäss der Einteilung aus Kapitel 3.1 in Tabelle 3 dargestellt. Dafür wurden aktuelle Daten aus der Schweiz (Mengen und Entsorgungswege) herangezogen.



Tabelle 3 Daten zur Abfallstatistik in der Schweiz (ohne Deponierung)

Material in t/a	Verbrennung in KVA		Sonderabfall- verbrennung ^{c)}	Recycling ^{a)}	Kompostie- rung/Vergä- rung
	Hauskehricht ^{b)}	sonstige Quellen ^{d)}			
Textilien	36'698	<<235'800		59'345	
Lebensmittel- verpackungen					
Metallbeschich- tungen					
Transportsektor					
Medizinische Anwendungen			18'059	1	
Elektronik	6'277	<63'000		121'000	
Energiesektor					
Baumaterialien		180'000	6'567		

Quelle: ^{a)} Bundesamt für Statistik, Abfallverwertung 2022

^{b)} Bundesamt für Umwelt, Kehrichtsackzusammensetzung 2022

^{c)} Bundesamt für Umwelt, Sonderabfallstatistik 2022

^{d)} Direktanlieferungen: Prognos AG, Siedlungsabfallaufkommen Schweiz 2050, 2018

Für eine grobe Abschätzung der PFAS-Gesamtmenge könnten die Zahlen aus Dänemark mit einem Faktor 1.2 bis 1.5 auf die Situation in der Schweiz übertragen werden. Der Faktor 1.2 bezieht sich dabei auf das Verhältnis der Gesamtkehrichtmengen (CH: 3.9 Mt/a, DK: 3.2 Mt/a) und der Faktor 1.5 auf das Verhältnis der Einwohnerzahl (CH: 8.9 Mio, DK: 5.9 Mio). Eine nicht zu vernachlässigende Abweichung zur Situation in Dänemark stellt die Verpflichtung zum Baustoffrecycling in der Schweiz dar, so dass für diese Materialien die Verteilung in die Entsorgungswege eine andere ist.

4 PFAS in Abfallbehandlungsanlagen

4.1 Deponien

Wie im Kapitel 2.3 (Politische Vorstösse) beschrieben, laufen derzeit vom Bundesamt für Umwelt koordinierte Projekte im Rahmen der Motion Maret. In den zwei Teilprojekten «Altlasten» und «Gewässer» werden Grundlagen zu PFAS (Messungen, Verhalten, Mengen und Bewertung) bei der Deponierung behandelt. Deshalb wird in dieser Studie nicht näher auf PFAS in Deponien eingegangen.

4.2 Kehrichtverbrennung

4.2.1 Verfahrensbeschreibung

Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) dienen zur Verbrennung der atmosphärisch brennbaren Abfallanteile, wobei hier eine Materialumwandlung in stabile und deponierbare Stoffe stattfindet. Ziel ist hierbei die Volumenreduktion, die Zerstörung von organischen Schadstoffen und die Mineralisierung des Kohlenstoffs. Die dabei entstehende Abwärme wird genutzt zur Produktion von Dampf [1].

Zunächst werden in einem Bunker die angelieferten Abfälle gesammelt und mit einem Greifer durchmischt. Durch diesen Zwischenspeicher kann ein kontinuierlicher Betrieb der KVA gewährleistet werden. Zugeführte brennbare Abfälle sind unter anderem Siedlungsabfälle, Bauabfälle,

Industrie- und Gewerbeabfälle, sowie (teilweise) Klärschlämme. Nach einer erfolgten Durchmischung des Materials wird dieses durch den Ofen/Kessel transportiert. Im Ofen/Kessel herrschen Temperaturen zwischen 800 °C bis über 1'000 °C, um eine vollständige Verbrennung des Materials zu gewährleisten. Bei der Verbrennung entsteht Schlacke (ca. 20% des verbrannten Abfalls), Flugasche (2% des verbrannten Abfalls) und Rauchgase [1].

Die angefallene Schlacke wird nach derzeitigem Stand der Technik vor ihrer Deponierung (Typ D) aufbereitet. Dabei werden magnetische Anteile (z.B. Eisen), als auch Nicht-Eisenmetalle (z.B. Aluminium) zurückgewonnen und dem Recycling zugeführt [2].

Als Flugasche wird jener Teil des Rauchgases verstanden, der beim Verbrennungsprozess mit dem Rauchgas nach oben fliegt und in der Rauchgasbehandlung anfällt. In der Rauchgasbehandlung werden Elektrofilter oder Textilfilter [3] eingesetzt, um diese Flugasche abzuscheiden. Auch die Flugasche kann zur Rückgewinnung von Schwermetallen (v.a. Zink) behandelt werden. Dabei wird die Flugasche sauer gewaschen und filtriert, bevor sie auf eine Deponie Typ D verbracht wird [1], [2]. In der weiteren Rauchgasbehandlung werden in den nächsten Schritten die Stickoxide (NO_x) durch das Zuführen von Ammoniakwasser und das Leiten der Gase durch Katalysatoren in Wasser und harmlosen Stickstoff umgewandelt [2]. In den meisten KVA kommen mehrstufige Nasswäscher zum Einsatz, um die sauren Gase, flüchtigen Metalle und SO₂ aus den Rauchgasen abzuscheiden. In KVA mit trockener Rauchgasreinigung kommen Mischreaktoren und Gewebefilter zum Einsatz. Abschliessend kann ein Schlauchfilter als sog. «Polzeifilter» nachgeschaltet sein, welcher sehr tiefe Werte für die Feinstaubemission ermöglicht [4].

Das Prozesswasser aus der nassen Rauchgasreinigung wird chemisch (Neutralisation) und physikalisch (Absetzung, Filtration) behandelt und das gereinigte Abwasser der ARA zugeführt. Der anfallende Hydroxid-Schlamm wird entwässert und bei hohen Zinkgehalten dem Recycling zugeführt oder bei tiefen Metallgehalten deponiert [2].

4.2.2 PFAS im zugeführten Abfall

Die Menge an PFAS in den Stoffströmen zur KVA ist für die Schweiz nicht bekannt. Sie kann punktuell aus verfügbaren Studien in anderen europäischen Ländern als grobe Abschätzung hergeleitet werden.

- Bericht des BAFU zur Kehrichtsackzusammensetzung, 2022 [10]
- Dänischer Bericht zur Massenflussanalyse von PFAS [30]
- Bericht der Deutschen Umweltbundesamts zum PFAS-Gehalt in verschiedenen Kehrichtfraktionen, 2024 [9] (Messungen ohne polymere PFAS)

Alle 10 Jahre führt das BAFU Studien zur Zusammensetzung und Menge des Kehrichtabfalls schweizweit durch [10]. In ihrer letzten Studie von 2022 wird eine Abfallmenge der Schweizer Haushalte von rund 1.3 Mio. Tonnen genannt, diese Menge enthält zusätzlich zum häuslichen Abfall in Kehrichtsäcken (ca. 900'000 t) noch weiteren kommunalen Abfall wie Sperrgut, Wischgut, Kehricht aus öffentlichen Abfallkübeln, etc. (400'000 t). Die PFAS-relevanten Abfallströme sind Textilien (nur Kleidung, ca. 37'000 t) und Papier (ca. 156'000 t). Ein weiterer relevanter PFAS-Beitrag stammt aus dem entwässerten Klärschlamm (ca. 28% TS), der in KVA mitverbrannt wird (ca. 97'000 t in 2023). Die PFAS-Gehalte in den einzelnen Kehrichtfraktionen wurden aus der Studie des deutschen Umweltbundesamtes (ohne polymeren Anteil) [9] übernommen bzw. aus dem Dänischen Report (inklusive polymeren PFAS) [30] hergeleitet. Daraus ergibt sich für die Schweiz eine Menge im Bereich von 60 kg/Jahr (ohne polymerem Anteil) bis über 300 t/Jahr (mit polymerem Anteil) die potenziell den KVA zugeführt wird. Die Werte sind Tabelle 4 zu entnehmen.



Tabelle 4 Anlieferung von PFAS-haltigen Abfällen an Schweizer KVA, grobe Abschätzung

Material	KVA zugeführte Abfälle [t/Jahr]	PFAS-Gehalt, ohne polymeren Anteil [9]	PFAS-Gehalt, mit polymerem Anteil [30]	Abgeschätzte PFAS-Menge in der Schweiz	
		Mittelwert [µg/kg]	[g/kg]	ohne polymere PFAS [kg/Jahr]	mit polymeren PFAS [t/Jahr]
Kleidung	36'698 [10]	389	5.76	14	211
Papier	156'065 [10]	274	0.65	43	102
Klärschlamm, feucht (Trockensubstanz ca. 28%)	97'000 [31]	67	k.A.	3.5	-
Schreddergut aus Altfahrzeugen (z.B. Polster, Kunststoffe)	34'000 [60]	k.A.	k.A.	-	-

Für diese erste grobe Abschätzung gelten die folgenden Einschränkungen:

- Es fehlen Messwerte für den gesamten PFAS-Gehalt im Klärschlamm inklusive des polymeren Anteils
- Messwerte des PFAS-Gehalts für das Schreddergut aus dem Fahrzeugrecycling fehlen ebenfalls
- Auch für den PFAS-Gehalt ohne polymeren Anteil weichen die Daten aus Deutschland und Dänemark stark voneinander ab. Die Ursachen hierfür sind unklar.
- Ähnlich wie für Kleidung wird auch für andere Textilien (Polsterstoffe, Teppiche, Lederwaren), die als Stück- oder Schreddergut in die KVA gelangen, in der dänischen Studie eine jährliche Fracht von 380 t/Jahr (inkl. polymere PFAS) hergeleitet. Diese Zahlen fehlen für die Schweiz, da sie grösstenteils im Schreddergut gemischt mit anderen Abfallfraktionen wie z.B. Altholz angeliefert werden und nicht separat erfasst sind.
- Für weitere PFAS-relevante Abfallströme wie z.B. Abfälle aus der Kunststoffindustrie, Schreddergut aus beschichtetem Altholz und beschichteten Textilien fehlen sowohl Angaben zu Mengen als auch Messungen zu PFAS-Gehalten.

4.2.3 PFAS im Output

Eine Labor-Studie zum Verbrennungsverhalten von polymeren PFAS aus Textilien (Gore-Tex) in einem KVA-ähnlichen Versuchsaufbau konnte zeigen, dass unter günstigen Bedingungen (Sauerstoffgehalt, Temperaturen) keine PFAS-Emissionen in der Abluft messbar waren [39]. Gehrman et al. (2024) [63] untersuchten in einer weiteren Studie im gleichen Versuchsaufbau den Einfluss der Verbrennungstemperatur auf den Mineralisierungsgrad von 40 gängigen im Hausmüll enthaltenen langkettigen Fluorpolymeren. Den Ergebnissen zufolge konnte bei den beiden getesteten Temperaturen (860 °C und 1095 °C für je 2s) eine PFAS-Zerstörung von >99.9% erzielt werden. Von den 42 gemessenen PFAS wurde einzig PFOA mit einer Konzentration von 0.20 ng/m³ im Rauchgas (T = 1095 °C) gefunden. Eventuell war dies jedoch auf eine Kontamination der Probe zurückzuführen, da bei geringerer Verbrennungstemperatur kein PFOA nachgewiesen werden konnte. Bei einer Temperatur von 860 °C konnte von den gemessenen 42 PFAS im Abwasser einzig PFOS und in den festen Rückständen nur PFBS nachgewiesen werden. Dies konnte nicht eindeutig auf eine Kontamination der Proben zurückgeführt werden und stellt möglicherweise das Resultat einer unvollständigen Zerstörung dar. Die Autoren weisen in ihrer Studie zusätzlich daraufhin, dass der

Zerstörungsgrad in einer realen KVA geringer ausfallen könnte, da die Geometrie des Ofens und daraus entstehenden Turbulenzen in jeder KVA individuell sind.

In der ersten umfassenden Studie von Björklund et al. [3] wurde eine KVA auf die PFAS-Stoffströme hin untersucht. Hierbei wurde sowohl einzig der Kehricht als auch ein Gemisch aus Kehricht und Klärschlamm (5-8 %) verbrannt und die entstandene Flugasche, Schlacke, Abwasser und das Rauchgas beprobt und auf PFAS-Gehalte untersucht. Björklund et al. [3] konnten PFAS in allen Stoffströmen nachweisen, wobei die kurzkettigen PFAS (C4-C7) und hierbei vor allem PFBA und PFHxA dominierten, PFOA und PFOS jedoch auch noch in relevanten Konzentrationen vorhanden waren. Weiterhin konnte eine höhere PFAS-Belastung durch die Beimischung von Klärschlamm festgestellt werden.

Insgesamt lässt sich ein durchschnittlicher PFAS-Gehalt von 0.07 - 0.1 µg pro kg verbranntes Kehrichtmaterial abschätzen. Dieser Gehalt wurde aus der Summe der Outputmengen (Schlacke, Asche, Abwasser, Abluft) dividiert durch die gesamte Kehrichtmenge der betreffenden KVA von jährlich 120'000 t abgeschätzt. Dabei war aber der PFAS-Gehalt im Kehricht nicht bekannt bzw. konnte nicht bestimmt werden. Eine Elimination von PFAS konnte somit nicht abgeschätzt werden. Bei der Zumischung von Klärschlamm in das Kehrichtmaterial wird von einem 4 mal höheren PFAS-Gehalt berichtet. (0.07 - 0.4 µg/kg Kehricht), was 11 - 56 g pro Jahr für die betrachtete KVA entspricht (siehe Abbildung 1).

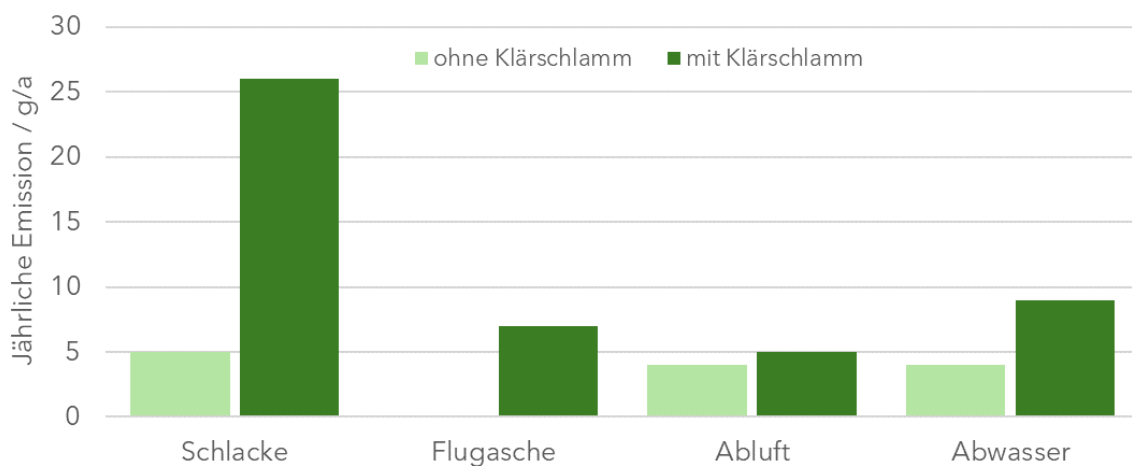


Abbildung 1 Abgeschätzte PFAS-Emissionen der KVA mit und ohne Klärschlammverbrennung [3]

In den beiden untersuchten Mischungsvarianten waren die dominanten PFAS-Verbindungen nach der Verbrennung die kurzkettigen Verbindungen PFBA und PFHxA mit Anteilen von 75-99 %. Vergleicht man die Mengen der entstehenden Verbrennungsprodukte vom Kehricht gemischt mit Klärschlamm und deren Gehalt an PFAS miteinander, so ist die Schlacke (55%) die grösste Senke für PFAS, gefolgt von der Flugasche (15%) und dem Prozesswasser (15%). Gemäss den Messungen dieser Studie enthält das behandelte Prozessgas einen Anteil von 11% PFAS (bezogen auf die gesamte Outputmenge) [3]. Für eine weitere Einordnung siehe Kommentare zur nachfolgenden Tabelle.

In der nachfolgenden Tabelle sind verfügbare Messdaten der PFAS-Gehalte in den unterschiedlichen Outputströmen von Kehrichtverbrennungsanlagen aus dieser und weiteren Studien zusammengefasst:

- Björklund et al. [3]: wie oben beschrieben, Messungen in allen Outputströmen,
- EU restriction report [8]: Zusammenfassung von 3 Studien zum PFAS-Gehalt in Schlacke und Flugasche,
- Awad et al. [13]: Messungen des PFAS-Gehalts aus 27 schwedischen KVA (2020/21), nur Schlacke, Flugasche und Prozesswasser



- Lassen et al. [30]: Zusammenfassung mehrerer Studien zu PFAS-Gehalten in allen Outputströmen von mehreren dänischen KVA
- Präsentationen am 3-Ländertreffen ATAB, ÖWAV und VBSA, Neuchâtel 2024:
 - Ringmann und Burgener: Analytik von PFAS im Abgas der KVA Linth [64],
 - Gausson-Freidl: Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen in KVA-Rückständen [65], Messungen Schlacke von 6 KVA, Asche in 5 KVA und Abwasser in 4 KVA

Erste Studien aus der Schweiz [64][65], Schweden [3][13] und Dänemark [30] liefern Daten zu mehreren Outputströmen. In den Studien liegen eine Vielzahl an Analysen unterschiedlichster Proben (von Stichproben bis zu Halbjahresmischproben) vor. Weiterhin stellt jede KVA eine individuelle Anlage dar und somit wurde auch die Probenahme unterschiedlich durchgeführt.

Tabelle 5 PFAS-Konzentrationen in den Stoffströmen einer KVA aus der Literatur, jeweils Summenkonzentrationen ohne Gewichtung nach Toxizität.

Stoffstrom	∑9 PFAS [64]	∑9 PFAS [65]	∑8 PFAS [3] ^{e)}	∑ PFAS (<i>Median</i>) [8]	∑27 PFAS [13]	∑22 PFAS [30]
Schlacke	0.1 - 0.6 µg/kg (PFHxA/PFBs)	<BG ^{c)} - 1.4 µg/kg	0.23 - 1.3 µg/kg	1.7 µg/kg (0.043 µg/kg)	0.22 - 12.76 µg/kg	0.57 µg/kg
Flugasche	<BG (0.1 µg/kg)	< BG ^{c)}	<BG - 1.1 µg/kg	10.79 µg/kg	0.18 - 37.71 µg/kg	<LOQ (0.1 µg/kg)
Abluft	∑23 PFAS: 0.0024 ± 0.0024 ^{f)} µg/m ³		0.0046 - 0.0047 µg/m ³			< LOQ (0.006 µg/Nm ³)
Abwasser ^{b)}	∑35 PFAS: <BG ^{d)} <BG ^{e)} - 22 ng/l		74 - 181 ng/l		0.28 - 182.95 ng/l	12 - 26 ng/l (Hintergrund: 3.2 - 27 ng/L)
Gips (aus dem neutralen Wäscher)			<BG - 0.25 µg/kg			<LOQ (3 µg/kg)

^{a)} der tiefere Wert bezieht sich jeweils auf reinen Hausmüll, der höhere Wert auf Hausmüll und Klärschlamm

^{b)} PFAS-Konzentrationen im zugeführten Wasser nur in der dänischen Studie ausgewiesen

^{c)} die Bestimmungsgrenzen für die Einzelstoffe liegen grösstenteils bei 0.1 µg/kg, in Teilen der Proben auch bei 0.2 bzw. 0.3 µg/kg (PFBA, PFPeA, PFOA, PFOS)

^{d)} die Bestimmungsgrenzen im Abwasser reichten je nach Einzelstoff von 2 bis 10 ng/L

^{e)} die Bestimmungsgrenzen im Abwasser reichten je nach Einzelstoff von 1 bis 10 ng/L

^{f)} Messwert inkl. Fehler stammen aus einer einzelnen Messkampagne (10h Beprobung, ca. 13 m³ Abgas)

Allgemein liegen die publizierten Werte in derselben Grössenordnung. Ausnahmen bilden teilweise die Werte der Björklund-Studie, auch weil hier tiefere Bestimmungsgrenzen erreicht wurden. Für die Abluft wurde jedoch kein Hintergrundwert bestimmt und die Konzentrationen mit und ohne Klärschlamm waren praktisch gleich, obwohl die Werte in den anderen Outputströmen mit Klärschlamm deutlich höher lagen. Beim Abwasser ist zu beachten, dass nur in der dänischen Studie Hintergrundwerte bestimmt wurden, die in einem ähnlichen Bereich lagen wie die Werte im Abwasser. Allerdings war die Konzentration im Abwasser in der Björklund-Studie bei Zugabe von Klärschlamm höher. Daher ist unklar, ob PFAS-belasteter Kehrriecht zu einer gewissen Zusatzbelastung im Abwasser führen könnte. Die grossen Abweichungen beim PFAS-Gehalt in der Flugasche (von <LOQ bis 37 µg/kg) lassen sich wahrscheinlich zum grössten Teil auf die unterschiedliche Prozessführung (Verweilzeit, Temperatur) in den untersuchten KVA zurückführen.

Abschätzung zu Stoffströmen im Output für die Schweiz

Die Mengen von Schlacke und Flugasche sind für die Schweizer KVA bekannt (Abbildung 2). Aus diesen Mengen kann der jeweilige Bereich der PFAS-Menge für die Schweiz aus den verfügbaren gemessenen Konzentrationen aus den Studien aus verschiedenen Ländern abgeschätzt werden.

Massenfluss der Schweizer KVA 2023

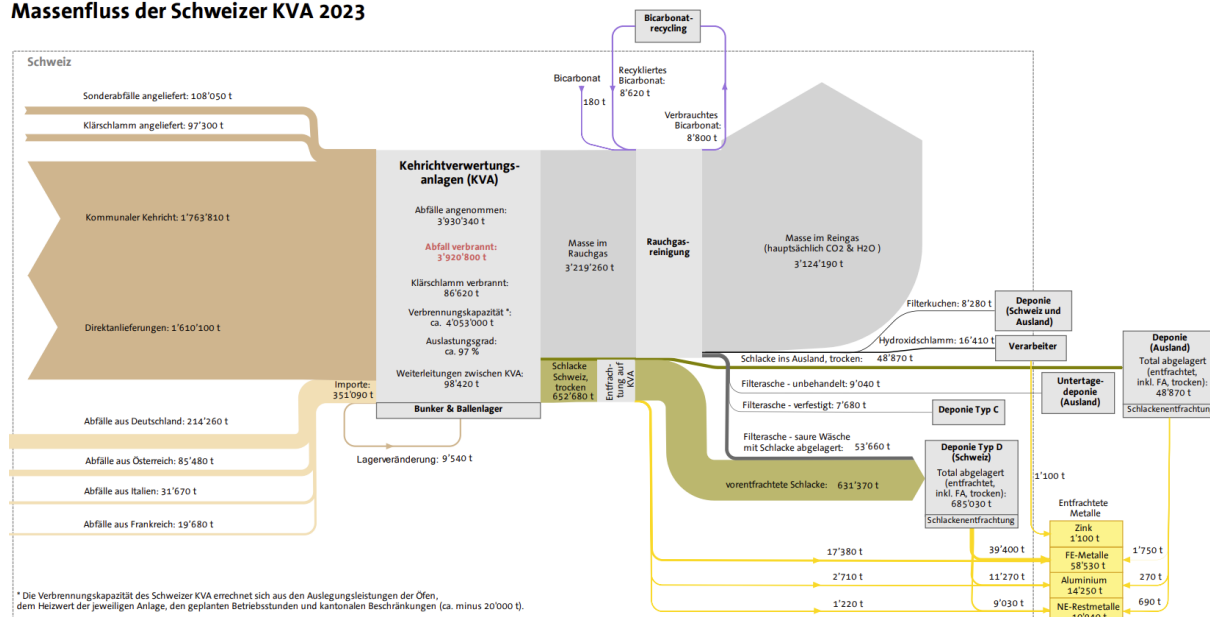


Abbildung 2 Massenflussdiagramm 2023 für alle Schweizer KVA, aus [31]

Aus den minimalen und maximalen Konzentrationen aus Tabelle 5 ergeben sich übertragen auf die Schweiz die folgenden Werte:

PFAS in Schlacke: 0.14 kg/a bis 7.98 kg/a (Gehalt 0.22 bis 12.76 µg/kg)

nur CH-Messungen[64][65] bis zu 0.88 kg/a (Gehalt <BG (0.1 µg/kg) bis 1.4 µg/kg)

PFAS in Flugasche: bis zu 2.65 kg/a (Gehalt von <BG (0.1 µg/kg) bis 37.7 µg/kg)

nur CH-Messungen[64][65] alle Messungen bislang <BG (0.1 bzw. 0.2 µg/kg)

Bei dieser Abschätzung ist zu beachten, dass Minimum und Maximum aus einzelnen Messungen und nicht aus Mittel- oder Medianwerten stammen. Darüber hinaus wurden bei den einzelnen, zugrundeliegenden Untersuchungen jeweils andere PFAS-Einzelstoffe analysiert und entsprechend auch andere Summenparameter gebildet. Deshalb sind die berechneten Mengenangaben nur eine grobe Abschätzung und nicht als untere und/oder obere Grenze der zu erwartenden Mengen in der Schweiz zu verstehen.

Neben den Messungen in verschiedenen KVA wurden Messungen an abgelagerter Schlacke und Filterasche im Jahr 2023 an zwei Typ D-Deponien im Kanton Zürich durchgeführt [66]. Bezogen auf den Summenparameter 9 PFAS (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS) wurden Gesamtgehalte von «nicht nachweisbar» bis 5.5 µg/kg in den Bohrkernen gefunden. In Filterasche-Rückständen (nur eine Probe) wurde nur PFOS (0.1 µg/kg) nachgewiesen. In der Tendenz scheinen die tiefer liegenden, älteren Verbrennungsrückstandsschichten in den untersuchten Deponien eher höhere PFAS-Konzentrationen aufzuweisen, was die Autoren auf einen eventuell abnehmenden Einsatz von PFAS zurückführen.

Eine Abschätzung zu weiteren Output Stoffströmen ist aufgrund der vorliegenden Daten nicht möglich zumal unklar ist, ob diese tatsächlich PFAS aus dem zugeführten Abfall enthalten.

4.2.4 Handlungsbedarf

Die abschliessende Formulierung eines Handlungsbedarfs ist derzeit nicht möglich. Umfassende Fluor-Massenbilanzen für KVA fehlen zurzeit noch und für die Schweiz liegen bisher wenig Daten vor. Die Datenlage bei den einzelnen Outputströmen ist ebenfalls von unterschiedlicher Qualität, insbesondere sind nur wenige, punktuelle Messungen im Abwasser und Abgas vorhanden. Bei

diesen Messungen fehlt teilweise auch die Angabe einer Hintergrundbelastung, so dass unklar ist, ob die KVA in diesem Fall eine Quelle für PFAS darstellen könnte oder nicht.

Die Schlacke und Flugasche müssen nach heutigem Stand der Technik vorbehandelt werden, um danach deponiert (Typ D Deponien) werden zu dürfen (Metallrückgewinnung, Schwermetallentfernung). Die in den ausländischen Studien gefundenen spezifischen PFAS-Gehalte deuten darauf hin, dass teilweise die vorgeschlagenen Grenzwerte (siehe Tabelle 1 in Kapitel 2.3.2) überschritten werden könnten. Die wenigen Messdaten aus der Schweiz deuten ebenfalls daraufhin, dass zumindest der vorgeschlagene U-Wert von 0.1 µg/kg teilweise überschritten wird. Dabei ist zudem zu beachten, dass bei Typ D Deponien das Deponiesickerwasser gefasst ist und im Rahmen der Motion Maret ein Leitfaden zum Stand der Technik zur Entfernung von PFAS aus Deponiesickerwasser und eine Vollzugshilfe zur Festlegung von Einleitgrenzwerten erarbeitet wird (siehe Kapitel 2.3.1).

Um aussagekräftige Handlungsempfehlungen treffen zu können, sind daher weitere Studien an realen Anlagen in der Schweiz zu empfehlen.

4.3 Sonderabfallverbrennung

4.3.1 Verfahrensbeschreibung

In Sonderabfallverbrennungsanlagen (SAVA) werden besonders giftige und umweltschädliche Chemikalien bei Temperaturen > 1'100 °C verbrannt und somit unschädlich gemacht. Der wichtigste Unterschied zu KVA liegt im Verbrennungsprozess. Während in KVA Brennkammern eingesetzt werden, wird in Sonderabfallverbrennungsanlagen typischerweise mit grossen Drehrohren gearbeitet. Dadurch wird das zu entsorgende Material kontinuierlich gut durchmischt und mit Luft-sauerstoff für eine effektive Verbrennung unter hohen Temperaturen angereichert [5]. Bei den in der VVEA vorgeschriebenen Bedingungen für Abfall mit einem Gehalt von mehr als einem Gewichtsprozent an organisch gebundenen Halogenen (Mindesttemperatur 1'100°C für 2 Sekunden) wird allgemein davon ausgegangen, dass PFAS zerstört werden [12]. Fluor wird dabei entweder mineralisiert oder als HF freigesetzt. Dem Drehrohrofen mit Mehrstoffbrenner folgt eine Nachbrennkammer [5], [6]. Für die Rauchgasreinigung können Quencher eingesetzt werden, die ein schlagartiges Abkühlen des Rauchgases bewirken und somit die Entstehung von Dioxinen und Furanen verhindert. Die im Rauchgas weiterhin noch vorhandenen anorganischen Stoffe (z.B. Fluor, Phosphor) werden abschliessend durch Nasswäscher unter Einsatz von anorganischen Säuren und Kalk entfernt. Die abschliessend entstandenen Salze werden in einem Elektrofilter abgeschieden. Die Entfernung der restlichen Schadstoffe (z.B. Schwefeldioxid, Stickoxide, Hg) erfolgt durch alkalische Wäscher, Katalysatoren und Aktivkohlefilter [5], [6].

4.3.2 PFAS im zugeführten Abfall

Neben den Abfällen, die aufgrund der PFAS-Belastung und der fehlenden, alternativen Entsorgungswege, derzeit in Sonderabfallverbrennungsanlagen entsorgt werden müssen (wie z.B. AFFF-Löschschäume oder hoch-belastetes Bodenmaterial) ist aufgrund der Vielzahl der PFAS-Anwendungen davon auszugehen, dass PFAS auch mit weiteren Sonderabfällen den Sonderabfallverbrennungsanlagen zugeführt werden. Dies können z.B. medizinische Abfälle sein oder andere kontaminierte und PFAS-enhaltende Sonderabfälle.

Gemäss Bundesamt für Umwelt fielen in der Schweiz im Jahr 2022 1.94 Mio Tonnen Sonderabfall an, von denen ca. 1.4 Mio Tonnen im Inland behandelt wurden [51]. Der grösste Teil dieser im Inland behandelten Sonderabfälle gelangt in die Verbrennung (ca. 694'000 Tonnen). Wiederverwert (Recycling) wurden ca. 400'000 Tonnen, chemisch-physikalisch behandelt ca. 170'000 Tonnen und ca. 110'000 Tonnen wurden deponiert.

Den grössten Anteil im Sonderabfallaufkommen, das in der Schweiz thermisch behandelt wird, machen chemische Abfälle aus (410'000 Tonnen), gefolgt von Behandlungsrückständen und Schlämmen (176'000 Tonnen) und mineralischen Abfällen wie z.B. verschmutzter Aushub oder

Ausbauasphalt (66'000 Tonnen). Kleinere Fraktionen sind Haushaltsabfälle (Holzabfälle mit gefährlichen Rückständen, 20'000 Tonnen) und medizinische Abfälle (18'000 Tonnen).

Nicht der gesamte Sonderabfall aus der oben aufgeführten Statistik (694'000 Tonnen) wird Sonderabfallverbrennungsanlagen zugeführt, ein grosser Teil der Gesamtmenge kann je nach Art des Sonderabfalls auch in KVA oder Zementwerken mitverbrannt werden. In der Schweiz werden 8 Sonderabfallverbrennungsanlagen mit einer Gesamtkapazität von ca. 230'000 t/a betrieben. Die Anlagen sind jedoch grösstenteils spezialisiert auf die Annahme bestimmter Abfallarten.

Aufgrund des Fehlens spezifischer Abfallcodes für PFAS-belastetes Material ist eine Angabe der PFAS-Menge in den Sonderabfällen nicht möglich. So werden z.B. AFFF-Konzentrate als „Abfälle, die nicht anderswo im Verzeichnis aufgeführt sind“ (16 03 05 S, Organische Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten) deklariert. Diese Gruppe umfasst auch nicht PFAS-haltige Abfälle. Ebenso wird PFAS-haltiges Löschwasser gemeinsam mit anderen, flüssigen Abfällen als „Wässrige flüssige Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten“ deklariert.

4.3.3 PFAS im Output

In der Literatur wurden drei Studien (Belgien, Australien, USA) zu PFAS-Messungen an Sonderabfallverbrennungsanlagen gefunden. Für die Schweiz liegen keine Daten vor.

In der Studie aus Belgien (2023) [19] wurde die Sonderabfallverbrennungsanlage der Firma Indaver in Antwerpen mit drei Drehrohröfen untersucht: Der höchste Emissionswert für PFAS in der Abluft der Gesamtanlage betrug in der Messperiode (15 Beprobungen von Dezember 2021 bis Juni 2023, 37 bzw. 45 Einzelstoffe) 283 mg/h (entsprechend maximal 1'987 ng/m³ Abluft). Für die 4 PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS) liegt dieser höchste Wert bei 72 mg/h (509 ng/m³ Abluft). Betrachtet man nur die letzten 5 Messungen nach Austausch der Abluftfilter (2023, davon 3 auf demselben Ofen und 2 auf den anderen beiden), so ergibt sich eine durchschnittliche Gesamtemission von 15 mg/h für PFAS insgesamt und 3 mg/h für die 4 oben angegebenen PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS). Ausgehend vom tiefsten und höchsten Emissionswert wurden dann PFAS-Jahresfrachten zwischen 26 g/a und 2.5 kg/a in der Abluft abgeschätzt. Diese Werte sind wesentlich höher als die in der Studie von Björklund angegeben 4 bis 5 g/a für eine KVA [3].

In einer weiteren Studie aus Australien (2023) [20] wurde das Verhalten von PFAS-haltigen Abfällen in einer Sonderabfallverbrennungsanlage und in einem Zementwerk untersucht:

a) Veolia Dry Creek Sonderabfallverbrennungsanlage: Es wurden Versuchsreihen mit festen und flüssigen PFAS-haltigen Abfällen durchgeführt. In keinem der Versuche wurden PFAS in der Flugasche nachgewiesen, bei der versuchsweisen Verbrennung flüssiger Abfälle mit PFBA, PFOA und PFPeA konnten diese im Abgas und in der Schlacke nachgewiesen werden. Die Effizienz der PFAS-Entfernung lag bei den Versuchen zwischen 93.06% und 95.77%. Es wurde angenommen, dass eine Kombination von Faktoren zu dieser relativ geringen PFAS-Zerstörung führte: unzureichende Sauerstoffkonzentration in der Brennkammer, defekte oder ungeeignete Injektordüse (bei flüssigen Abfällen) und ein ungeeignetes Vorgehen bei der Probenahme.

b) Zementwerk Fisherman's Landing, Gladstone, Queensland: Bei Versuchen mit AFFF-Löschsäumen als Beimengung zum Regelbrennstoff wurden Zerstörungsraten von 99.77126% bis 99.99993% für die unterschiedlichen PFAS-Einzelstoffe erreicht. Restmengen an PFAS wurden im produzierten Zement nicht nachgewiesen, so dass die Autoren davon ausgehen, dass die nicht zerstörten PFAS quantitativ in die Abluft gelangten.

In einer amerikanischen Studie [52] wurden Abgasuntersuchungen an einer Sonderabfallverbrennungsanlage während der Zugabe von 4 PFAS-Einzelstoffen (PFOA, PFOS, PFHxS und GenX) durchgeführt. Bei Teilen der Messungen befand sich zusätzlich AFFF-Konzentrat im zu verbrennenden Schlamm. Die Zerstörungsraten lag für alle 4 PFAS-Einzelstoffe bei >99.9999%. Die Emissionsraten der analysierten Einzelstoffe im Abgas lagen zwischen 0.01 mg/h (für PFNA) und 4 mg/h (für PFBA).

4.3.4 Handlungsbedarf

Aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen gilt die Sonderabfallverbrennung derzeit als ein sicherer Entsorgungsweg für PFAS-haltige Abfälle in der Schweiz. Im Vergleich zur KVA wird davon ausgegangen, dass dabei weniger oder keine PFAS-haltigen Nebenprodukte wie belastetes Abwasser, belastete Schlacke oder belastete Filterasche entstehen.

Allerdings zeigen die wenigen vorhandenen Daten aus ausländischen Studien, dass hier noch weitergehende Untersuchungen, insbesondere die Überprüfung des PFAS-Abbaus in den Hochtemperaturöfen erforderlich sind. So schreibt die US EPA in ihrem «Interim Guidance Report» vom April 2024 [53], dass aufgrund der begrenzten Daten (einschliesslich solcher, die auf wirksame Temperaturbereiche für den Abbau von PFAS hindeuten), weiterhin Unsicherheiten hinsichtlich der Wirksamkeit der thermischen Behandlung bestehen. Sie empfiehlt zusätzliche Untersuchungen, auch im Hinblick auf Nebenprodukte bei unvollständiger Verbrennung und das Vorhandensein von PFAS in allen Outputströmen, um bewerten zu können, ob bzw. unter welchen Bedingungen die Hochtemperaturverbrennung die potenziellen Freisetzungen in die Umwelt minimieren kann.

4.4 Sortierung und Recycling

4.4.1 Verfahrensbeschreibung

Die Sortierung und das Recycling von Abfällen ist in der Schweiz ein dezentraler Prozess mit zahlreichen Akteuren. Sammelstellen können an öffentlich zugänglichen Plätzen aufgestellte Behälter (z.B. für Altglas und PET) oder kommunale Einrichtungen wie z.B. Werkhöfe oder Recyclingfirmen sein. Der Abfall wird vor Ort sortiert und geeigneten Abnehmern oder Entsorgungseinrichtungen zugeführt. Separate Sammlungen für Privathaushalte bestehen zurzeit für Glas, Aluminium, Weissblech, PET-Flaschen, Batterien, Textilien, Altöl und Elektro- und elektronische Geräte. Industrieabfälle können von spezialisierten Firmen aufbereitet werden.

Da die Prozesse der Abfallsortierung und des Recyclings aufgrund der Fülle an diversen Materialien komplex sind, fokussiert die vorliegende Studie auf folgende Stoffströme, da diese als relevant bezüglich PFAS-Belastung eingestuft werden:

- Papier und Karton
- Kunststoff
- Batterien
- Baustoffe

Im Folgenden wird auf die verschiedenen Stoffströme und PFAS-Belastungen im Detail eingegangen.

4.4.2 Papier und Karton

4.4.2.1 PFAS im zugeführten Abfall

Der Einsatz von PFAS erfolgt überwiegend nur bei der Herstellung von wasser- und fettabweisenden Lebensmittelkontaktpapieren, wird aber auch in Druckertinten eingesetzt. Ein Eintrag in den Papierkreislauf bzw. die Kontamination dessen mit PFAS findet jedoch über den Altpapierkreislauf statt [9]. Zu Lebensmittelkontaktpapieren zählen unter anderem z.B. Backpapier, Papiertüten von Bäckern, Pappteller, Pizzaboxen und diverse Papier- und Pappeverpackungen (z.B. Tiefkühlware). In der europäisch gültigen Verordnung⁸ ist der Einsatz diverser Materialien in

⁸ EG Nr. 1935/2004 über Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen [43])



Lebensmittelkontaktpapieren geregelt. In Deutschland im Speziellen gilt die Empfehlung⁹ des Bundesamts für Risikobewertung (BfR), in welcher der Einsatz von 21 PFAS-Verbindungen mit dazugehörigen Höchstmengen gelistet ist. Für Europa wird die Produktionsmenge der beschichteten Papierprodukte auf ca. 47'000 t für das Jahr 2018 geschätzt [9]. Für die Schweiz fehlen diese Informationen.

Das deutsche UBA führte Untersuchungen bezüglich der PFAS-Belastung von typischerweise mit PFAS-behandeltem Papier (s.o.) stichprobenartig durch und berichtet von einer mittleren PFAS-Konzentration von 273.81 µg/kg (Medianwert 10.4 µg/kg) [9], davon sind 57% Carbonsäuren, 1% Sulfonsäuren und 43% Vorläufersubstanzen. Angaben zur Verteilung der Kettenlänge wurden im Bericht nicht gemacht jedoch angemerkt, dass nur „kurzkettige Säuren“ und einige Vorläufersubstanzen berücksichtigt wurden. Der höchste gemessene Wert von 3'437 µg/kg in einer Probe stammt von Fluortelomeralkoholen (einer Vorläuferverbindung).

4.4.2.2 PFAS im Output

In der Schweiz fallen jährlich ca. 1.1 Mio t Altpapier an, hiervon werden 80% gesammelt [23][41]. Derzeit liegen keine Daten zur PFAS-Belastung im Altpapier für die Schweiz vor.

Bei einem Altpapieraufkommen in Deutschland im Jahr 2020 von rund 14.5 Mio. t ergibt sich bei einem PFAS-Gehalt von 273.81 µg/kg eine gesamte PFAS-Menge von rund 3'961 t im Altpapier, wovon ca. 3'169 t dem Recyclingprozess zugeführt werden (siehe Tabelle 6) [9]. Es wird jedoch in der Studie des deutschen UBA darauf hingewiesen, dass die durchschnittliche PFAS-Fracht überschätzt wird, da nicht alle Papiere mit PFAS belastet sind und die Messdaten von PFAS-behandeltem Papier stammen (siehe oben). Im Falle des Recyclings gelangt ein Teil der PFAS durch den Recyclingprozess, in das Abwasser oder die Faserschlämme der Recyclinganlage. Diese Teilströme sind bezüglich einer PFAS-Belastung ebenfalls zu berücksichtigen. Derzeit liegen jedoch für eine präzise Abschätzung keine aussagekräftigen Daten vor, weshalb eine Abschätzung über diejenige PFAS-Menge, die im Recycling-Kreislauf verbleibt, nicht möglich ist.

Tabelle 6 PFAS-Materialflüsse im Altpapier im Jahr 2020 aus Deutschland [9] und der Schweiz [11].

Substanz	Altpapieraufkommen [t/a]	Recycling [80%]	Energetische Verwertung [19.61 %]	Deponierung [0.31 %]
Deutschland				
	14'468'000	11'574'400	2'849'200	44'400
∑PFAS (Mittelwert) [kg]	3'961	3'169	780	12
Schweiz				
	1'104'300	(Sammelquote: 80%)	-	-
∑PFAS (Mittelwert) [kg]	-	-	-	-

Würde man den durch das Umweltbundesamt abgeschätzten PFAS-Gehalt auf die Schweiz übertragen, dann würden jährlich ca. 300 kg PFAS mit dem Altpapier/Karton gesammelt und ca. 240 kg PFAS dem Recycling zugeführt werden. Wie oben aufgeführt ist jedoch davon auszugehen, dass diese Werte zu hoch sind.

⁹ Empfehlung XXXVI. Papiere, Kartons und Pappen für den Lebensmittelkontakt; sowie die Empfehlung XXXVI/2. Papiere, Kartons und Pappen für Backzwecke 2019

4.4.3 Kunststoff allgemein

4.4.3.1 PFAS im zugeführten Abfall

Ein flächendeckendes Recyclingsystem für Kunststoffe ganz allgemein existiert in der Schweiz zurzeit nicht. Lokal werden teilweise Sammlungen angeboten wie z.B. kostenpflichtige Sammelsäcke, Initiativen von Grossverteilern, etc. Ein schweizweites Sammelsystem wird durch die Schweizer Branchenorganisation für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft von Plastik-Verpackungen und Getränkekartons (Recypac) gerade aufgebaut (einheitlicher Sammelsack und flächendeckende Rückgabefrastruktur)¹⁰.

Im Gegensatz dazu werden in der Schweiz seit den 1990er Jahren PET-Getränkeflaschen separat gesammelt, in den letzten Jahren nimmt die Entwicklung der separaten Sammlung von Kunststoffflaschen mit Deckel (z.B. Milch- und Shampoo-Flaschen) zusätzlich zu. Kunststoffabfälle, wie z.B. Verpackungsmaterialien werden in der Schweiz im Privathaushalt in dem Kehrrichtsack entsorgt. Das BAFU berichtet von einer jährlich anfallenden Kunststoffabfallmenge von 790'000 t [44]. Die Menge an separat gesammelten PET-Getränkeflaschen in der Schweiz wird mit 36'300 t beziffert [11]. Während der Kunststoffabfall, gesammelt in den Kehrrichtsäcken, der thermischen Verwertung zugeführt wird, erfolgt eine Recyclierung für die PET-Getränkeflaschen. Hierzu werden zunächst die PET-Getränkeflaschen von unerwünschten Fremdstoffen befreit und anschliessend nach der Farbqualität (transparent, hellblau, grün und braun) getrennt [55]. Nach dem Zerkleinern zu sog. Flakes erfolgt die Abtrennung der Deckel von den Flakes mittels eines Wasserbades [55]. Da gesammeltes PET-Recyclingmaterial PFAS enthalten könnte (Hinweise gibt eine amerikanische Studie [18], bei der aber unklar ist ob es sich um PET-Getränkeflaschen handelt, und weitere „indirekte“ Nachweise in Wasser aus PET-Flaschen in denen jedoch unklar bleibt, ob das Wasser vor der Abfüllung unbelastet war [8]), kann hier ein Übergang von PFAS aus den Flakes in das Wasser nicht ausgeschlossen werden [56]. Auch bei dem anschliessenden Erhitzen der Flakes zur Herstellung des Granulats ist mit einer Freisetzung von PFAS zu rechnen. Ein weiterer Teil bleibt in dem entstehenden Granulat zurück. Daten zum Gehalt und dem Freisetzungspotenzial in das eingesetzte Wasser fehlen derzeit noch.

Für Fluorpolymere wie z.B. PTFE, PFA oder PVDF ist eine separate Recyclierung gemäss EU Restriction Report nahezu unmöglich, denn sie werden hauptsächlich als Beschichtung für andere Materialien eingesetzt [8]. Dementsprechend gibt es auch keine Angaben zu den PFAS-Mengen, die dieser Abfallstrom repräsentiert.

4.4.3.2 PFAS im Output

Laut dem BAFU werden von den 790'000 t anfallendem Kunststoffabfall (Referenzjahr 2017) rund 83 % in KVA verbrannt und rund 2 % der thermischen Verwertung in Zementwerken zugeführt und 15% dem Recycling zugeführt (siehe Tabelle 7) [44]. Der rezyklierte Anteil an Kunststoff teilt sich in 60'000 t/a, die zu Rezyklaten verarbeitet werden und 50'000 t/a, die direkt wiederverwendet werden (z.B. Textilien) auf. Die Gesamtmenge an gesammelten und rezyklierten PET-Getränkeflaschen in der Schweiz wird vom BAFU für das Referenzjahr 2022 mit 36'300 t beziffert, wobei >83 % wiederverwertet wird [11].

¹⁰ Pressemitteilung vom 17. September 2024,

Tabelle 7 Verwertungswege von Kunststoffabfällen in Deutschland [24] und der Schweiz [44].

Substanz	Kunststoffaufkommen [t/a]	KVA [t/a]	Energetische Verwertung im Zementwerk [t/a]	Recycling [t/a]	Deponierung [t/a]
Deutschland	5'670'000	2'130'000 (37%)	1'530'000 (27%)	1'980'000 (35%)	30'000 (0.6%)
Σ PFAS [kg]					
Schweiz	790'000	660'000 (83%)	10'000 (2%)	120'000 (15%)	0
Σ PFAS [kg]					

Anders als in der Schweiz existiert in Deutschland die getrennte Sammlung von jeglichem Kunststoffverpackungsmaterial im sog. „Gelben Sack“. Zusätzlich existiert das Pfandrücknahmesystem für PET-Flaschen, welche anschliessend wieder rezykliert werden [45]. Im Jahr 2021 fielen in Deutschland insgesamt fast 5.7 Mio. t Kunststoffabfälle an, wovon rund 99 % verwertet wurden (inkl. energetischer Verwertung) [24]. Davon machten folgende fünf Thermoplasten über 69.8 % der verwendeten Kunststoffe aus [24]:

- Polyethylen (PE) mit knapp 3.9 Millionen Tonnen (Mio. t),
- Polypropylen (PP) mit knapp 2.38 Mio. t,
- Polyvinylchlorid (PVC) mit 890'000 t,
- Polyethylenterephthalat (PET) mit 957'000 t sowie
- Polystyrol und expandiertes Polystyrol (PS/PS-E) mit 725'000 t.

Der PFAS-Gehalt in diesen Kunststofffraktionen ist bislang noch nicht untersucht worden, eine Abschätzung der PFAS-Mengen ist deshalb nicht möglich.

4.4.4 Batterien

4.4.4.1 PFAS im zugeführten Abfall

In Batterien, vor allem in Lithium-Ionen-Batterien, werden PFAS unter anderem als Bindemittel im aktiven Material, in festen Elektrolyten und in den Gelpolymerelektrolyten eingesetzt [22]. PTFE (Teflon), FEP (fluoriertes Ethylenpropylen), FKM (Fluorkautschuk) und andere PFAS werden für Ventile, Dichtungen, Dichtungsringe und Membranen verwendet, hingegen wird PVDF (Polyvinylidenfluorid) als Bindemittel in keramischen Abscheiderbeschichtungen angewendet [22].

Das Schweizer BAFU gibt für das Jahr 2020 eine Gesamtmenge von gesammelten und rezyklierten Batterien von 3'091 t mit einer Verwertungsquote von 42 % an [41]. Gemäss RECHARGE, einem Europäischen Industrieverband der Akteure in der Lithiumbatterien-Lebenskette, wurden im Jahr 2020 in Europa rund 150'000 t Lithium-Ionen-Batterien (inkl. Geräte-, Industrie- und Elektrofahrzeugbatterien) auf den Markt gebracht [46]. Rund 10% davon sind primäre Lithium-Ionen-Batterien (nicht wiederaufladbare Batterien) [46]. Guelfo et al. (2024) [48] merken in ihrer Studie aus den USA an, dass derzeit nur rund 5 % der Lithium-Ionen-Batterien recycelt werden. RECHARGE rechnet mit einem Anstieg der PFAS-Menge in Lithium-Ionen-Batterien bis zu 20'000 t bis zum Jahr 2030 [46]. Nach Abschätzungen der Internationalen Energie Agentur (IEA) wird aufgrund der derzeitigen Entwicklungen im Jahr 2040 weltweit ein Abfall von 8 Mio. t Lithium-Ionen-Batterien nur allein durch Elektrofahrzeuge anfallen.

Während bei der sachgerechten Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien eine Freisetzung von PFAS ausgeschlossen werden kann, gehen neuere Studien aus den USA von einer möglichen PFAS-Emission sowohl bei der Herstellung als auch beim Recycling aus [47][48][49].

4.4.4.2 PFAS im Output

Lithium-Ionen-Batterien bestehen aus einem komplexen Gemisch verschiedenster Materialien, weshalb der Recyclingprozess sehr komplex ist. Zunächst wird eine Klassifizierung der Batterien mit anschließender Entladung/Inaktivierung, Zerlegung und Trennung vorgenommen, bevor die Materialien den weiteren Recyclingprozessen, der Pyrometallurgie, Hydrometallurgie oder dessen Kombination der Verfahren zugeführt wird [22] [50]. Während durch den Prozess der Pyrometallurgie mit Temperaturen bis zu 1'600 °C eine effiziente PFAS-Mineralisation erreicht wird, wird durch den immer populärer werdenden Recyclingprozess der Hydrometallurgie, bei den geringeren Temperaturen (<600 °C) gefahren werden, ein unvollständiger Abbau und/oder die Bildung und Freisetzung von PFAS begünstigt [50].

In ihrem Review merken Rensmo et al. [47] an, dass es zwar erste Studien zu den entstehenden PFAS-Produkten während des Recyclings von Batterien gibt (v. a. in der Gasphase), jedoch eine genaue Quantifikation der Mengen fehlt. Diese müssten vorhanden sein, um eine Abschätzung der Stoffströme treffen zu können.

4.4.5 Bauabfälle

4.4.5.1 PFAS im zugeführten Abfall

Betrachtet man den Sektor "Bauabfälle" in Bezug auf PFAS wird schnell die Vielzahl an eingesetzten PFAS und diversen Produkten klar. PFAS werden z.B. in Farben und Lacken, Dicht- und Klebstoffen sowie Teppichböden eingesetzt. Zu den Bauabfällen wird in der Schweiz weiterhin während eines Baus anfallender Aushub (z.B. durch die Errichtung eines unterkellerten Gebäudes) verstanden. Auch dieser Aushub kann aus verschiedensten Gründen mit PFAS belastet sein. Durch die Herstellung von recyceltem Beton und damit einhergehend im Herstellungsprozess der Zusatz von recyceltem/belastetem Sand und/oder Kies führt zwangsläufig zu einer PFAS-Belastung von Beton.

In der Baubranche, z.B. beim Abriss von Gebäuden, der Erneuerung von Strassen oder der Sanierung von Brücken fallen grosse Mengen an gemischten mineralischen Bauabfällen an. In Bauabfallanlagen werden sogenannten „gemischte Bauabfälle“ (Bausperrgut) in die verschiedenen Materialien (z.B. Bauschutt, Holz, Metall, Gips, Glas, Karton, Kunststoffe, brennbare Abfälle) aufgetrennt [58]. Das Amt für Landwirtschaft und Umwelt (Kanton Obwalden - Umwelt Zentralschweiz) beziffert den pro Jahr in der Schweiz anfallenden Bauabfall auf 75 Mio. t (Stand 2017) [54].

Das KAR-Modell des BAFU modelliert für das Jahr 2018 in der Gesamtschweiz eine Menge an Rückbaumaterial von 7.84 Mio. m³ und 28.9 Mio. m³ Aushubmaterial [57].

4.4.5.2 PFAS im Output

Das vom BAFU veröffentlichte KAR-Modell geht für das Jahr 2018 von schweizweit insgesamt 7.84 Mio. m³ pro Jahr an angefallenem Rückbaumaterial aus. Hiervon sind 0.59 Mio. m³ der direkten Verwertung zugeführt und 4.81 Mio. m³ als Rückbaumaterial verwendet worden. Insgesamt sind weitere 2.3 Mio. m³ Baumaterial deponiert worden.

Bezüglich des anfallenden Aushubmaterials (rund 28.9 Mio. m³) gibt es je nach Verschmutzungsgrad eine Vielzahl an weiteren Handhabungs-/Verwendungswegen: rund 5,8 Mio. m³ werden auf Deponien des Typs A (unverschmutztes Material gemäss VVEA) oder B (wenig verschmutztes Material gemäss VVEA) verbracht; 1.4 Mio. m³ werden ins Ausland exportiert; 20.2 Mio. m³ sauberes Aushubmaterial wird zur Wiederauffüllung von Terrain verwendet (entweder direkt auf der Baustelle oder in Abbaustellen); rund 1.5 Mio. m³ kiesiges Aushubmaterial fällt bei der Gewinnung von Primärmaterial an und wird ebenfalls zu Primärmaterial aufbereitet.

Eine gängige Praxis ist derzeit die Behandlung von stark verschmutzten Bauabfälle und Aushubmaterial mit sogenannten Bodenwäschern. Dabei wird das Material in speziellen Waschanlagen gereinigt und aufbereitet, wodurch der Anteil an zu deponierendem Material verkleinert wird. Bei der Behandlung von PFAS-belasteten Materialien wird dabei PFAS von den mineralischen Materialien in das Waschwasser überführt. Eine Nachbehandlung des Waschwassers ist unerlässlich, was

derzeit durch den Einsatz mit Aktivkohle erfolgt, welche dann je nach Belastungsgrad thermisch verwertet oder als Sonderabfall deponiert wird.

Genauere Daten bezüglich verschiedener einzelner Stoffströme oder deren PFAS-Belastungen fehlen derzeit. Eine sinnvolle Abschätzung ist deshalb nicht möglich.

4.4.6 Handlungsbedarf

Durch ein generelles PFAS-Verbot würde neuer Input an PFAS in die Recyclingkreisläufe verringert bzw. entfallen, je nach Umfang und Ausnahmen eines Verbots. Dies wäre bei kurzlebigen Materialien wie Lebensmittelkontaktpapieren schneller der Fall als bei langlebigen Produkten wie Baumaterialien. Für alle Materialien ist jedoch davon auszugehen, dass auch bei einem Verbot PFAS über längere Zeit im Recyclingkreislauf bestehen bleiben werden.

Papier und Karton:

Derzeit fehlen aussagekräftige Messungen für die Schweiz sowohl für die PFAS-Belastung des Materials, das in das Recycling gelangt als auch für im Recyclingprozess selbst entstehende PFAS-Stoffströme (im Abwasser, im Faserschlamm und in den Recyclingfasern, die weiterverarbeitet werden sollen). Ohne diese kann derzeit kein Handlungsbedarf formuliert werden.

Kunststoff:

Da in der Schweiz zurzeit nur ein flächendeckendes Recyclingsystem für PET-Getränkeflaschen existiert, sollte für denjenigen Anteil des Recyclats, der für die Wiederverwendung als Lebensmittelverpackung vorgesehen ist sichergestellt sein, dass der PFAS-Gehalt (zukünftigen) gesetzliche Vorgaben entspricht (siehe Kapitel 2.4). Offene Fragen bestehen hier derzeit bezüglich der möglichen Herkunft von PFAS im PET. Für alle anderen Kunststoffe, die in der Schweiz derzeit grösstenteils in KVAs verbrannt werden, gilt Kapitel 4.2.4. Sollten sich neue Recyclingsysteme für andere Kunststoffe etablieren wäre es angezeigt, diese ebenfalls auf potenzielle PFAS-Belastungen und -Mengen hin zu untersuchen.

Batterien:

Die PFAS-Stoffströme im Batterie-Recycling, insbesondere im relativ neuen Sektor des Li-Ion-Batterien-Recyclings sind noch wenig untersucht. Aufgrund des vorhergesagten Wachstums des Sektors werden voraussichtlich in nächster Zeit mehr Studien vorliegen, aus denen dann ein konkreter Handlungsbedarf formuliert werden könnte. Beachtet werden sollten dabei Unterschiede in den Verfahren, die vermutlich mögliche PFAS-Emissionen beim Recyclingprozess beeinflussen.

Baumaterial:

Über die, bei der Verwertung und/oder Deponierung von Baumaterial anfallenden PFAS-Mengen liegen derzeit wenig Erkenntnisse vor. Für brennbares Bausperrgut gilt das Kapitel 4.2.4 (für KVA). Für Aushubmaterial gibt es Orientierungswerte des BAFU, es müssen jedoch standortspezifische Grenzwerte hergeleitet werden mit Hilfe derer dann über Weiterverwendung/Deponierung/Entsorgung des Materials entschieden werden kann. In den derzeit laufenden Projekten des BAFU zur Motion Maret wird auch der Aspekt Altlasten/Abfälle und Gewässer thematisiert. Gegebenenfalls lässt sich aus den zu erwartenden Ergebnissen ein konkreter Handlungsbedarf zukünftig ableiten.

4.5 Kompostierung und Vergärung

4.5.1 Verfahrensbeschreibung

Unter Kompostierung wird die aerobe Behandlung von biogenen Abfällen verstanden, hingegen die anaerobe Behandlung als Vergärung bezeichnet wird. In beiden Vorgängen findet mikrobieller Ab- und Umbau statt, der feste biogene Abfälle stabilisiert und das Produkt «Kompost» entsteht.

Grundsätzlich werden in der Schweiz zwischen verschiedenen Verfahren unterschieden [42]:



- Platzkompostierung (gewerblich-industrielle Kompostierung)
- Feststoffvergärung
- Feldrandkompostierung
- Co-Vergärung
- Mulchen
- Hausgartenkompostierung

Mit zusammen über 80% stellen die Platzkompostierung (ca. 30 %) und Feststoffvergärung (über 50 %) die Hauptverarbeitungsverfahren von biogenen Abfällen in der Schweiz dar, gefolgt von der Co-Vergärung (12 %) und der Feldrandkompostierung (8 %) [42].

Ca. 15 % der eingebrachten Menge wird nach der Feststoffvergärung nachkompostiert [42]. Das anfallende flüssige und feste Gärgut wird separiert und das flüssige Gärgut vollständig landwirtschaftlich verwertet. Die festen Gärutrückstände werden ebenfalls der Nachkompostierung zugeführt.

Bei dem Vorgang des Mulchens werden biogene Abfälle zerkleinert und oberflächlich an Ort und Stelle belassen. Die Hausgartenkompostierung findet nur im privaten Bereich statt. Für beide Kompostierungswege liegen keine gesicherten Daten vor [42] und werden daher nicht weiter betrachtet.

4.5.2 PFAS im zugeführten Abfall

Aus der letzten Abfallmengenerfassung des BAFU im Jahr 2022 [41] ergab sich eine jährliche kompostierte oder vergärte biogene Abfallmenge von 1.4 Mio t. Bezüglich PFAS existieren aktuell weder in der Schweiz noch einem anderen Land Annahmekriterien für Kompostieranlagen [28]. Die möglichen PFAS-Quellen während des Kompostierprozesses sind jedoch von mehreren Studien untersucht und identifiziert worden.

Die möglichen PFAS-Eintragswege in den Kompost geschieht vor allem durch Klärschlämme [14], wenn diese mit dem Kompost vermischt werden. Jedoch ist eine Vermischung von Grüngutabfall/Kompost mit Klärschlämmen zur Ausbringung als Dünger in der Landwirtschaft in der Schweiz seit 2006 untersagt [40]. In der Schweiz gilt Klärschlamm als Abfall und muss entsorgt oder verwertet werden.

Ein weiterer Stoffstrom ist das im Grüngutabfall vorliegende Plastik in Form von Lebensmittelverpackungen [34], beschichtetes Einweg-Geschirr und -Besteck [15], PET-Flaschen und LDPE-Abfallsäcke [18]. Reiner Kompost hat hierbei eine 10- bis 100-fach geringere PFAS-Belastung als mit Fremdstoffen verunreinigter Kompost (siehe Ergebnisse von zwei Studien aus den USA in Tabelle 8).

4.5.3 PFAS im Output

Studien zu PFAS-Gehalten im Kompost sind limitiert. In drei Ländern (Australien [33], den USA [15], [34], [36] und der Schweiz [35]) wurden jedoch Studien zu den PFAS-Konzentrationen durchgeführt (siehe PFAS-Gehalte im Kompost in Tabelle 8). In der vom BAFU beauftragten Schweizer Studie [35] aus dem Jahr 2006 wurden über 80 Kompost- und Gärresteproben (bestehend aus Grün- und Küchenabfällen) in 39 kommerziellen Kompostier- und Vergärungsanlagen in der Schweiz gesammelt und ausgewertet. Insgesamt 18 dieser Proben wurden anschliessend auf PFAS hin analysiert, wobei sich eine Konzentration von 3.4 bis 35.2 µg/kg (Median: 6.3 µg/kg) ergab.



Tabelle 8 Literaturdaten der PFAS-Gehalte in Kompost und kompostähnlichen Produkten, sowie im Gemisch aus Kompost und Verpackungsmaterial.

	$\sum 21$ PFAS [35] µg/kg	$\sum 38$ PFAS [33] µg/kg	$\sum 17$ PFAA [34] µg/kg	$\sum 13$ PFAS [36] µg/kg	$\sum 40$ PFAS [15] µg/kg	$\sum 38$ PFAS [16] [µg/kg]
Kompost	3.4 – 35.2	8.89	2.38 – 7.60	3.7	12.6 – 84.3	1.26 – 11.84
Kompost & Verpackungsmaterial			28.7 – 75.9	209 – 455		

Alle Studien berichteten übereinstimmend über den Eintrag von PFAS durch Lebensmittelverpackungen. In diversen Studien aus den USA wurde weiterhin das Verhalten der untersuchten PFAS während des Kompostiervorgangs verfolgt [15] [29] [34] und eine Zunahme der kurzkettigen PFAS (C5 und C6) festgestellt [15]. Auch die Verlagerung der PFAS innerhalb der Schwad (von oben nach unten) konnte während des Kompostierprozesses festgestellt werden. So berichten Saha et al. [29] von 59 – 63 % tieferen PFAS-Konzentrationen an der Schwad-Oberfläche, verglichen mit Proben aus 0.6 m unter der Schwad-Oberfläche. Für diesen Konzentrationsunterschied sehen die Autoren den Verlust von flüchtigen kurzkettigen PFCA, die vertikale Verlagerung durch Feuchtigkeit in den Schwadkörper sowie die aerobe Transformation von PFAS-Vorläufern an der Schwad-Oberfläche als mögliche Ursachen. Übereinstimmend wird eine gründliche Trennung von Grünabfall und Lebensmittelverpackungen als derzeit effektivste Massnahme zur Reduzierung von PFAS im Kompost empfohlen.

Im Vergleich zu den in Tabelle 8 gezeigten Kompost-Gehalten beträgt die PFAS-Belastung in Schweizer Böden gemäss einer Studie von 2022 im Median 1.2 µg/kg [59]. Dieser Wert bezieht sich auf die Summe von 8 PFAS-Einzelstoffen ($\sum 9$ PFAS ohne PFBA) die in den Jahren 2010 bis 2015 in Proben von Oberboden (0 bis 20 cm) von unterschiedlichen Standorten in der ganzen Schweiz nachgewiesen wurden. Die Einzelwerte lagen zwischen 0.2 und 15 µg/kg. Insbesondere die Werte der beiden amerikanischen Studien [34][36], in denen der Anteil an Verpackungsmaterial im kompostierten Material hoch war, liegen deutlich über dem Medianwert für Schweizer Böden. Bei den in Tabelle 8 aufgeführten Messwerten für die Schweiz ist zu beachten, dass es sich um die Summe aus 21 PFAS handelt, wohingegen sich die Daten für Böden auf die Summe von 8 PFAS beziehen.

In der Schweiz ist das Monitoringprogramm von Kompost auf Fremd- und Schadstoffen durch die Weisung zu Artikel 30 Absatz 3 der Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern zur Mindestanalysehäufigkeit für Kompost und Vergärungsprodukte [37] geregelt. Ein Verweis auf PFAS als Verunreinigungen ist gegeben, jedoch sind bisher keine Grenzwerte festgelegt.

In Australien [38] ist eine Überwachung des Kompostiervorgangs ebenfalls obligatorisch. Hier findet das geforderte Monitoring im Abstand von 90 Tagen oder bei der Herstellung von 300 t Trockensubstanz statt, je nachdem, was häufiger vorkommt [17]. Der finale Kompost muss dabei die in Tabelle 9 aufgeführten Grenzwerte einhalten, um weiter verwendet werden zu dürfen.

Tabelle 9 Monitoring-Programm während des Kompostiervorgangs in Australien [17].

Untersuchten Verbindungen	Qualitätskriterium	Minimale Monitoringfrequenz
PFOS + PFHxS	2 µg/kg	Eine Mischprobe, die aus mindestens fünf Einzelproben besteht, muss entnommen werden, bevor der frühere der beiden folgenden Fälle eintritt (gemessen ab dem Zeitpunkt der Entnahme der letzten Mischprobe): a) 90 Tage sind vergangen oder b) 300 Tonnen trockener Feststoff des fertigen Komposts werden hergestellt
PFOA	1 µg/kg	
Summe von PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDODA, PFTrDA, PFTeDA, 4:2 FTS, 6:2 FTS, 8:2 FTS and 10:2 FTS	3 µg/kg	
Summe von FOSA (or FOSA), N-MeFOSA, N-EtFOSA, N-MeFOSE, N-EtFOSE, N-MeFOSAA and N-EtFOSAA	1 µg/kg	
PFAS-Gehalt im aus dem Kompost hergestellten Eluat	tiefstmöglich	

4.5.4 Handlungsbedarf

Neuere Studien zum PFAS-Gehalt in Kompost fehlen in der Schweiz. Diese sind notwendig, um festzustellen, ob die Verwendung von Kompost aktuell eine Quelle für PFAS in Schweizer Böden über die Hintergrundbelastung hinaus darstellen kann. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass die PFAS-Konzentration im Kompost direkt von der PFAS-Belastung im Materialeingang der Kompostierungsanlage beeinflusst ist, insbesondere durch das Vorkommen von Lebensmittelverpackungen. Möglicherweise wäre eine verschärfte Eingangskontrolle dieses Materials nötig, um die Belastung zu minimieren. Im Falle eines Verbots von PFAS in Lebensmittelverpackungen ist davon auszugehen, dass dieser Input zurückgehen würde.

5 Fazit

Aufgrund der Vielzahl der PFAS-Anwendungen ist generell der Kenntnisstand über PFAS-belastete Abfallströme zurzeit noch gering. Es sind nur grobe Abschätzungen auf der Grundlage unterschiedlicher, meist ausländischer Studien möglich. Die Unsicherheiten bei der Übertragung auf die Situation in der Schweiz sind für alle Bereiche der Abfallwirtschaft, die dieser Bericht beschreibt, ähnlich:

- wenig Kenntnis über
 - den PFAS-Gehalt des Eingangsmaterials,
 - die Verteilung der PFAS-Belastung innerhalb des jeweiligen Prozesses (feste Rückstände, Abwasser, Abluft, Produkte wie Recyclate oder Kompost).
- Messung von unterschiedlichen PFAS-Einzelstoffen (Anzahl und Art) in den einzelnen Studien,
- Summenbildung über jeweils unterschiedliche PFAS-Einzelstoffe (keine direkte Vergleichbarkeit),
- nur sehr vereinzelte Messungen zur Erfassung «aller» PFAS inklusive Vorläuferverbindungen.

Derzeit sind nur wenige PFAS-Einzelstoffe in der Schweiz, unter Ausnahme von Maximalgehalten aus Verunreinigungen, verboten. Diese Regularien bezogen sich zunächst auf die «alten» PFAS (längerkettige wie PFOS und PFOA mit 8 C-Atomen) die von den Herstellern in Produkten inzwischen durch kürzerkettige PFAS ersetzt wurden. Auch diese - insbesondere solche mit 6 C-Atomen - werden ebenfalls zunehmend verboten. Eine Regulierung von PFAS im Allgemeinen fehlt bislang

ist jedoch in der EU in Diskussion. Es ist davon auszugehen, dass dies auch in der Schweiz geprüft werden wird. Je nach finaler Ausgestaltung der Beschränkungen, Übergangsfristen und dem Zeitpunkt des Inkrafttretens in der EU und in der Schweiz ist in Zukunft mit einer Abnahme der Gehalte an PFAS in Abfällen zu rechnen.

Auch eine verbindliche Festlegung von Summenparametern zur Bewertung von PFAS-Gehalten fehlt derzeit. Die im EU Restriction Report vorgeschlagenen Grenzwerte (siehe Kapitel 2.4) beziehen sich entweder auf die Messung von PFAS-Einzelstoffen, die Messung der Summe PFAS nach Abbau (TOP-Assay) oder – zur Erfassung polymerer PFAS – auf den gesamten Gehalt an Fluor, wobei nachzuweisen ist, welcher Anteil aus PFAS stammt [8]. Bei der Messung der Einzelstoffe beschränkt sich der Vorschlag auf die momentan rund 40 akkreditierten Methoden zum Nachweis.

Regulierungen im Rahmen der Abfallgesetzgebung in der Schweiz sind derzeit im Rahmen verschiedener politischer Vorstösse in Prüfung.

Aus den gesichteten Literaturdaten lässt sich kein vollständiges Bild für die Schweiz ableiten. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die mengenmässig dominierenden PFAS-Stoffflüsse letztlich in den KVA enden, entweder direkt über den angelieferten Kehrriech oder indirekt mit dem Klärschlamm aus den Abwasserreinigungsanlagen. Höher belastete Abfälle werden über die Sonderabfallverbrennungsanlagen entsorgt. Eine generelle Aussage zur Effizienz der Entfernung (Zerstörung) von PFAS in einer KVA ist derzeit nicht möglich. Aufgrund der vorhandenen Daten ist jedoch davon auszugehen, dass der grösste Teil zerstört wird. Der verbleibende Teil wird, basierend auf den derzeit vorliegenden Daten aus der Schweiz, hauptsächlich über Schlacke deponiert.

Im Bereich Recycling ist aus der Literatur wenig über PFAS-Stoffströme bekannt. Die meisten Recyclingprozesse sind aber so angelegt, dass keine PFAS zerstört werden, sondern es letztlich nur zu einer Verteilung auf z.B. Prozessabwasser und Recyclat kommt, wobei eine Behandlung des Prozessabwassers möglich wäre. Ausnahme sind hier bestimmte Prozesse im Batterierecycling in denen PFAS zerstört werden. PFAS die aus dem Recyclingprozess in den Abfall bzw. Klärschlamm gelangen werden in Analogie zum vorherigen Absatz via KVA entsorgt.

Für den Bereich Kompostierung/Vergärung ist aus den Literaturdaten abzuleiten, dass die PFAS-Belastung stark durch Fremdmaterial wie z.B. Lebensmittelverpackungen beeinflusst ist. Hier wäre es angezeigt, das Kompostier-/Vergärgut vor der eigentlichen Prozessierung stärker zu kontrollieren. Dies würde es ermöglichen die PFAS im Fremdmaterial über die KVA zu entsorgen und eine Verteilung über den Kompost vermeiden helfen.

Wie bereits in den einzelnen Kapiteln aufgeführt, empfehlen wir aus dieser Situation weitere Abklärungen zu PFAS in Abfallströmen in der Schweiz, um allfälligen weiteren Handlungsbedarf definieren zu können. Dabei sollten, insbesondere betreffend der zu messenden Parameter, die politischen Vorstösse weiter verfolgt werden, so dass die Messungen für die gleichen Parameter durchgeführt werden können (z.B. Summe x PFAS oder TOP Assay), die für die Definition von allfälligen Grenzwerten verwendet werden. Für die hier untersuchten Entsorgungswege sind mit erster Priorität folgende Abklärungen zu empfehlen:

Für die Abfallverbrennung:

- weitere PFAS Messungen in Schlacke und Flugasche von KVA um mögliche Auswirkungen auf die Deponierung abzuschätzen
- weitere PFAS Messungen in Abluft und Abwasser von KVA insbesondere inklusive Messung von Hintergrundwerten um abzuklären, ob die KVA über diese Emissionswege eine Quelle von PFAS darstellen
- PFAS Messungen in Schlacke, Flugasche, Abluft und Abwasser von Sonderabfallverbrennungsanlagen um abzuklären ob bzw. unter welchen Bedingungen die Hochtemperaturverbrennung die potenziellen Freisetzungen von PFAS in die Umwelt minimieren kann
- PFAS-Messungen im Gips aus den Wäschern der Abluftreinigung, sofern dieser als Produkt in KVA/SAVA anfällt



Für das Recycling:

- PFAS Messungen im Prozesswasser inklusive Messung von Hintergrundwerten um abzuklären, das Prozesswasser einen relevanten Emissionspfad darstellt
- PFAS Messungen in der Abluft falls diese PFAS enthalten könnte (z.B. Batterierecycling)
- PFAS Messungen in entstehenden Abfällen (z.B. Faserschlämme aus dem Altpapierrecycling) um eine sachgerechte Entsorgung sicherzustellen
- PFAS Messungen in recycelten PET Flaschen um zu überprüfen, ob vorgesehene Grenzwerte für Lebensmittelverpackungen eingehalten werden
- PFAS Messungen in weiteren recycelten Materialien wie z.B. Recyclingfasern um den Eintrag in den Recyclingkreislauf abzuschätzen

Für die Kompostierung / Vergärung:

- Neben der stärkeren Kontrolle des Eingangsmaterial bei der Kompostierung und Vergärung, PFAS Messungen im Kompost um abzuklären, ob aktuell PFAS Konzentrationen über der Hintergrundbelastung von Böden in der Schweiz vorliegen

Literatur

- [1] AIK Technik AG (2024). <https://www.aiktechnik.ch/kehrichtverbrennung/>. Zugriff am 17.07.2024.
- [2] Müve Biel-Seeland AG. <https://mueve.ch/verwertung/wie-funktioniert-eine-kva/>. Zugriff am 17.07.2024.
- [3] Björklund, S., Weidmann, E., Jansson, S., Emission of Per- and Polyfluoroalkyl Substances from a Waste-to-Energy Plant – Occurrence in Ashes, Treated Process Water, and First Observation in Flue Gas. *Environ. Sci. Technol.*, 57, 2023, DOI: 10.1021/acs.est.2c08960.
- [4] Bundesamt für Umwelt, BAFU (2021). Kehrlichtverbrennungsanlage: Abgasreinigung in der KVA: eine Erfolgsgeschichte. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/dossiers/magazin2021-1-dossier/abgasreinigung-in-der-kva-eine-erfolgsgeschichte.html>. Zugriff am 16.07.2024.
- [5] Fabian Schmidt (19.09.2012). Sondermüllverbrennung. <https://www.dw.com/de/wohin-mit-giftigem-m%C3%BCll/a-16240407> (Zugriff am 18.07.2024).
- [6] CTU Clean Technology Universe AG. Thermische Verwertung von Sondermüll / Oxidation von Abluft und Abfällen. <http://ctu.ch/de/technologie/sondermuellverbrennung> (Zugriff am 18.07.2024).
- [7] Björklund, S, Weidemann, E, Jansson, S (2024). Distribution of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in a Waste-to-Energy Plant – Tracking PFASs in Internal Residual Streams. *Sci. Technol.*, 58, 8457-8463. DOI: 10.1021/acs.est.3c10221.
- [8] European Chemicals Agency, ECHA (2023). Annex to the Annex XV Restriction Report – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS); Version 2.
- [9] Umweltbundesamt, UBA (2024). Untersuchung des Vorkommens von PFAS (Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen) in Abfallströmen – Abschlussbericht. Texte 85/2024. Dessau-Roßlau. ISSN 1862-4804.
- [10] Bundesamt für Umwelt, BAFU (2023). Bericht zur Erhebung der Kehrichtsackzusammensetzung 2022. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/statistik/bericht_kehrichtsackanalyse_2022.pdf.download.pdf/bericht_kehrichtsackanalyse_2022.pdf
- [11] Bundesamt für Umwelt, BAFU (2023). Abfallmengen und Recycling 2022 im Überblick. Aktenzeichen: BAFU-D-963E3401/431. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/zustand/daten.html>. Zugegriffen am 25.07.2024.
- [12] Studie im Auftrag des BAFU, Entscheidungsgrundlagen für den Vollzug bei PFAS-belasteten Standorten in der Schweiz, 2021
- [13] Awad, R, Bolinius, D.J., Strandberg, J, Yang, J, Sandberg, S, Bello, M, Gobelius, L, Egelrud, L., Härnwall, L (2021). PFAS in waste residuals from Swedish incineration plants – A systematic investigation. IVL Swedish Environmental Research Institute. ISBN: 978-91-7883-299-6.
- [14] UBA (2020). PFAS - Gekommen, um zu bleiben. Schwerpunkt, Magazin des Umweltamtes 1/2020. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/uba_sp_pfas_web_0.pdf (Zugriff am 06.08.2020)
- [15] Timshina, A, Robey, N, Oldnettle, A, Barron, S, Mehdi, Q, Cerlanek, A, Townsend, T, Bowden, J (2024). Investigating the sources and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in food waste compost. *Waste Management*, Volume 180, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.03.026>
- [16] Biek, S, Khudur, L, Ball, A (2023). Challenges and Remediation strategies for per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) contamination in composting. *Sustainability* 2024, 16, 4745. DOI: 10.3390/su16114745
- [17] Department of Environment, Science and Innovation, Queensland Government (2024). Information sheet – Monitoring and testing of PFAS in organic material processing (composting). ESR/2024/6782. https://www.desi.qld.gov.au/policies?a=272936:policy_registry/pr-is-pfas-limits-in-compost-era53.pdf (Zugriff am 06.08.2024)
- [18] Saha, B, Ateia, M, Fernando, S, Xu, J, DeSutter, T, Iskander, S (2024). PFAS occurrence and distribution in yard waste compost indicate potential volatile loss, downward migration, and

- transformation. *Environmental Science Processes & Impacts*. 26, 657. DOI: 10.1039/d3em00538k
- [19] Hofman, J, Berghmans, P, Otten, G, Lefebvre, W, Reis de Carvalho, A, Jacobs, G (2023). CASE : MONITORING PFAS SCHOUWEMISSIONS UIT DRAAITROMMELOVEN (DTO 2) VAN INDAVER NV: Samenvatting resultaten 2021-2023. Departement Omgeving en deels in opdracht van Indaver. <https://indaver.com/expertise/safe-sink/rotary-kilns-belgium/sustainable-destruction-of-pfas-waste> (Zugriff am 07.08.2024).
- [20] Gilbert Kuepouo , Nikola Jelinek , Lee Bell, Jindrich Petrlik, Valeriya Grechko (2022). Trials of Burning PFASs Containing Wastes in a Waste Incinerator and Cement Kiln assessed against Stockholm Convention Objectives. https://ipen.org/sites/default/files/documents/dioxin2022_pfas-australia_f.pdf
- [21] Glüge, J, Scheringer, M, Cousins, I T, DeWitt, J C, Goldmann, G, Herzke, D, Lohmann, R, Ng, C A, Trier, X, Wang, Z (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)", *Environmental Science: Processes Impacts*, Volume 22, 2345. Doi: 10.1039/d0em00291g
- [22] Zvei e. V. (2023). Factsheet "PFAS in Batteries". https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Themen/Nachhaltigkeit_Umwelt/PFAS/12-ZVEI-PFAS-Factsheet-Batteries.pdf (Zugriff am 20.08.2024)
- [23] Bundesamt für Statistik (2024). Abfallverwertung (Recycling) – Haushalt und Gewerbe. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/umweltindikatoren/alle-indikatoren/reaktionen-der-gesellschaft/recycling.assetdetail.30645408.html> (Zugriff am 20.08.2024)
- [24] Umweltbundesamt UBA (2023). Kunststoffabfälle. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#kunststoffe-produktion-verwendung-und-verwertung> (Zugriff am 20.08.2024)
- [25] AWEL Zürich, PFAS-Merkblatt für Altlastenvollzug Kt. Zürich, 2023, <https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/abfall-rohstoffe/altlasten/schadstoffen/PFAS-Merkblatt%20Altlastenvollzug.pdf>
- [26] AUE Basel-Stadt, Merkblatt PFAS Altlastenvollzug Kanton Basel-Stadt, 2023, https://media.bs.ch/original_file/92616d7a96baea5bf64c9e9cab761f95eab75020/merkblatt-pfas-altlastenvollzug-bs.pdf
- [27] Kanton Aargau, Umgang mit PFAS bei belasteten Standorten, 2024, <https://www.ag.ch/de/verwaltung/bvu/umwelt-natur-landschaft/umwelt/belastete-standorte-altlasten/umgang-mit-pfas-bei-belasteten-standorten>
- [28] Biek, S, Khudur, L, Ball, A (2023). Challenges and Remediation strategies for per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) contamination in composting. *Sustainability* 2024, 16, 4745. DOI: 10.3390/su16114745
- [29] Saha, B, Ateia, M, Fernando, S, Xu, J, DeSutter, T, Iskander, S (2024). PFAS occurrence and distribution in yard waste compost indicate potential volatile loss, downward migration, and transformation. *Environmental Science Processes & Impacts*. 26, 657. DOI: 10.1039/d3em00538k
- [30] Dänisches Umweltministerium, C. Lassen, J. Maag, A. Krag, M.S. Dau, Substance Flow Analysis of PFASs in Denmark, 2024
- [31] Bundesamt für Energie BFE und Bundesamt für Umwelt, Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlberechnung der Schweizer KVA nach europäischem Standardverfahren, Bern, 2024
- [32] Europäische Chemikalien Agentur, Registry of restriction intentions until outcome, Restricting the use of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in fire-fighting foams. <https://echa.europa.eu/de/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e1856e8ce6>
- [33] Sivaram, A, Panneerselvan, L, Surapaneni, A, Lee, E, Kannan, K, Megharaj, M (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in commercial composts, garden soils, and potting mixes of Australia. *Environmental Advances*, 7, 100174. Doi: 10.1016/j.envadv.2022.100174.



- [34] Choi, Y.J., Kim Lazcano, R., Yousefi, P., Trim, H., Lee, L.S., 2019. Perfluoroalkyl acid characterization in US municipal organic solid waste composts. *Environ Sci Technol, Lett.* 6, 372-377. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.9b00280>.
- [35] Brändli, R, Bucheli, T, Kupper, T, Zennegg, M, Berger, U, Edder, P, Oehme, M, Müller, J, Schaffner, C, Furrer, R, Schmid, P, Huber, S, Ortelli, D, Iozza, S, Stadelmann, F.X, Tarradellas, J (2006). Organic pollutants in source-separated compost. *Organohalogen Compounds*, Vol. 68.
- [36] Goossen, C, Schattman, R, MacRae, J (2023). Evidence of compost contamination with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from "compostable" food serviceware. *Biointerphases* 18, 030501. Doi: 10.1116/6.0002746.
- [37] Bundesamt für Landwirtschaft BLW - Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF (2024). Weisungen zu Artikel 30 Absatz 3 der Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern (Dünger-Verordnung, DüV) zur Mindestanalysehäufigkeit für Kompost und Vergärungsprodukte. Aktenzeichen: BLW-553.5-7878/41/31.
- [38] Department of Environment, Science and Innovation, Queensland Government (2024). Information sheet - Monitoring and testing of PFAS in organic material processing (composting). ESR/2024/6782. https://www.desi.qld.gov.au/policies?a=272936:policy_registry/pr-is-pfas-limits-in-compost-era53.pdf.
- [39] Aleksandrov, K, Gehrman, HJ, Hauser, M, Mätzing, H, Pigeon, D, Stapf, D, Wexler, D. (2019). Waste incineration of Polytetrafluoroethylene (PTFE) to evaluate potential formation of per- and Poly-Fluorinated Alkyl Substances (PFAS) in flue gas, *Chemosphere* 226
- [40] Bundesamt für Umwelt BAFU (2013). Klärschlamm Entsorgung in der Schweiz - Klärschlammhebung 2012. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/biogene-abfaelle/abfallarten/klaerschlamm.html>.
- [41] Bundesamt für Umwelt BAFU (2023). Abfallmengen und Recycling 2022 im Überblick. Aktenzeichen: BAFU-D-963E3401/431.
- [42] Schleiss, K (2017). Abschlussbericht: Erhebung Schweizer Daten zu Mengen in der Kompostierung, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Schlussbericht. Bern, 17.11.2017.
- [43] Europäische Kommission, Verordnung (EG) Nr. 1935/2004 des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Oktober 2004 über Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen und zur Aufhebung der Richtlinien 80/590/EWG und 89/109/EWG.
- [44] Bundesamt für Umwelt BAFU (2024). Kunststoffe. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/kunststoffe.html> (Zugriff am 20.09.2024).
- [45] Naturschutzbund Deutschland - NABU. Recycling und der Gelbe Sack: It's complicated! Warum Verbraucher*innen dennoch trennen sollten. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/21113.html> (Zugriff am 20.09.2024).
- [46] RECHARGE aisbl (2021). PFAS restriction proposal - RECHARGE statment for 2nd Call for Evidence - October 2021. https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2022/09/Call-for-Evidence_RECHARGE_-_PFAS-restriction-V1.pdf
- [47] Rensmo, A, Savvidou, E, Cousins, I, Hu, X, Schellenberger, S, Benskin, J (2023). Lithium-ion battery recycling: a source of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) to the environment? *Environmental Science Processes & Impacts*, 25, 1015. Doi: 10.1039/d2em00511e.
- [48] Guelfo, J, Ferguson, P, Beck, J, Chernick, M, Doria-Manzur, A, Faught, P, Flug, T, Gray, E, Jayasundara, N, Knappe, D, Joyce, A, Meng, P, Shojaei, M (2024). Lithium-ion battery components are at the nexus of sustainable energy and environmental release of per- and polyfluoroalkyl substances. *Nature Communications* 15; 5548. Doi: 0.1038/s41467-024-49753-5.
- [49] Stone, M. As electric vehicles take off, we'll need to recycle their batteries; *National Geographic*; 2021. <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/electric-vehicles-take-off-recycling-ev-batteries> (Zugriff am 23.09.2024).
- [50] Baum, Z, Bird, R, Yu, X, Ma, J (2022). Lithium-Ion Battery Recycling - Overview of Techniques and Trends. *ACS Energy Letters*, 7, 2, 712-719. Doi: 10.1021/acsenergylett.1c02602.



- [51] Bundesamt für Umwelt, Abfallstatistiken, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/zustand/daten.html>
- [52] EA Engineering, Science, and Technology, Inc., Report on PFAS Destruction Testing Results at Clean Harbors' Aragonite, Utah Hazardous Waste Incinerator, 2021, <https://www.wastedive.com/news/clean-harbors-incinerator-pfas-forever-chemicals/640829/>
- [53] USEPA, Interim Guidance on the Destruction and Disposal of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances and Materials Containing Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances – Version 2 (2024), <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-04/2024-interim-guidance-on-pfas-destruction-and-disposal.pdf>
- [54] Umwelt Zentralschweiz – Amt für Landwirtschaft und Umwelt Kanton Obwalden (2021). Jetzt handeln die Kantone. <https://www.umwelt-zentralschweiz.ch/was-wir-machen/news/recycling-bauabfaelle/#:~:text=Die%20Schweizer%20Bauwirtschaft%20produziert%2075,des%20gesamten%20Schweizer%20M%C3%BClls%20aus> (Zugriff 25.09.2024).
- [55] Verein PRS PET-Recycling Schweiz. Schweizer PET-Kreislauf. <https://petrecycling.ch/schweizer-pet-kreislauf/> (Zugriff 25.09.2024).
- [56] Plastic Pollution Coalition (2024). Study finds hundreds of thousands of plastic particles in bottled water. <https://www.plasticpollutioncoalition.org/blog/2024/1/10/study-finds-hundreds-of-thousands-of-plastic-particles-in-bottled-water#:~:text=Plastic%20PET%20bottles%20are%20even,to%20human%20and%20environmental%20health> (Zugriff am 25.09.2024).
- [57] Bundesamt für Umwelt BAFU (2016). Das KAR-Modell für die Schweiz - Ein integrales Modell von Kies, Aushub und Rückbaumaterial. https://www.kar-modell.ch/resultat_statMod.html (Zugriff am 25.09.2024)
- [58] Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft – Kanton Zürich – Sektion Abfallwirtschaft (2024). Bauabfallanlagen. <https://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/abfall-rohstoffe/abfaelle/abfallanlagen/bauabfallanlagen.html#935568488> (Zugriff am 25.09.2024).
- [59] Thalmann, B, Hofer, C, Wächter, D, Kulli, B (2022) Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in Schweizer Böden, Altlasten Spektrum, 6
- [60] Stiftung Autorecycling Schweiz, Jahresbericht 2023, <https://stiftung-autorecycling.ch/downloads>
- [61] Umweltbundesamt Österreich (2023). Report REP-0859, PER- UND POLYFLUORIERTE ALKYLSTANZEN - Methodenvergleich zur Bestimmung von PFAS in Wasserproben, Wien.
- [62] Bundesinstitut für Risikobewertung (2020). Fragen und Antworten zu per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS), September. <https://www.bfr.bund.de/cm/343/fragen-und-antworten-zu-per-und-polyfluorierten-alkylsubstanzen-pfas.pdf>
- [63] Gehrman, HJ Taylor, P, Aleksandrov, K, Bergdolt, P, Bologna, A, Byle, D, Dalal, P, Gunasekar, P, Herremanns, S, Kapoor, D, Michell, M, Nuredin, V, Schlipf, M, Stapf, D (2024). Mineralization of fluoropolymers from combustion in a pilot plant under representative european municipal and hazardous waste combustor conditions. Chemosphere 365, 143403. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.143403
- [64] Ringmann, S, Burgener, S (2024). Analytik von PFAS im Abgas der KVA Linth. Fachvortrag im Rahmen des 28. Dreiländertreffens 13.-15. Oktober 2024. Neuchâtel. https://www.datocms-assets.com/134367/1729509137-09_pfas-analytik-im-abgas-der-kva-linth_s-ringmann.pdf
- [65] Gausen-Freidl, B (2024). Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen in KVA-Rückständen - Daten-Erhebung Schweizer KVA 2024. Vortrag im Rahmen einer Konferenz. Nr. 3LT2024 Neuchâtel. https://www.datocms-assets.com/134367/1729509038-08_pfas-in-kva-ruckstanden_b-gausen-freidl.pdf
- [66] Weibel, G, Kämpfer, P (2024). PFAS-Belastungen von Typ D-Deponien, Universität Bern, Bericht im Auftrag des AWEL, Zürich



Der Projektleiter

Econetta AG

Dr. Christian Braun

Dr. Karina Urmann

Schlieren, Dezember 2024

Projekt: PFAS VBSA, 24310005000

Sachbearbeitung: Dr. Nadine A. Sossalla

Econetta AG hat diese Untersuchung unter Einsatz ihres besten professionellen Könnens und in Übereinstimmung mit allgemein anerkannten Grundsätzen ausgeführt. Die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen im Untersuchungsbericht stützen sich auf die der Econetta AG zum Zeitpunkt der Bericht-verfassung vorliegenden Informationen. Diese Erkenntnisse und Schlussfolgerungen können nicht unüberprüft auf zukünftige Verhältnisse übertragen werden

