

Feuerwehr: AFFF, PFAS, PFOS & Co.

Fluorhaltige Löschschäume – Eine kontroverse Diskussion

15.03.19 | Autor / Redakteur: Dr. Karl Noé; Dr. Thomas Held* / [Wolfgang Ernhofer](#)



Zur Brandbekämpfung setzen Feuerwehren u.a. auch auf Löschschäume. (Bild: Andrejs Zavadskis)

Viele Hochleistungs-Löschschäume enthalten u.a. die außerordentlich stabilen poly- und perfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS). Da sich diese in der Umwelt anreichern, werden sie vermehrt durch fluorfreie Verbindungen ersetzt. Dies erfordert umfangreiche Maßnahmen zur Dekontaminierung der bisher eingesetzten Gerätschaften sowie die Sanierung der eingetretenen Umweltschäden.

Weltweit sind in vielen Bereichen angemessene Brandschutzsysteme und Notfallmaßnahmen von hoher Bedeutung. Ein wirksames Brandschutz-

Management muss jedoch mit den Auswirkungen auf die Umwelt in Einklang gebracht werden. Das Löschen von Flüssigkeitsbränden in verschiedenen Industriebereichen wie beispielsweise der chemischen Industrie, der Mineralölindustrie und auf Flughäfen stellt eine besondere Herausforderung an die zu verwendenden Löschmittel. Mit der Erfindung der sogenannten Aqueous Foam Forming Films (AFFF) [1] glaubte man eine optimale Lösung gefunden zu haben. Diese Löschschäume enthalten u.a. poly- und perfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS), die auf den brennenden Flüssigkeiten einen Film ausbilden, der den Sauerstoffzutritt minimiert, den Brand quasi erstickt und eine weitere Ausgasung des Brennstoffes verhindert. Zudem sind die PFAS chemisch und thermisch außerordentlich stabil, was sie für den vorgesehenen Einsatz prädestiniert.

Die chemische Stabilität, so meinte man früher, sollte auch dafür sorgen, dass die Stoffe biologisch inert und somit inaktiv sind. Gerade letzteres, die Inaktivität hat sich als Irrtum herausgestellt. Vielmehr binden die perfluorierten Verbindungen (hier Perfluorcarbon- und -sulfonsäuren) bevorzugt an Proteinstrukturen, so auch in den besonders proteinreichen Organen von Menschen und Tieren (u.a. Blut, Leber), was eine Reihe von toxischen Effekten auslösen kann bis hin zu der vermuteten karzinogenen Wirkung von Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) (sogenannte C8-Verbindung). Dies hat dazu geführt, dass zunächst PFOS und PFOS-basierte Verbindungen in den meisten seiner Anwendungen quasi verboten sind. Auch die Anwendung von PFOA (Perfluoroctansäure) ist stark eingeschränkt.

Ausgehend von den Einsätzen der AFFF-Löschsäume findet man heute an vielen Standorten eine Kontamination von Boden und im Grundwasser mit zum Teil kilometerlangen Schadstoffahnen. Solche Kontaminationen machen aufwändige und meist auch teure Sanierungsverfahren erforderlich.

Dem steht die Hauptaufgabe eines Rettungs- und Feuerlöschdienstes gegenüber: Leben und Sachwerte zu retten sowie Gefahren abzuwehren. Der Ausweg aus diesem Dilemma (Umweltbelastung vs. Lebensrettung) besteht in einer Reihe von Maßnahmen. Vor allem kann ein entsprechendes Training der Feuerwehren und eine Risikoanalyse bereits im Vorfeld einen adäquaten Einsatz (Begrenzung des Einsatzes potenziell umweltgefährdender Löschsäume auf das notwendige Mindestmaß) ermöglichen [2]. Auch die Bereitstellung von wenig umweltgefährdenden Mitteln für den Feuerlöscheintritt ist von hoher Bedeutung. Im Verbindung mit einem effizienten Löschwasserrückhalt, einem raschen Entfernen der Löschsäume und Aufbereitung nach deren Einsatz, einer Kommunikation mit den Umweltbehörden und im Schadensfall einer raschen Untersuchung von Boden und Grundwasser sowie durch eine gegebenenfalls erforderliche rasche Sanierungsmaßnahme können Umweltschäden minimiert werden.

Poly- und Perfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)

PFAS, die wichtigsten Bestandteile der AFFF-Löschsäume werden seit den 1940er Jahren industriell eingesetzt. Die Substanzen stoßen Öl und Wasser ab, was sie für viele industrielle Anwendungen interessant machen. Es gibt rund 3000 verschiedene Verbindungen [3], nur eine kleine Anzahl (ca. 25) sind davon in kommerziellen Analysen nachweisbar. Perfluorierte PFAS sind Säuren, wobei alle C-Atome mit einem Fluoratom verbunden sind. Die in frühen Löschsäumen häufig verwendete Verbindung ist Perfluorooctansäure (PFOS) (Abbildung 2). Daneben wurden auch sogenannte polyfluorierte Verbindungen (u.a. Fluortelomere, FTOH) eingesetzt mit noch relativ langen perfluorierten Kohlenstoffketten. Später dann wurden Fluortelomere mit kürzeren perfluorierten Kohlenstoffketten verwendet sowie eine Vielzahl weiterer polyfluorierter Verbindungen. Allen polyfluorierten Verbindungen ist gemein, dass sie mikrobiell teilabgebaut (transformiert) werden können. Als stabile Endprodukte entstehen dann Perfluorcarbon- und -sulfonsäuren. Für diese Endprodukte gibt es Konzentrationsgrenzwerte für Grund- und Trinkwasser. Wegen der Teilabbaubarkeit zu den stabilen Endprodukten bezeichnet man die polyfluorierten Ausgangsverbindungen als Precursor [7].

Daneben werden vermehrt auch Ersatzstoffe mit fluorierten Segmenten, die durch Etherbindungen verbunden sind, in Feuerlöschsäumen eingesetzt.

Analytisch ist die Vielzahl der Precursor kaum nachweisbar. Abhilfe, um die mögliche Belastung in ihrer Gesamtheit zu erkennen, kann beispielsweise das TOP-[Verfahren](#) (Total Oxidizable Precursor, Abbildung 3) schaffen. Dabei wird eine Probe zunächst normal analysiert, dann werden alle Precursor durch ein chemisches Oxidationsverfahren zu Perfluorcarbon- und -sulfonsäuren abgebaut und die Probe nochmals analysiert. Aus der Zunahme der Konzentrationen der Perfluorcarbon- und -sulfonsäuren kann auf den Gehalt an Precursor zurückgeschlossen werden. Manche modernen Feuerlöschschäume enthalten keinerlei mit herkömmlicher Analytik nachweisbaren PFAS. Erst die TOP-Analytik erlaubt eine Überprüfung des Gehaltes an Fluorverbindungen. Non-Precursor wie die Etherverbindungen werden durch das Verfahren vermutlich nicht erfasst. In der Natur findet die mikrobiell katalysierte Freisetzung zu den gesetzlich regulierten Perfluorcarbon- und -sulfonsäuren nur langsam und mit einer gewissen Zeitverzögerung statt.

Es gibt zunehmend Untersuchungen, die PFAS mit Risiken für die menschliche Gesundheit und öko-logischen Schäden in Verbindung bringen. Das vermehrte Auftreten der PFAS in der Trinkwasserversorgung, die dauerhaften Persistenz der PFAS in der Umwelt und die Fähigkeit der PFAS, im Grundwasser problemlos Entfernungen von mehreren Kilometern zurücklegen zu können, führen zu einer verstärkten Wahrnehmung der PFAS-Belastungen bei Anwendern, Behörden und der Öffentlichkeit. Das sich stetig verbessernde Verständnis der Toxizität der PFAS sowie die Bioakkumulation besonders der langkettigen PFAS haben zu strengen Grenzwerten im Trinkwasser und Grundwasser geführt.

AFFF-Löschsäume

AFFF-Löschsäume gehören zu den Klasse-B-Feuerlöschsäumen, welche geeignet sind, entflammbare oder brennbare Stoffe wie Teere, Fette, Öle, Benzin sowie Lösemittel und Alkohole effektiv zu löschen. Klasse-B-Säume können PFAS enthalten, es gibt aber auch fluorfreie Klasse-B-Säume. Derzeit auf Lager befindliche oder neue Löschsäume, die als AFFF gekennzeichnet sind, enthalten immer PFAS. Daneben kommen filmbildende Fluorprotein-Löschmittel (FFFP) und Fluorprotein-Löschmittel (FP) zum Einsatz.

Frühe AFFF-Löschsäume enthielten vor allem PFOS oder PFOS-basierte Verbindungen (C8-Verbindungen). Einige der bereits seit den 1970er Jahren (bis 2016) hergestellten Löschsäume enthalten Precursor, die in der Umwelt zu PFOA abgebaut werden können. Zum einen gehen die Bestrebungen seit dem endgültigen Anwendungsverbot PFOS-haltiger Löschsäume in der EU zum 27.06.2011 zur Entwicklung fluorfreier Löschsäume, zum anderen in Richtung Ersetzung der

fluorierten C8-Verbindungen durch kürzerkettige, weniger bioakkumulative Verbindungen. Moderne Löschsäume enthalten fast ausschließlich Precursor mit kurzkettigen Perfluoralkansäuren. Diese können jedoch noch in Spurenbereichen PFOA und PFOA-basierte Precursor enthalten, welche als Nebenprodukte im Herstellungsprozess entstehen. Neben kurzkettigen Perfluoralkansäuren werden vermehrt Ersatzstoffe mit fluorierten Segmenten, die durch Etherbindungen verbunden sind, eingesetzt. Fluorhaltige Ersatzstoffe sind von ihrem chemischen Charakter her außerordentlich vielfältig. Studien zur Human- und Ökotoxikologie liegen für viele dieser PFAS, die als Ersatzstoffe für PFOS und PFOA eingesetzt werden, nur in sehr geringem Umfang vor, so dass eine verlässliche Risikobewertung aktuell nicht möglich ist. Es gibt jedoch zunehmend Bedenken, was diese Ersatzstoffe anbelangt.

Fluorfreie Ersatzstoffe

Mit dem weltweit zunehmenden regulatorischen Fokus auf PFAS hat neben der effektiven Feuerlöschung die Umwelthaftung mehr und mehr Beachtung erfahren. Es besteht ein erhebliches Interesse, fluorhaltige durch fluorfreie Feuerlöschsäume (F3) der Klasse B zu ersetzen. Zwar wird noch immer kontrovers diskutiert, ob F3-Feuerlöschsäume die gleiche Löschqualität aufweisen wie fluorhaltige Produkte. Aber bereits seit dem Anwendungsverbot PFOS-haltiger Löschsäume sind zunehmend fluorfreie Löschmittel auf den Markt gekommen. Die Leistung dieser Löschsäume hat sich im letzten Jahrzehnt deutlich verbessert [5] und dürfte sich auch in Zukunft noch weiter verbessern, so dass viele schwierige Brände heute schon ohne PFAS effektiv gelöscht werden können. Im Ergebnis produzieren die meisten Hersteller heute vor allem Klasse-B-FFF-Löschsäume [4]. Die verbesserte Löschleistung ist nicht nur neuen Produkten, sondern auch den Fortschritten in der Löschsäumtransporttechnologie (z. B. Druckluftschaumsysteme) zu verdanken, mit denen Brände weitaus effektiver und aus größerer Entfernung gelöscht werden können als bisher. F3-Löschsäume haben daher die entsprechenden Zertifizierungen erhalten, einige haben sogar die höchsten Löschrufen der International Civil Aviation Organization (ICAO) bestanden [1].

Diese Entwicklungen werden auch von den Anwendern angenommen. In jüngster Zeit haben die zivile Luftfahrt, die petrochemische Industrie und Behörden in Australien, Asien und Europa die Beschaffung PFAS-freier F3-Feuerlöschsäume priorisiert. In Skandinavien werden seit einigen Jahren F3-Löschsäume vom Militär eingesetzt. Diese bieten eine gleichwertige Löschleistung für die überwiegende Mehrheit der Brände ohne Gesundheits- und Umweltrisiken, vor allem, weil sie biologisch abbaubar sind. Nur in sehr wenigen Bereichen ist noch der Einsatz fluorhaltiger AFFF-Löschsäume unumgänglich. In diesen Fällen müssen besondere Maßnahmen zum Schutz der Umwelt ergriffen werden. Aber auch hier lassen die Entwicklungen einen weiteren Rückgang des Einsatzes fluorhaltiger AFFF-Löschsäume erwarten.

Problematisch ist, dass in manchen fluorfreien Löschmitteln, um die Anforderungen einer Beständigkeit gegenüber den Flüssigprodukten und Einsetzbarkeit mit vorhandenem Löschequipment erfüllen, Siloxane und Silikonpolymere verwendet werden. Diese haben jedoch eine nicht unerhebliche aquatische Toxizität, sind ebenfalls bioakkumulierend und persistent. Auch synthetische Tenside haben vermutlich eine nicht unerhebliche aquatische Toxizität und führen zu einer hohen Sauerstoffzehrung in Gewässern. Es gibt hierzu jedoch gegenwärtig nur wenige Daten. Fluorfreie Schaummittel sind somit nicht zwangsläufig umweltfreundlich und erfordern daher einen verantwortungsvollen Einsatz.

Ersetzen der fluorhaltigen Löschsäume

Viele Anwender und Firmen beginnen, PFAS-basierte Feuerlöschschäume gegen PFAS-freie F3-Löschsäume auszutauschen. Dafür ist zunächst eine Bewertung der möglichen Einsatzbereiche und der Leistungsfähigkeit der Feuerlöschschäume erforderlich. Die Kosten für die Änderung der Infrastruktur zur Löschaumbereitstellung und zur Beseitigung von alten PFAS-Löschsäumen sind in der Regel gering im Vergleich zu potenziellen künftigen Umweltschäden, die auf eine anhaltende Verwendung von PFAS-basierten Löschsäumen zurückgehen. Beim Ersetzen fluorhaltiger Löschsäume durch PFAS-freie Löschsäume sind folgende Punkte zu beachten:

- Kontamination der vorhandenen Infrastruktur mit PFAS,
- Entsorgung von alten Löschsäumen,
- Änderung der Löschinfrastuktur sowie
- Schulungen im Umgang mit den neuen Löschmitteln.

Gerade die Dekontaminierung der Löschinfrastuktur stellt eine besondere Herausforderung dar. PFAS tendieren dazu, sich stark an Wandungen und Dichtungen anzuheften. Ein einfaches Ablassen der PFAS-haltigen Löschmittel, Spülen mit Wasser und Einfüllen der PFAS-freien Löschsäume führt in der Regel zu keiner nachhaltigen Dekontaminierung. Stattdessen werden im vermeintlich PFAS-freien Löschaum über lange Zeiten hinweg noch PFAS in geringer Konzentration nachgewiesen. Die Dekontaminierung erfordert daher ein zielgerichtetes Verfahren, das das mehrmalige Spülen mit jeweils unterschiedlichen Zusätzen (u.a. Lösemittel, die die PFAS verstärkt desorbieren) sowie die analytische Überprüfung der PFAS-Freiheit umfasst. Aufgrund der Tatsache, dass viele moderne fluorhaltige Löschsäume ausschließlich Precursor enthalten, die mit der kommerziellen Analytik nicht nachweisbar sind, ist für die analytische Überprüfung der PFAS-Freiheit das sogenannte TOP-Verfahren erforderlich, welches Precursor für die chemische Analytik „sichtbar“ macht. Mit der geschilderten Vorgehensweise haben wir sehr gute Ergebnisse erzielt.

Die Dekontaminierung muss an Feuerlöschfahrzeugen genauso erfolgen wie an Vorratsbehältern oder stationären Einrichtungen. Es sind dabei sämtliche Umweltvorschriften einzuhalten und die PFAS-haltigen Spüllösungen müssen einer geordneten Entsorgung zugeführt werden.

Zusätzlich zur Dekontaminierung ist es notwendig, im Rahmen eines Risikomanagements die Brandschutztechnik und Brandschutzstrategien zu überarbeiten. In hoch gefährdeten Bereichen können darüber hinaus ergänzende bautechnische Maßnahmen dafür sorgen, dass Löschwasser im Brandfall aufgefangen und kontrolliert entsorgt werden kann. Zu diesem Themenkomplex gehört auch der Bau nachhaltig versiegelter und geschlossener Brandübungsbereiche mit den entsprechenden Ableitungen und Reinigungen der anfallenden Flüssigkeiten.

Belastung von Boden und Grundwasser

Was nach all den geschilderten Maßnahmen noch bleibt, sind vor allem die historischen Schäden im Boden und Grundwasser, die aus dem Einsatz von AFFF-Produkten in der Vergangenheit resultieren. Diese finden sich nicht nur an Stellen, an denen Brände gelöscht wurden, sondern vor allem im Bereich von Brandlöschübungsplätzen (oft auch diffus in deren Umgebung) sowie im Bereich von Feuerwachen und stationären, mit AFFF gefüllten Brandlöscheinrichtungen einschließlich PFAS-Lager. Verfrachtungen der PFAS-haltigen Löschsäume über Oberflächenentwässerungen, Regenrückhaltebecken und Abwasseraufbereitungsanlagen sind nicht selten.

Eine rasche Erkundung der kontaminierten Umweltmedien und rasche Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen hilft, eine weitere Ausbreitung der Schadstoffe und die daraus oftmals folgende Beeinträchtigung einer Trinkwassergewinnung zu verhindern bzw. umzukehren [6]. Hilfreich sind dabei die umfassende Bewertung und Modellierung der Umweltrisiken.

Sanierungsmaßnahmen erfordern ein detailliertes Verständnis der verschiedenen Möglichkeiten zur Sanierung PFAS-belasteter Böden und Grundwässer. Da PFAS in besonderem Fokus der Öffentlichkeit und der Behörden steht, ist der Druck zur Erkundung und Sanierung besonders groß. Die Grundlage für eine erfolgreiche Anwendung von Sanierungsverfahren ist aber immer ein zuverlässiges Verständnis der an einem Standort ablaufenden Prozesse. Dies wird als konzeptionelles Standortmodell bezeichnet. Wie gelangt man nun zu einem solchen Modell? Das geht nur über eine sorgfältige Erkundung von Boden und Grundwasser mit Berücksichtigung der Precursor und der lokalen Milieu-Bedingungen. Im Worst Case werden die vielfach der kommerziellen chemischen Analytik verborgenen Precursor erst weit abstromig des Schadensherdes scheinbar überraschend zu analysierbaren, „sichtbaren“ Verbindungen transformiert. Wir haben diese Transformationsprozesse untersucht und Abbaukinetiken bestimmt. Mit diesem Wissen ist man nun in der Lage ein Übersehen von Belastungen, die eventuell später teure Nachsanierungsmaßnahmen erforderlich machen könnten, zu vermeiden. Der nächste Schritt vor Beginn der Sanierungsplanung ist eine (öko)toxikologische Bewertung der gemessenen Schadstoffkonzentrationen (Risikoabschätzung).

Sanierungsverfahren

Derzeit identifizierte Sanierungsoptionen für Grundwasser und Boden sind hinsichtlich eingeschätzter Machbarkeit und Entwicklungsstand in Abbildung 4 zusammengestellt. Auch wenn einzelne Verfahren bis zur Marktreife entwickelt wurden, ist dies keine Garantie dafür, dass sie sich am Markt etablieren werden. Ausschlaggebend für den Einsatz dafür dürften die Erfahrungen sein, die mit der Anwendung der neuen Verfahren im technischen Maßstab noch zu sammeln sind und vor allem deren Kosten im Verhältnis zu herkömmlichen Sanierungsverfahren.

Nicht in jedem Fall sind die Verfahren wahlweise einsetzbar. Während beispielsweise einige Verfahren sich vor allem zur Behandlung von gering belasteten Wässern ohne große Konzentrationen an Störstoffen eignen, gibt es andere (beispielsweise Fällungsverfahren), die sich bevorzugt eignen, um höhere Konzentrationen von PFAS zu entfernen. Fällungsverfahren erzeugen jedoch einen Abfallschlamm.

Die Standardverfahren zur Sanierung von PFAS-Kontaminationen sind derzeit noch der Aushub und die Deponierung des belasteten Bodens und das Abpumpen und Reinigen des kontaminierten Grundwassers (Pump and Treat). Beide Verfahren sind aufwändig und kostenintensiv. Die Dauer von Pump-and-Treat-Maßnahmen kann verkürzt, wenn es gelingt, den Schadensherd rasch und effektiv zu sanieren. Es werden dann mit den versickernden Niederschlägen weniger bis keine PFAS in das Grundwasser verfrachtet und die Pump-and-Treat-Maßnahme fällt kürzer und kostengünstiger aus. Daher arbeiten wir derzeit bevorzugt an Möglichkeiten zur Schadensherdsanierung. Gute Erfahrungen haben wir in diesem Zusammenhang bereits mit der Immobilisierung der PFAS im grundwasserungesättigten Boden gemacht. Durch die Zumischung spezieller Reagenzien können die Schadstoffe gebunden werden. Im Eluat treten dann nur noch sehr geringe PFAS-Konzentrationen auf. Die Durchführung und der Erfolg von Immobilisierungsverfahrens ist von der Kontaminationsgeschichte abhängig. Erfolgte der PFAS-Eintrag sehr oberflächennah, können die Reagenzien mit landwirtschaftlichen Maschinen in den Boden eingearbeitet werden. Bei tiefer reichenden bodengebundenen Kontaminationen sind großkalibrige Bohrverfahren erforderlich, dabei wird die erbohrte Bodensäule aufgelockert und das Reagenz zur Immobilisierung eingemischt.

Optional kann die Immobilisierung auch auf ausgehobene PFAS-belastete Böden angewandt werden. Nach der Immobilisierung können die Böden dann auf Deponien verbracht werden, die die unbehandelten Böden nicht annehmen dürften. Wegen der Neuartigkeit dieser Vorgehensweise ist eine einzelfallspezifische Abstimmung mit den Behörden erforderlich.

Eine Alternative bei gut durchlässigen Böden mit geringer PFAS-Sorptionskapazität ist die In-situ-Bodenspülung. Dabei wird der Boden von der Oberfläche her intensiv beregnet und die PFAS rasch ausgespült und in das Grundwasser verfrachtet. Das durch die Ausspülung aus der ungesättigten Bodenzone dann höher belastete Grundwasser unterhalb des Beregnungsbereiches muss notwendigerweise gefasst und gereinigt werden. Dazu werden direkt unterstromig des Beregnungsbereiches Grundwasserentnahmebrunnen installiert, aus denen das PFAS-belastete Grundwasser abgepumpt und nachfolgend gereinigt wird. Ein Teil des gereinigten Wassers kann wieder zur Beregnung verwendet werden.

Bei dem Pump-and-Treat-Verfahren erfolgt die Reinigung von kontaminiertem Grundwasser in der Regel über Aktivkohle. Die PFAS binden an die Aktivkohle und diese wird nach vollständiger Beladung regeneriert. Auch wenn die Sorptionskapazität der Aktivkohle für (insbesondere die kurzkettigen) PFAS gering und das Verfahren dadurch weniger effizient ist, gelingt es uns doch, das Pump-and-Treat hinsichtlich der Kosten zu optimieren. Der Schlüssel dazu liegt in einem effizienten Kontaminationsmanagement mit einer Quellensanierung, einer Modellierung der Grundwasserströmung zur Minimierung der erforderlichen Fördermenge und zur optimalen Platzierung der Förderbrunnen und in einem Wechsel der induzierten Strömungsrichtungen. Durch letzteres werden bevorzugte Strömungsrichtungen aufgebrochen, der Grundwasserleiter effektiver durchspült und die PFAS entfernt. In einem Projekt konnten wir dadurch die erforderliche Förderrate mehr als 60 % vermindern.

Dennoch ist es empfehlenswert, solche Pump-and-Treat-Maßnahmen zu umgehen. Die PFAS sind in-situ (d.h. unter Verbleib im Grundwasserleiter) zwar nach aktuellem Kenntnisstand weder biologisch noch chemisch abbaubar, es sind aber bereits einige Verfahren entwickelt, die als Barrieren zur Sorption oder Abtrennung der PFAS aus dem Grundwasserstrom dienen. Entsprechend gibt es auch einige Neuerungen auf dem Markt, die helfen können die PFAS-Schäden kostengünstiger und effizienter als bisher zu sanieren. Wir sind aktuell in die Evaluierung und Erprobung einer Reihe neuer Sanierungsverfahren involviert.

Literatur

- [1]ITRC (2018): Aqueous Film-Forming Foam (AFFF). Hrg. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC).
https://pfas-1.itrcweb.org/wp-content/uploads/2018/10/pfas_fact_sheet_afff__10_3_18.pdf (06.12.2018).
 - [2]Bayerisches Staatsministerium des Innern und für Integration und Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2018): Umweltschonender Einsatz von Feuerlöschschäumen.
<https://www.sfgs.de/fileadmin/downloads/SFSG/Leitfaden.pdf>. (06.12.2018).
 - [3]Backe, W. J., Day, T. C., Field, J. A. (2013): Zwitterionic, cationic, and anionic fluorinated chemicals in aqueous film forming foam formulations and groundwater from U.S. military bases by nonaqueous large-volume injection HPLC-MS/MS. Environ Sci. Technol. 47, 5226-5234.
 - [4]Lastfire (2016): Large Atmospheric Storage Tank Fires. Foam Concentrate Usage and Options. Industry Position Paper. Issue 2, October 2016.
<http://www.lastfire.co.uk/uploads/Foam%20Position%20Paper%20Issue%202%20Oct%202016%20s.pdf> (10.12.2018)
 - [5]Lastfire (2019): Press Release: Lastfire Foam Application Test, Dallas Fort Worth Airport.
<http://www.lastfire.co.uk/uploads/LASTFIRE%20DFW%20Testing%20Press%20Release.pdf>. (06.12.2018).
 - [6]Held, T. (2015): Boden- und Grundwasserkontaminationen mit PFC bei altlastverdächtigen Flächen und nach Löschmitteleinsätzen - Arbeitshilfe zur flächendeckenden Erfassung, standortbezogenen historischen Erkundung und zur Orientierenden Untersuchung (Projektstufe 1) - (Projekt-Nr. B 4.14).
http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_4.14/index.jsp
 - [7]Held, T., Reinhard M. (2016): Analytierte PFAS – die Spitze des Eisbergs? altlasten spektrum 25 (05/16), 169 – 208.
- *Die Autoren arbeiten für Arcadis Germany in Darmstadt.

Copyright ©2019- Vogel Communications Group

Dieser Beitrag ist urheberrechtlich geschützt.
Sie wollen ihn für Ihre Zwecke verwenden?
Infos finden Sie unter www.mycontentfactory.de.