

# 06.22

Lizenziert für Herrn Frank Karg.  
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

31. Jahrgang  
Dezember 2022  
Seiten 157 – 204

# altlasten spektrum

[www.ALTLASTENDigital.de](http://www.ALTLASTENDigital.de)

Herausgegeben vom  
Ingenieurtechnischen Verband für Altlastenmanagement  
und Flächenrecycling e. V. (ITVA)



Organ des ITVA

## PFAS – „Forever Chemicals“ als umweltpolitische Herausforderung

Fragen an die Bundesumwelt-  
ministerin Steffi Lemke

## Bewertungsschwierigkeiten der PFAS-Belastungssituation und deren Auswirkungen auf den Wirkungspfad Boden-Grundwasser

Hans Ulrich Dahme

## Unterschätzen standard- mäßige wässrige Elutions- verfahren PFAS-Gehalte in Böden?

Lukas Lesmeister

## Einzelfallprüfung bei PFAS

Frank Karg, Ulrike Hintzen,  
Lucie Robin-Vigneron,  
Stephan Mostersteg

**ESV** ERICH  
SCHMIDT  
VERLAG

# Einzelfallprüfung bei PFAS:

## Anwendung der neuen Mantelverordnung für verhältnismäßige und kostenoptimierte Sanierungen bei Vielstoffbelastungen

Frank Karg, Ulrike Hintzen, Lucie Robin-Vigneron, Stephan Mostersteg

### 1. Einführung

PFAS: Per- und Polyfluoralkyl-Aliphaten sind toxische Substanzen, die seit den 1960er Jahren [1-2] langsam zu einem großen Umwelt- und Gesundheitsproblem geworden sind, da ihre Anwendung vielfältig und weit verbreitet war (und immer noch ist). Erst seit Anfang der 2010er Jahre begann die Öffentlichkeit, die Bedrohung der Umwelt und der öffentlichen Gesundheit durch PFAS wahrzunehmen. Infolgedessen finden wir heute aufgrund der fortgeschrittenen Umweltanalytik PFAS in Böden, Grundwasser, Lebensmitteln und Trinkwasser sowie eine Familie flüchtiger PFAS, die Fluortelomer-Alkohole (FTOH), im Bodengas (bzw. Bodenluft) sowie in der Raumluft. Es sind mehr als 9.000 synthetische PFAS-Schadstoffe bekannt [3-4].

Die Quellen der PFAS-Verunreinigungen sind vielfältig und befinden sich vor allem an Industriestandorten (Halbleiter, Textilien, Leder, Papier- & Fotoglanzmittel, medizinische Geräte, etc.), bei denen diese Stoffe verwendet und Abwässer produziert wurden,

sowie auf Standorten mit früheren Feuerereignissen oder Feuerwehr-Übungsplätzen, bei denen Feuerlöschschäume verwendet wurden. Auch landwirtschaftliche Flächen, auf denen PFAS-haltige Schlämme ausgebracht wurden, können verunreinigt sein.

Die PFAS-Schadstoffquellen sind sehr verschieden, wie z.B. aus Feuerlöschschäumen (AFFF: Aqueous Film Forming Foams) [5-6]. Dies gibt klar an, dass es sich bei den PFAS-Umweltkontaminationen meist um eine Vielstoffbelastungen handelt, welche in Boden- und Grundwasserkontaminationen aber auch in Bodengas (bzw. Bodenluft), Oberflächengewässern in der Raumluft und Nahrungsmitteln auftreten können [7-14]. Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit, diese Vielstoffbelastung zu bewerten und in der Gefährdungsabschätzung und Ableitung von standortspezifischen Maßnahmenwerten zu berücksichtigen. Formale Grundlage ist Paragraph § 15 (4) BBodSchV.

PFAS	Hepato- toxisch	Fötus- Entwick- lung	Repro- toxisch	Immuno- toxisch	Hämato- toxisch	Hormon- wirksam (Thyroide)	Neuro- toxisch	Tumor- bildend (karzinogen)
Perfluorcarboxylsäuren								
PFBA								
PFPeA								
PFHxA								
PFHpA								
PFOA								
PFNA								
PFDA								
PFUnA								
PFDoA								
Perfluorsulfonsäuren								
PFBS								
PFHxS								
PFOS								
Ethersulfonate								
ADONA								
HFPO-DAGenx								

Abb.1: Übersicht der toxikologischen Effekte gemäß [40].

Abkürzungserklärungen: Rot: In mehreren Labor-Tiertests bestätigt; Gelb: Extrapolierte Effekte; Grün: Negativ getestet.

## 2. Bewertungsgrundlagen: Toxikologie und Umweltchemie

### 2.1 Toxikologie

PFAS-Polymere des Typs „Teflon“ (oder PFTE usw.) haben keine gute Bioverfügbarkeit und sind daher relativ unbedenklich (wenn diese voll polymerisiert sind). Toxisch sind vor allem die monomeren PFAS (ein Phänomen, das wir aus dem Unterschied von PVC und Vinylchlorid kennen). Diese monomeren PFAS sind Gegenstand der vorhandenen Arbeit. Es ist bekannt, dass PFAS deutliche toxikologische Wirkungen haben, wie z. B. endokrine Störungen, Hepatotoxizität, Immuntoxizität, Teratotoxizität auf die fötale Entwicklung und bei einigen PFAS auch die Karzinogenität (z. B. des PFOA) [15-40]. Das Schema in Abb.1 zeigt eine Übersicht zu PFAS-Toxizitäten [40].

### 2.2 Umweltchemie

Ein wichtiges Merkmal der PFAS ist ihr Verhalten in der Umwelt, da polyfluorierte PFAS durch mikrobiologische Biotransformation in die sehr stabilen perfluorierte PFAS umgewandelt werden, welche nicht abbaubar, aber sehr gut wasserlöslich und z.T. auch sogar bio-akkumulierbar sind [41-46]. Die mögliche Biotransformation von PFAS in der Umwelt, durch die sich weitere persistente PFAS, wie insbesondere PFOA, etc. bilden können, muss zwingend im Zuge der Gefährdungsabschätzung berücksichtigt werden. Da fast alle PFAS oberflächenaktiv sind, sind diese gut löslich und führen schnell zu einer Verunreinigung des Grundwassers, der Oberflächengewässer und sogar des Trinkwassers. Bei einer (sensiblen) Nutzung eines PFAS-verunreinigten Standorts können einige flüchtige PFAS (FTOH: Fluortelomer-Alkohole) durch Ausgasung aus verunreinigtem Boden und Grundwasser in die Bodenluft und in die Raumluft eindringen.

Die Umweltchemie der PFAS ist besonders wichtig und vielschichtig. Es gibt keine Gruppe von Schadstoffen mit einer komplexeren Umweltchemie als PFAS (außer eventuell einzelner, punktueller Metabolisationswege einiger Pestizide, wie Fipronil, etc.). Es muss von mehr als 9.000 PFAS-Einzelstoffen ausgegangen werden, die in 33 Stoffkategorien unterteilt sind.

Die bekanntesten sind Perfluoralkansulfonsäuren (PFASA), Perfluoralkylcarbonsäuren (PFCA), Perfluoralkylphosphate (PAP) und ihre Ester, Fluortelomeralkohole (FTOH) usw. Einige von ihnen, wie z. B. PFOA: Perfluorooctansäure und PFOS: Perfluorooctansulfonat

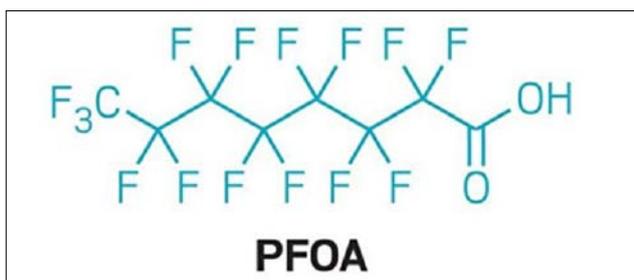


Abb. 2: Strukturformel von PFOA

(siehe Abb. 2) sind durch das Stockholmer Übereinkommen in der Kategorie der POPs (Persistent Organic Pollutants) verboten [42]. PFOA (Perfluorooctansäure) ist ein endokrine Substanz mit karzinogenen Eigenschaften. Kommerzielle Produkte enthalten hauptsächlich Mischungen.

Der Grund für die hohe Wasserlöslichkeit und gleichzeitige Lipophilie und Bioakkumulierbarkeit liegt in der Tatsache begründet, dass PFAS eine funktionelle Gruppe aufweisen:

- **Anionische PFAS** (z. B. Sulfonate, Sulfate, Carboxylate und Phosphate),
- **Kationische PFAS** (z. B. quaternäres Ammonium),
- **Amphoterische PFAS** (z. B. Betaine und Sulfobetaine): Base + Säure oder
- **Nichtionische PFAS** (z. B. Polyethylenglykole, Acrylamid-Oligomere)

### Biotransformation von polyfluorierten PFAS

#### (Precursors) zu persistenten per-fluorierten PFAS:

Der vollständige mikrobiologische Abbau von PFAS ist noch nicht nachgewiesen. Dahingegen ist die Biotransformation von polyfluorierten PFAS untersucht worden [43-46] und das Verständnis des grundlegenden Umwandlungsprozess bekannt, bei dem die nicht fluorierten endständigen Kohlenstoffatome abgespalten werden. Dieser teilweise Abbau erfolgt relativ schnell. So können z. B. polyfluorierte Alkylphosphate (PAP) und Carbonsäureester usw. in flüchtige Fluortelomeralkohole (FTOH), z. B. 6: 2-Mono-PAP & 6: 2-Di-PAP zu 6: 2-FTOH, zersetzt werden.

Die Abb.3 zeigt, wie 8:2-FTOH wiederum über intermediäre Metaboliten zu den stabilen perfluorierten PFPA (Perfluorpentansäure), PFHxA (Perfluorhexansäure), PFHpA (Perfluorheptansäure), 2H-PFOA, 7: 3 und PFOA (Perfluorooctansäure), welche krebserregend ist, biotransformiert wird [43-44].

Wichtig ist zudem die Flüchtigkeit der Fluortelomeralkohole, da diese aus diesem Grund im Bodengas (Bodenluft) und in der Raumluft durch Ausgasungen gefunden werden können und zu inhalativen Expositionen führen. Dies ist ein Grund, warum die Autorenenschaft auch immer öfter zur Erkundung und Bewertung von Fluortelomeralkoholen im Grundwasser, Bodengas und in der Raumluft auf PFAS-verdächtigen Standorten mit sensibler Gebäudenutzung (wie Schulen, Kindergärten, etc.) konsultiert wird.

### pH-Wert-Abhängigkeiten:

Im Falle einer pH-Wert-Änderung können einige PFAS z. T. mehr oder weniger deutlich löslich werden, was sich auch (eventuell nach Biotransformationen) auf die Emanationen von flüchtigen Fluortelomeren wie FTOH usw. in das Bodengas auswirkt. Einige PFAS können dabei auch ihre Löslichkeit (und Extrahierbarkeit während chemischer Analyseverfahren) verändern. Zum Beispiel das Eindringen von Meerwasser in den Grundwasserleiter kann zu einer pH-bedingten erhöh-

## Einzelfallprüfung bei PFAS

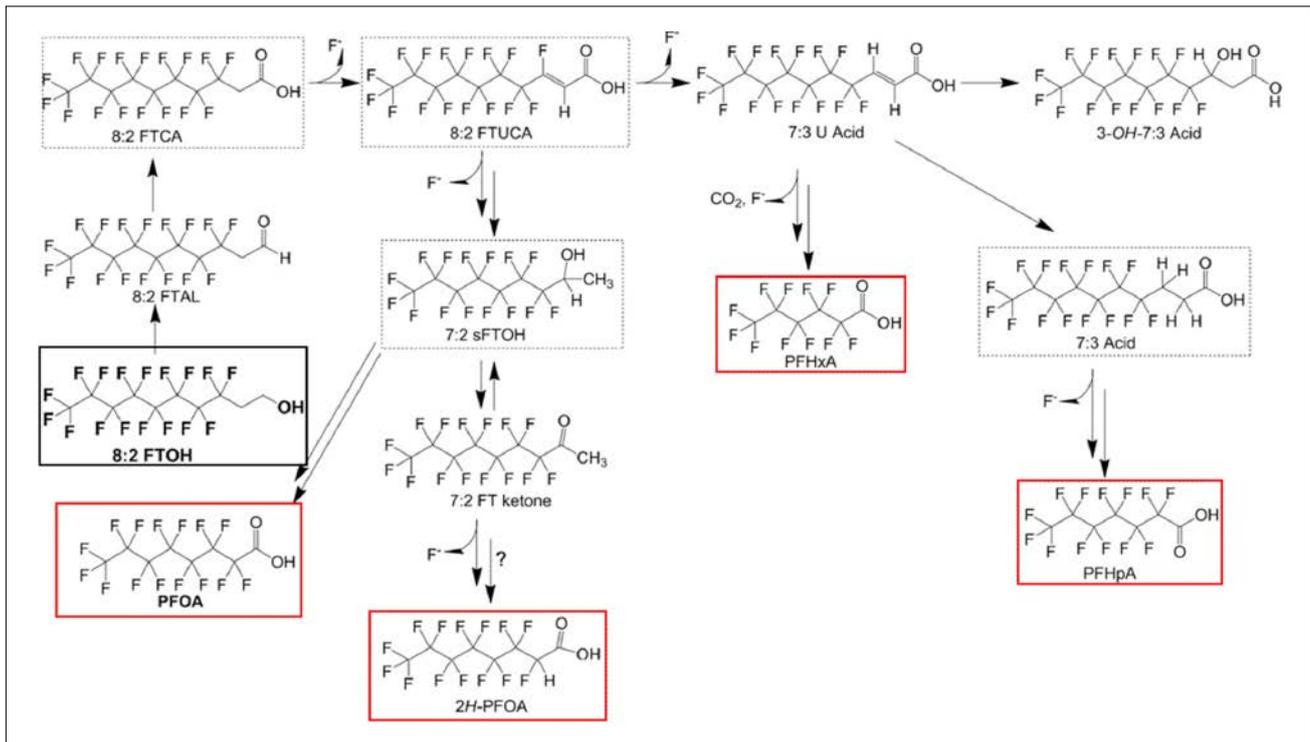


Abb. 3: Biotransformation in Boden von 8:2-FTOH [(F(CF<sub>2</sub>)<sub>8</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH)], gemäß N. Wang et al. (2009) und J. Liu & S. M. Avendaño (2013) [43-44]. Wichtig sind die (rot umrandeten) stabilen, perfluorierten Carboxylsäuren als Endprodukte, wie PFPA (Perfluorpentansäure), PFHxA (Perfluorhexansäure), PFHpA (Perfluorheptansäure), 2H-PFOA, 7:3 und PFOA (Perfluoroctansäure) welche krebserregend ist.

ten Löslichkeit von Capstone B [6:2-FT(S)AB] führen. Dies wurde 2022 im Hamburger Hafengebiet beobachtet, vgl. Abb. 5 Capstone B. Diese Effekte können zu mehr als 10-fach höheren Konzentrationen im Grundwasser, z. B. bei pH-Wert-Erhöhung führen (F. KARG, 2022) [48-50].

### 3. Gefährdungsabschätzungen und Ableitung von Eingreifwerten gemäß der BBodSchV der neuen Mantelverordnung

Bis jetzt erfolgten Gefährdungsabschätzungen vor allem in einer vereinfachten Form unter Verwendung von Vorsorgewerten, wie z. B. den Prüfwerten der BBodSchV oder den GFS-Werten (Geringfügigkeitswerten) für das Grundwasser (Tabelle 1). Allgemeine Empfehlungen zur PFAS-Bewertung wurden bereits auch in Deutschland veröffentlicht [41-54]. In Bayern werden z. B. als Schwellenwerte ebenso für das Grundwasser die GOW-Werte (Gesundheitlicher Orientierungswert) angewendet (B-LFU, 2022) [52].

Heute kann die Anwendung der neuen Mantelverordnung (gültig ab dem 01.08.2023) bereits erfolgen, so, wie es das Unterregelwerk des BBodSchG und der BBodSchV gemäß § 15 (4), die Anwendung des Bundesanzeigers 161a vorsieht. Dies bedeutet, dass für die Nachsorge standortspezifische Maßnahmenwerte (oder Eingreif- bzw. Sanierungszielwerte) abgeleitet werden können. Um den Ausschluss nicht-zulässiger toxikologischer Risikoschwellen (im Sinne des BA 161a) zu gewährleisten (die im Fall der Überschreitung Gefahren bzw. nicht-akzeptable toxikologische Risiken beinhalten), können tolerable Expositionsdosen mit deren spezifisch notwendigen Maßnahmen- bzw. Sanierungszielwerten abgeleitet werden. Diese sind dann für zukünftige standortspezifische Nutzungen und Standortentwicklungsszenarien anwendbar.

Diese standortspezifischen Eingreifwerte für Boden, Bodengas- bzw. Bodenluft, Grundwasser und so

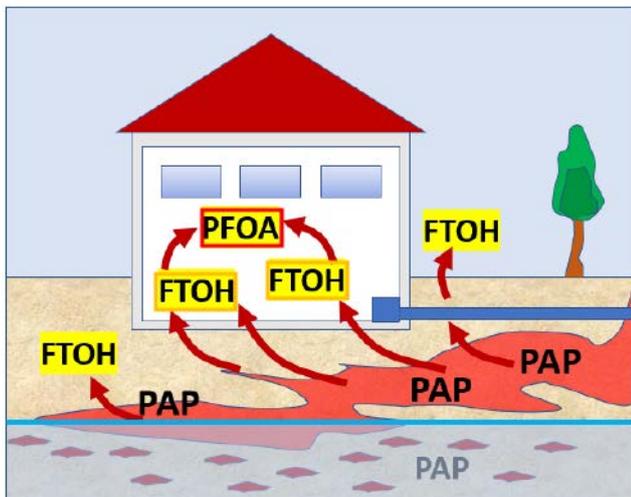


Abb. 4: Beispiel für die Biotransformation von polyfluorierten Alkylphosphaten (PAPs) in Böden und Grundwasser zu flüchtigen Fluortelomeralkoholen (FTOHs) und stabilen perfluorierten PFAS, z. B. dem karzinogenen PFOA (F. KARG, 2021 & 2022 [47-50]).

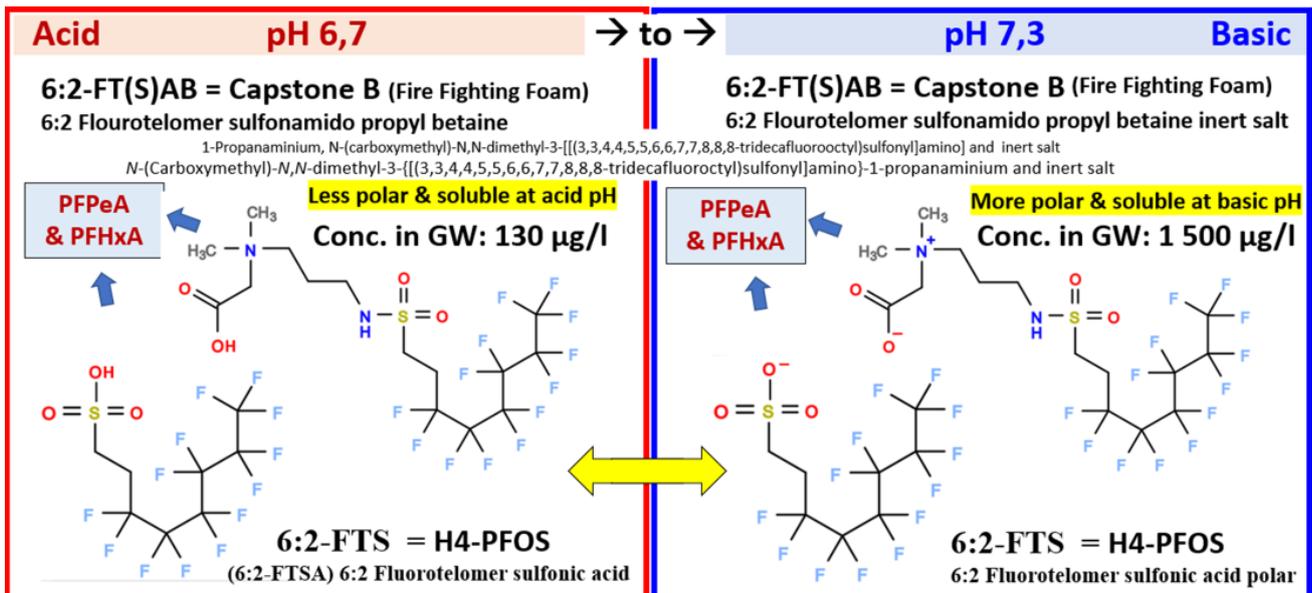


Abb. 5: Capstone B: pH-Wert-abhängige Löslichkeitsveränderungen von Capstone B: 6: 2-FT(S)AB, wie es 2022 bei Standortuntersuchungen und Grundwasserüberwachungen im Hamburger Hafenbereich vor und nach Hochwasserereignissen mit in den Aquifer eintretendes Meerwasser beobachtet wurde [48-50].

gar Innenraumluft, etc. können definiert und deren Überschreitungen kartiert werden, um den tatsächlichen Sanierungsbedarf (bzw. Sicherungsbedarf) transparent in der Vielstoffbetrachtung zu ermitteln.

Sogar bei der Anwendung der Vielstoffbelastung zeigt diese Vorgehensweise, gemäß § 15 (4) der BBodSchV, dass die Anwendung dieser standortspezifischen Eingriffswerte der Nachsorge, im Vergleich zur vereinfachten Anwendung von Vorsorgewerten (wie Prüfwerte oder GFS-Werte; Tabelle 1), die nötigen Sanierungsaufwendungen für eine transparente Gefah-

renabwehr um bis zu 60 – 80 % optimieren kann. Dabei wird nicht auf Umwelt- und Gesundheitssicherheit sowie rechtliche Zulässigkeit verzichtet, wie Beispiele beim Umgang mit PFAS-, PAK-, BTEX-, LHKW- und Schwermetall-Kontaminationen zeigen. In diese Methodik können auch Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen, gemäß § 17 der neuen BBodSchV integriert werden.

Eine Anwendung allgemeiner, individueller Tabellengrenzwerte im Rahmen einer vereinfachten Risikobewertung berücksichtigt weder spezifische Exposi-

Nr.	PFAS (Cas-Nr.)	Synonym	Trinkwasser-Leitwert [µg/l]	Grundwasser (Vorsorge) GFS [µg/l]
1	Perfluorbutansäure, (375-22-4)	PFBA	10	10
2	Perfluorpentansäure, (2706-90-3)	PFPeA	3 (GOW)	-
3	Perfluorhexansäure, (307-24-4)	PFHxA	6	6
4	Perfluorheptansäure, (375-85-9)	PFHpA	0,3 (GOW)	-
5	Perfluoroctansäure, (335-67-1)	PFOA	0,1	0,1
6	Perfluornonansäure, (375-95-1)	PFNA	0,06	0,06
7	Perfluordecansäure, (335-76-2)	PFDA	0,1 (GOW)	-
8	Perfluorbutansulfonsäure, (375-73-5)	PFBS	6	6
9	Perfluorhexansulfonsäure, (355-46-4)	PFHxS	0,1	0,1
10	Perfluorheptansulfonsäure, (375-92-8)	PFHpS	0,3 (GOW)	-
11	Perfluoroctansulfonsäure, (1763-23-1)	PFOS	0,1	0,1
12	H4-Polyfluorooctansulfonsäure, (27619-97-2)	H4PFOS	0,1 (GOW)	-
13	Perfluoroctansulfonamid, (754-91-6)	PFOSA	0,1 (GOW)	-

Tab. 1: Geringfügigkeitsschwellenwerte und Trinkwasserleitwerte für PFAS [51-54]. GOW: Gesundheitlicher Orientierungswert.

Risikoschwellen gemäß Bundesanzeiger BA161a in der Anwendung der neuen Mantelverordnung & BBodSchV § 15(4)			
Risiko- bereiche	Individuelles Krebsrisiko IKR Tolerable resorbierte Dosis TRD		Vorsorge- und Gefahrenbereiche
Maßnahmen- werte	Risikoschwellen ↑ $IKR = 5 \cdot 10^{-5}$ $TRD \cdot F_{Gef}$	$IKR > 5 \cdot 10^{-5}$ $TED / (TRD \cdot F_{Gef}) > 1$	<b>Gefahrenbereich:</b> Eine hinreichende Wahrscheinlichkeit des Schadenseintrittes besteht
zwischen Prüfwert und Besorgnis- wert	↑ $IKR = 10^{-5}$ TRD	$10^{-5} < IKR \leq 5 \cdot 10^{-5}$ $1 < TED / TRD \leq$ $TED / (TRD \cdot F_{Gef})$	<b>Besorgnisbereich:</b> Behörden brauchen nicht unmittelbar einzugreifen
Vorsorge- werte	↑	$IKR \leq 10^{-5}$ $TED / TRD \leq 1$	<b>Vorsorgebereich</b> indem eine Gefahr für die menschliche Gesundheit unwahrscheinlich ist

Abb. 6: Risikoschwellen gemäß Bundesanzeiger BA161a in der Anwendung gemäß der neuen BBodSchV § 15(4).

IKR: Individuelles Krebsrisiko; TED: Tägliche Expositionsdosis; GD = TRD × F<sub>Gef</sub>: Gefahrenbezogene Dosis; TDWR: Toxikologische Dosis-Wirkungs-Referenzwerte (TRD, ATD, etc.); TRD: Tolerable Resorbierte Dosis; F<sub>Gef</sub>: Gefahrenfaktor; ATD: Akzeptable Tägliche Dosis

tionsszenarien noch die Vielstoffbetrachtung des vorhandenen „Schadstoffcocktails“. Es sollte aber die Vielstoffbelastung, zumindest über die Additivität der Risiken der Schadstoffe im Gemisch, in Bezug auf dieselben toxikologischen Ziele und Wirkungen berücksichtigt werden (z. B. die Neurotoxizität von PFOA, PFDA, PFD<sub>o</sub>A, PFHxS und PFOS, siehe Abb.1). Diese Vielstoffbewertung, die bei der Einzelfallbetrachtung (mit Prüfwerten oder GFS) nicht erfolgt, ist konform zur TRGS 402/BAuA (2014) [55] oder dem LAGA-Bericht zu den PFC-GFS von 2017 [56], wie auch gemäß WHO/IPCS (2009, 2010), UBA (2011) [57-61]. Folglich sollte auch dementsprechend die Vielstoffbewertung, gemäß der neuen Mantelverordnung und deren BBodSchV § 15 (4) sowie dem Bundesanzeiger BA 161a angewendet werden. Mit dieser Methodik können standortspezifische Eingriffswerte der Nachsorge abgeleitet werden, da hier eine Altlast betrachtet wird und die Vorsorgewerte keine Anwendung finden. Das Schema in Abb. 6 zeigt die anzuwendenden toxikologischen Risikoschwellen gemäß des BA 161a.

Die Prüfung des Einzelfalls und der Verhältnismäßigkeit ist notwendig, da z. B. in verschiedenen Gerichtsprozessen das alleinige Heranziehen der Geringfügigkeitsschwellenwerte als Sanierungsziele als nicht zulässig erklärt worden ist. Ein Sanierungszielwert

muss demnach einzelfallbezogen unter dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit abgeleitet und zu begründet werden.

### 3.1 Etappen der Einzelfallbewertung der toxikologischen Gefährdungsabschätzung

Die humantoxikologische Gefährdungsabschätzung (bzw. TERQ = toxikologische Expositionsrisiko-Quantifizierung) erfolgt in mehreren Etappen (Abb. 7):

- Etappe 1: Definition der zu bewertenden Schadstoffe,
  - Etappe 2: Definition der Expositionsszenarien (Nutzungscharakteristiken und Expositionsparametern) und Expositionspfade,
  - Etappe 3: Expositionsquantifizierung,
  - Etappe 4: Expositionsrisiko-Quantifizierung,
- Es muss in der humantoxikologischen Gefährdungsabschätzung (oder auch Expositionsrisikoquantifizierung) zwischen:

- A) Schadstoffen mit Wirkung ab einer Dosischwelle (systemtoxisch) und
- B) Schadstoffen mit Wirkung ohne Dosischwelle (gentoxisch wie kanzerogen, mutagen und/oder teratogen) unterschieden werden.

In der toxikologischen Expositionsrisiko-Quantifizierung werden die ermittelten täglichen Expositionsdosen (TED) bezüglich Wirkungen bei Dosis-Wirkungsschwelle den aktuellen toxikologischen Dosis-Wirkungs-Referenzwerten (TDWR) gegenübergestellt. Das toxikologische Risiko systemtoxischer (z. B. nicht-karzinogener) Stoffe lässt sich in Abhängigkeit von der täglichen Expositionsdosis definieren. Die TED wird dabei für jede untersuchte Substanz durch die ATD (Akzeptable Tägliche Dosis, z. B. der deutschen TRD: Tägliche Resorbierten Dosis für 100 % Resorption oder der von der US-EPA definierten Referenzdosis RfD oder einer anderen begründeten TDWR) dividiert (TED/ATD). Das erzielte Ergebnis wird mit dem akzeptablen Risikoindex (RI) verglichen, Werte größer Eins (1) bedeuten, dass nicht tolerable Risiken bestehen.

Für Substanzen mit einer Wirkung ohne Dosischwelle (krebserzeugend, mutagen, teratogen oder in manchen Fällen auch neurotoxisch) wird die Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen Exposition und der Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung (z. B. das Ansteigen der Tumorfrequenz) berücksichtigt. Die Berechnung des Krebsrisikos erfolgt mittels des UKR (unitäres Krebsrisiko, z. B. der „Unit Risk“ oder „Slope factor“ des UBA in Deutschland oder der U.S.-EPA, etc.). Die TED wird dabei mit dem UKR multipliziert, um ein statistisches Risiko des Eintrittes des unerwünschten Effektes (z. B. das Auftreten eines Krebstumors) zu erhalten (IKR = TED × UKR).

Ein Überschreiten des individuellen Krebsrisikos (IKR) von  $10^{-5}$  wird international als nicht-akzeptabel angesehen. Dieser Wert bedeutet, dass bei lebenslanger Exposition ein zusätzlicher Krankheitsfall pro

100.000 Menschen als Populationskrebsrisiko (PKR) auftritt. Gemäß des BA 161a ist dies die erste Risikoschwelle die beim Überschreiten des IKR =  $5 \times 10^{-5}$  als mit hinreichender Wahrscheinlichkeit überschritten angesehen wird. Im Jahr 2020 wurden in den Niederlanden von Wienecke et al. [62] auch Toxizitätsäquivalenzfaktoren für PFAS (ausgehend vom PFOA) in Form von RPFs (Relative Potenzfaktoren) veröffentlicht. Um die richtige Auswahl von TDWR für PFAS zu gewährleisten, wird empfohlen nur wissenschaftliche Auswahlkriterien anzuwenden [47-50 & 63-65].

### 3.2 Ableitung von Eingreif- bzw. Sanierungszielwerten zur Unterschreitung nicht-tolerabler Risikoschwellen und zum Ausschluss von Gefahren

In der symmetrischen Rückkehrrechnung (siehe auch Abb. 7) der Expositionsrisiko-Quantifizierung können Maßnahmenwerte bzw. Handlungs- bzw. Sanierungszielwerte definiert werden. Dies kann für das jeweilige Nutzungsszenario und die damit einhergehenden Expositionspfade sichergestellt werden, damit bei Unterschreitung kein nicht tolerierbares Gesundheitsrisiko bzw. Gefahr besteht. Solche zulässigen maximalen Konzentrationen (ZMK) werden für alle betrachteten Substanzen, im Rahmen der aktuellen und einer zukünftigen Nutzung des Standorts standortspezifisch in der Einzelfallbetrachtung ermittelt.

Sollten an einem Standort nicht-akzeptable Risiken überschritten sein und/oder sollten mehrere Sub-Expositionsszenarien vorhanden sein (wie z. B. verschiedene Einzelhäuser oder Wohnungen im gleichen prinzipiellen Expositionsszenario), so macht es Sinn

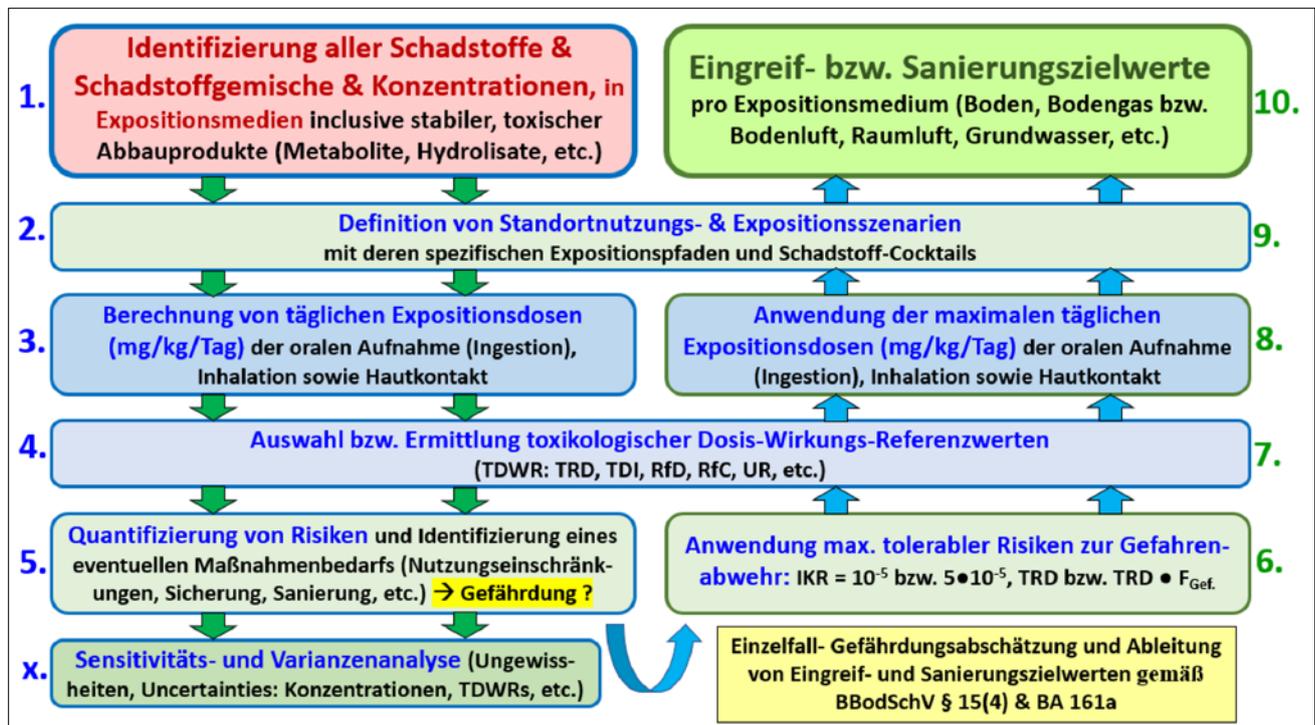


Abb. 7: Etappen der Einzelfallbewertung der toxikologischen Gefährdungsabschätzung und Ableitung von standortspezifischen Eingreif- oder Sanierungszielwerten.

## Einzelfallprüfung bei PFAS

Substance	Cancerogen / not cancerogen	Chronic toxicological value			Species	Sigle	Security Factor	Organization
		Exposure path	Target organ	Value				
PFHpA	NC	oral	Hepatic	25 ng/kg/d	Rate	DJT	Extrapolation of DJT of Health Canada	ANSES 2017
PFOA	NC	oral	Hematologic	0,86 ng/kg/d	Rate	TDI	BMDL5	UBA 2020 BfR & EFSA 2018
			Hepatic, Mammar, Hematologic	12 ng/kg/d	Mice	RfD	LOAEL (81*100)	TECQ 2016
		inhalation	Hepatic	4,1 ng/m <sup>3</sup>	Rate	RfC	NOAEL / (81*3000)	TCEQ 2016
	C	oral	Testicular tumors	2,52 (mg/kg/d) <sup>-1</sup>	Epidemio	SF	-	New Jersey 2017
PFNA	NC	oral	Hematologic	2,5 ng/kg/d	Mouse	RfD	NOAEL / 300	EPA IRIS 2019 New Hampshire DES 2019
		inhalation	Lung, respiratory system	28 ng/m <sup>3</sup>	Rate	RfC	NOAEL / (81*30 000)	EPA IRIS 2019 TCEQ 2018

Abb. 8: Auswahl einiger PFAS-TDWR: Toxikologische Dosis-Wirkungs-Referenzwerte, entsprechend wissenschaftlicher Auswahlkriterien (F. KARG, 2021-2022) [47-50 & 63-77]

ANSES: Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (2017); EFSA: Europäische Behörde für Lebensmittel und Sicherheit; IRIS: Integrierte Risikoinformation von Stoffen (U.S. - EPA); UBA: Umweltbundesamt (Deutschland); BfR: Bundesinstitut für Risikobewertung (Deutschland); TCEQ: Texanische Behörde für Umweltqualität; NJ-DWQIHES: New Jersey Drinking Water Quality Institute und Behörde für gesundheitliche Auswirkungen.

Überschreitungen von ZMK auszukartieren, um lokal abgrenzbare Konzentrations- und damit verbundene Risikoschwellenüberschreitungen (bzw. Gefahren) identifizieren zu können.

Bei der Ableitung der standortspezifischen Maßnahmenwerte, die weitere Schritte zu Maßnahmen auslösen können, kann für Stoffe mit Dosis-Wirkungsschwelle eine Dosis in Höhe der standortspezifischen Risikoschwelle in Höhe des TRD (ATD) sowie für kanzerogene Stoffe ein Zusatzkrebsrisiko von  $IKR = 10^{-5}$  zu Grunde gelegt werden. Bei der Ableitung von standortspezifischen Eingreifwerten kann gemäß den Regelungen der BBodSchV bzw. des BA 161a für Stoffe mit Dosis-Wirkungsschwelle eine gefahrenbezogene Dosis von  $GD = TRD \times F_{Gef}$  zu Grunde gelegt werden, bzw. für kanzerogene Stoffe ein individuelles Krebsrisiko von  $IKR = 5 \times 10^{-5}$ . Diese Risikoschwellen (gemäß BA 161a) dienen zur hinreichenden Wahrscheinlichkeit der Überschreitung der TRD-Werte und des  $IKR = 10^{-5}$ .

Eingreifwerte sollten standortspezifisch für alle Substanzen durch eine Rückrechnung auf Basis der toxikologischen Expositionsrisiken kalkuliert werden, welche nicht-akzeptable Risiken (Gefahren) ausschließen (z. B. auf dem Niveau  $IKR < 10^{-5}$  bzw.  $< TRD$  bzw. ATD (Akzeptable Tägliche Dosis)).

Im Rahmen von Neu- bzw. Um-Nutzungen belasteter Standorte (z. B. zum Immobilienmanagement oder zur Urbanisierung und Bebauungsplanung, gemäß der planungsrechtlich zulässigen Nutzung) müssen verschiedene zusätzliche mögliche Nutzungsszenarien, bzw. zukünftige Expositionsszenarien betrachtet werden, um mit der Kartierung der nutzungsspezifischen Eingreifwerte eventuelle „Risiko-Zonen“ zu identifizieren. Für jeden Schadstoff wird dabei für jedes zukünftige Nutzungsszenario ein eigener Eingreifwert bzw. Sanierungszielwert abgeleitet und Überschreitungen kartiert.

Diese identifizierten „Risiko“-Zonen können dazu dienen, betroffene Flächen, Volumina mit potenziel-

lem Handlungsbedarf pro (potenzielles) Nutzungsszenario sowie technisch-finanzielle Handlungsempfehlungen zu definieren, wie z. B. eine Nutzungseinschränkung, Sicherung und/oder Sanierung. Diese Vorgehensweise kann dabei helfen, die optimale Balance zwischen einem Immobiliengewinn der Neunutzung und den Altlastenmanagement-Kosten zu ermitteln sowie gleichzeitig eine maximale Rechtssicherheit zu bewahren (welche dann auch zu einer Optimierung der Sanierungskosten führt). Diese standortspezifischen Eingreifwerte können zur Ermittlung von Sanierungszielwerten verwendet werden und ihre Integration in einen Sanierungsplan finden.

#### 4. Beispiele der Anwendung von standortspezifischen Eingreif- bzw. Sanierungszielwerten der Einzelfallbewertung gemäß der neuen BBodSchV § 15 (4), BA 161a

Eine standortspezifische Einzelfallbewertung erfolgte an einem ehemaligen Mineralöl-Standort „B“ mit jahrelangen Übungen zur Feuerbekämpfung per PFAS-Feuerlöschschäumen (AFFF). Die Abb. 9a zeigt den Sanierungsbedarf für Boden bei einer vereinfachten Gefährdungsabschätzung und Anwendung der B-LFU Stufe 2 Werte (des Bayerisches Landesamts für Umwelt) für PFOS (Perfluorooctansulfonsäure [47-50]).

Die Abb. 9b zeigt den Sanierungsbedarf für den Boden des gleichen Standortes bei einer Einzelfallbewertung mit standortspezifischer Gefährdungsabschätzung bei Anwendung der TERQ Sanierungszielwerte (Eingreifwerte) für PFOS (Perfluorooctansulfonsäure [47-50]). Der Unterschied zur Abb. 9a zeigt deutlich, dass trotz Gefahrenabwehr der Einzelfallbewertung gemäß der neuen BBodSchV § 15 (4), BA 161a, der Sanierungsaufwand geringer gehalten werden kann, ohne dabei an Rechtssicherheit einzubüßen.

Ein weiterer PFAS-Fall zeigt eine standortspezifische Einzelfallbewertung, welche an einem Industrie-

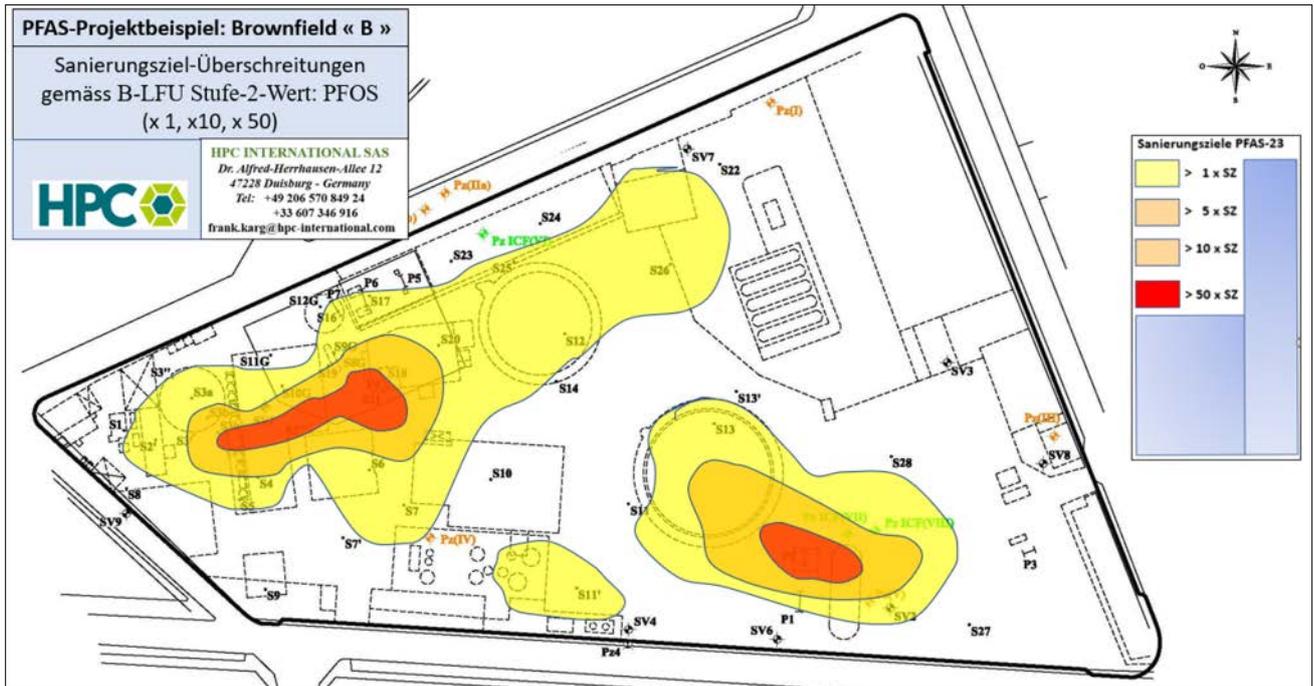


Abb. 9a: Beispiel „Mineralöl-Standort „B“: Boden-Sanierungsbedarf gemäß Listenwerte, B-LFU Stufe-2-Wert [52] zum PFOS (Perfluorooctansulfonsäure) > 0,0004 mg/l Eluat [47-50].

standort mit PFAS-Grundwasserkontaminationen erfolgte. Die Abb. 10a zeigt den Grundwasser-Sanierungsbedarf im Falle der Anwendung von GFS-Werten (Geringfügigkeitsschwellenwerte) bezüglich der PFNA (Perfluornonansäure [47-50].

Die Abb. 15b zeigt den Sanierungsbedarf für Grundwasser bei der standortspezifischen Anwendung der Maßnahmenwertableitung per TERQ zur humantoxikologischen Gefahrenabwehr, gemäß der neuen BBodSchV

§ 15 (4), BA 161a, sowie dem Grundwasserschutz durch Bildung eines geometrischen Mittels aus dem GFS-Wert und dem TERQ-Maßnahmenwert für PFNA (Perfluornonansäure) [47-50]. Diese Vorgehensweise der Einzelfallbewertung und standortspezifischen Ableitung von Maßnahmenwerten für das Grundwasser fand bereits Anwendung in einigen Öffentlich-Rechtlichen Verträgen (ÖRV) zur Anwendung von entsprechenden Sanierungsplänen in NRW, Bremen und Bayern.



Abb. 9b: Beispiel „Mineralöl-Standort „B“: Boden-Sanierungsbedarf gemäß Sanierungsziele bei Anwendung des TERQ-Maßnahmenwerts für PFOS (Perfluorooctansulfonsäure) > 0,02 mg/l Eluat [47-50].

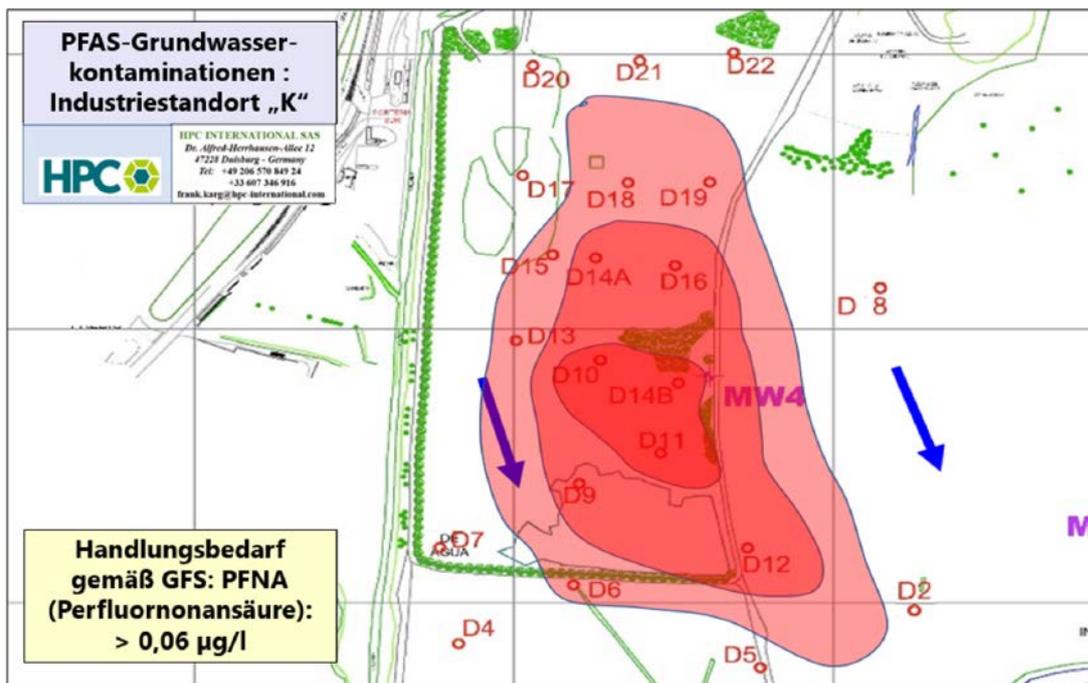


Abb. 10a: Beispiel Industriestandort „K“: Grundwasser-Sanierungsbedarf bei Anwendung von GFS-Werten, z. B. für die PFNA (Perfluornonansäure) [47-50].

## 5. Ergebnisse der Einzelfallbewertung gemäß der neuen BBodSchV § 15 (4) und BA 161a

Die Einzelfallbewertung zu Maßnahmenerfordernissen (Gefahrenabwehr) bei Altlasten, gemäß der neuen Mantelverordnung und der neuen BBodSchV, § 15 (4) und dem BA 161a, z. B. mit der TERQ-Methodik (toxikologische Expositions-Risiko-Quantifizierung) kann zur standortspezifischen Ableitung von Sanierungszielwerten (bzw. Eingreifwerten) führen, welche der

für Altlasten nötigen Gefahrenabwehr Rechnung tragen und damit zu einer besseren rechtlichen Begründung beitragen.

Diese Methodik führt zu einer höherer Budgetsicherheit als die Anwendung von Vorsorgewerten (GFS-Werte, Prüfwerte, etc.), trotzdem dabei auch die Vielstoffbetrachtung angewendet wird. Die Anwendung an PFAS-Altlasten, zeigt die Vorteile dieser Vielstoffbewertung.

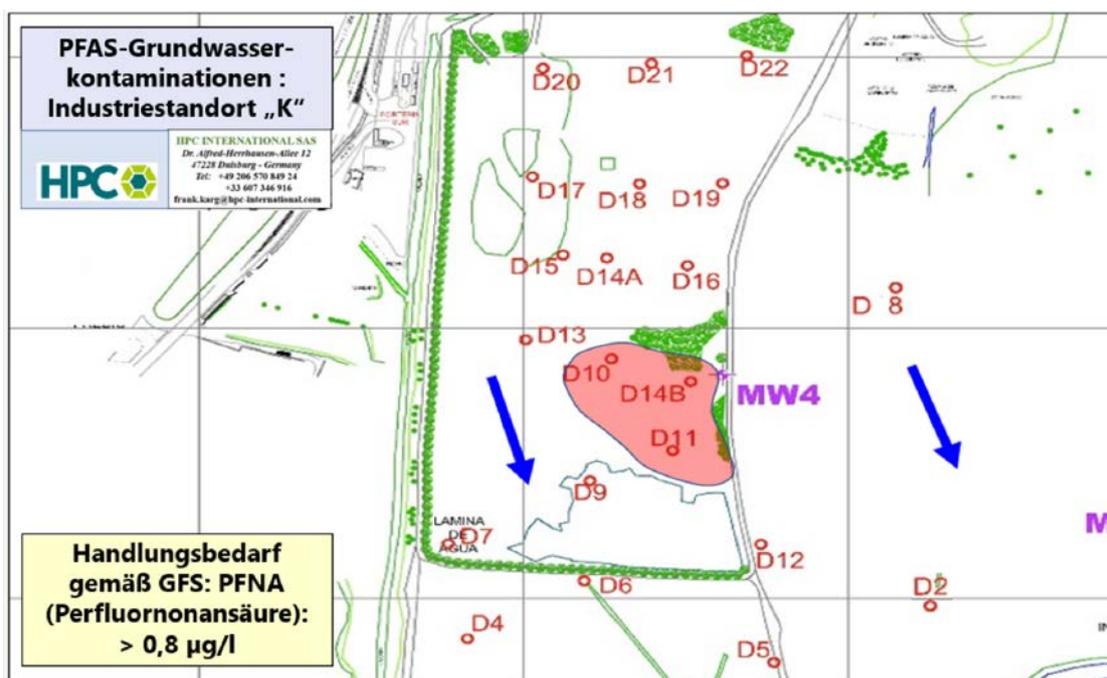


Abb. 10b: Beispiel Industriestandort „K“: Grundwasser-Sanierungsbedarf bei Anwendung von standortspezifischen Maßnahmenwerten (geometrische Mittelwerte aus TERQ-Zielen und GFS-Werten), z. B. für die PFNA (Perfluornonansäure) [47-50].

## Referenzen

- ITRC (2020): History and use of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): New Jersey Department of Environmental Protection. [https://pfas-1.itrcweb.org/fact\\_sheets\\_page/PFAS\\_Fact\\_Sheet\\_History\\_and\\_Use\\_April2020.pdf](https://pfas-1.itrcweb.org/fact_sheets_page/PFAS_Fact_Sheet_History_and_Use_April2020.pdf)
- NIOSH (2022): Per- and polyfluoroalkyl Substances (PFAS). The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 15. September 2022. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/pfas/default.html>
- NIEHS (2022): Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). National Institute of Environmental Health Science. 29. Juli 2022. <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/pfc/index.cfm>
- ITRC (2020): History and use of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): New Jersey Department of Environmental Protection. [https://pfas-1.itrcweb.org/fact\\_sheets\\_page/PFAS\\_Fact\\_Sheet\\_History\\_and\\_Use\\_April2020.pdf](https://pfas-1.itrcweb.org/fact_sheets_page/PFAS_Fact_Sheet_History_and_Use_April2020.pdf)
- Buck, R. C.; Franklin, J.; Berger, U.; Conder, J. M.; Cousins, I. T.; deVoogt, P.; Jensen, A. A.; Kannan, K.; Mabury, S. A.; vanLeeuw, S. P. J. (2011): Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 2011, 7, 513 – 541.
- 3M (2020): Voluntary Use and Exposure Information Profile for Perfluorooctanoic Acid and Salts. USEPA Administrative Record AR226-0595.2000. Available online: <https://www.regulations.gov/document?D=EPA-HQ-OPPT-2002-0051-0009>
- US-EPA. EPA and 3M Announce Phase out of PFOS. Available online: [https://archive.epa.gov/epapages/newsroom\\_archive/newsreleases/33aa946e6cb11f35852568e1005246b4.html](https://archive.epa.gov/epapages/newsroom_archive/newsreleases/33aa946e6cb11f35852568e1005246b4.html)
- Maga, D.; Aryan, V.; Bruzzano, S. (2020): Environmental assessment of various end-of-life pathways for treating per- and polyfluoroalkyl substances in spent fire-extinguishing waters. *Environ. Toxicol. Chem.* 2020.
- Barbarossa, A.; Masetti, R.; Gazzotti, T.; Zama, D.; Astolfi, A.; Veyrand, B.; Pession, A.; Pagliuca, G. (2013): Perfluoroalkyl substances in human milk: A first survey in Italy. *Environ. Int.* 2013, 51, 27-30.
- European Parliament. Directive 2013/39/UE „Cadre sur l'eau“ européenne (DCE), concernant le PFOS & dérivés (et pour d'autres substances prioritaires) <https://www.efsa.europa.eu/fr/news/pfas-food-efsa-assesses-risks-and-sets-tolerable-intake>
- Chen, H.; Peng, H.; Yang, M.; Hu, J.; Zhang, Y. (2017): Detection, occurrence, and fate of fluorotelomer alcohols in municipal wastewater treatment plants. *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51, 8953 – 8961.
- UN-EP (United Nations Environmental Programme). Report of the Conference of the Parties of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants on the Work of Its Fourth Meeting. Available online: <http://chm.pops.int/TheConvention/ConferenceoftheParties/Meetings/COP4/COP4Documents/tabid/531/Default.aspx>
- Karg, F. (2021): Per et Polyfluoro Alkyl Substances: Pollution environnementale et Risque pour la Sante. Webinaire 22/10/2021. ARET : Association pour la Recherche en Toxicologie. <https://aret.asso.fr/prochain-webinaire-de-laret-le-22-octobre-2021-inscription-gratuite-ouverte/>
- Kopf, L. (2017): Biotransformationsprozesse von Fluortelomeralkoholen/PFC-Chemismus und FTOH-Analytik in der Bodenluft. Duale Hochschule Baden-Württemberg, Karlsruhe TSHE14.
- Sunderland, E. M.; Hu, X. C.; Dassuncao, C.; Tokranov, A. K.; Wagner, C. C.; Allen, J. G. (2019): A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2019, 29, 131 – 147.
- Khalil, N.; Ducatman, A. M.; Sinari, S.; Billheimer, D.; Hu, C.; Littau, S.; Burgess, J. L. (2020): Per- and polyfluoroalkyl substance and cardiometabolic markers in fire fighters. *J. Occup. Environ. Med.* 2020, 62, 1076 – 1081.
- Leary, D. B.; Takazawa, M.; Kannan, K.; Khalil, N. (2020): Perfluoroalkyl substances and metabolic syndrome in fire fighters. *J. Occup. Environ. Med.* 2020, 62, 52 – 57.
- Domingo, J. L.; Nadal, M. (2019): Human exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) through drinking water: A review of the recent scientific literature. *Environ. Res.* 2019, 177, 108648.
- Faure, S.; Noisel, N.; Werry, K.; Karthikeyan, S.; Aylward, L. L.; St-Amand, A. (2020): Evaluation of human biomonitoring data in a health risk based context: An updated analysis of population level data from the Canadian Health Measures Survey. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 2020, 223, 267 – 280.
- Lau, C.; Anitole, K.; Hodes, C.; Lai, D.; Pfahles-Hutchens, A.; Seed, J. (2007): Perfluoroalkyl acids: A review of monitoring and toxicological findings. *Toxicol. Sci.* 2007, 99, 366 – 394.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR): Toxicological Profile for Perfluoroalkyls (Draft for Public Comment). <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=1117&tid=237>
- Foguth, R.; Sepúlveda, M. S.; Cannon, J.: Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) neurotoxicity in sentinel and non-traditional laboratory model systems: Potential utility in predicting adverse outcomes in human health. *Toxics* 2020, 8, 42.
- Thompson, C. M.; Fitch, S. E.; Ring, C.; Rish, W.; Cullen, J. M.; Haws, L. C. (2019): Development of a novel reference dose for the perfluorinated compound GenX. *J. Appl. Toxicol.* 2019, 39, 1267 – 1282.
- USEPA (2020): Health Effects Support Document for Perfluorooctanoic Acid (PFOA). [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-05/documents/pfoa\\_hesd\\_final-plain.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-05/documents/pfoa_hesd_final-plain.pdf) 2020
- Fenton, S. E.; Ducatman, A.; Boobis, A.; DeWitt, J. C.; Lau, C.; Ng, C.; Smith, J. S.; Roberts, S. M. (2020): Per- and polyfluoroalkyl substance toxicity

- and human health review: Current State of knowledge and strategies for informing future research. *Environ. Toxicol. Chem.* 2020.
26. NTP (2020): Monographon Immunotoxicity Associated with Exposure to Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctane Sulfonate (PFOS). (National Toxicology Program). Available online: [https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/ohat/pfoa\\_pfos/pfoa\\_pfosmonograph\\_508.pdf](https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/ohat/pfoa_pfos/pfoa_pfosmonograph_508.pdf) (2020).
  27. Luo, J.; Xiao, J.; Gao, Y.; Ramlau-Hansen, C.H.; Toft, G.; Li, J.; Obel, C.; Andersen, S.L.; Deziel, N.C.; Tseng, W.L.; et al. (2020): Prenatal exposure to perfluoroalkyl substances and behavioral difficulties in childhood at 7 and 11 years. *Environ. Res.* 2020, 191, 110111.
  28. Ding, N.; Harlow, S.D.; Randolph, J.F.; Loch-Caruso, R.; Park, S.K. (2020): Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and their effects on the ovary. *Hum. Reprod. Update* 2020, 26, 724–752.
  29. Liew, Z.; Luo, J.; Nohr, E.A.; Bech, B.H.; Bossi, R.; Arah, O.A.; Olsen, J. (2020): Maternal plasma perfluoroalkyl substances and miscarriage: A nested case-control study in the Danish National Birth Cohort. *Environ. Health Perspect.* 2020, 128, 047007.
  30. Di-Niso, A.; Rocca, M.S.; DeToni, L.; Sabovic, I.; Guidolin, D.; Dall'Acqua, S.; Acquasaliente, L.; De Filippis, V.; Plebani, M.; Foresta, C. (2020): Endocrine disruption of vitamin D activity by perfluorooctanoic acid (PFOA). *Sci. Rep.* 2020, 10, 16789.
  31. Consonni, D.; Straif, K.; Symons, J.M.; Tomenson, J.A.; Van Amelsvoort, L.G.P.M.; Sleuwenhoek, A.; Cherrie, J.W.; Bonetti, P.; Colombo, I.; Farrar, D.G.; (2013): Cancer risk among tetrafluoroethylene synthesis and polymerization workers. *Am. J. Epidemiol.* 2013, 178, 350–358.
  32. Temkin, A.M.; Hocevar, B.A.; Andrews, D.Q.; Naidenko, O.V.; Kamendulis, L.M. (2020): Application of the Key characteristics of carcinogens to per and polyfluoroalkyl substances. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 1668.
  33. Peters, J.M.; Shah, Y.M.; Gonzalez, F.J. (2012): The role of peroxisome proliferator-activated receptors in carcinogenesis and chemoprevention. *Nat. Rev. Cancer* 2012, 12, 181–195.
  34. IARC: International Agency for Research on Cancer (2016): Some Chemicals Used as Solvents and in Polymer Manufacture. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans; International Agency for Research on Cancer: Lyon, France, 2016; Volume 110, ISBN 978-92-832-0148-9.
  35. US-EPA (2020): Health Effects Support Document for Perfluorooctane Sulfonate (PFOS). [https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-05/documents/pfos\\_hesd\\_final\\_508.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-05/documents/pfos_hesd_final_508.pdf)
  36. Brasse, R.A.; Mullin, E.J. & Spink, D.C. (2021): Legacy and Emerging Per- and Polyfluoroalkyl Substances. *International Journal of Molecular Science MDPI*, 22, 995. <https://doi.org/10.3390/ijms22030995>
  37. Wieneke, B.; Zeilmaker, M.; Fragki, S.; Lijzen, J.; Verbruggen, E.; Bokkers, B. (2020): Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substance Mixtures: A Relative Potency Factor Approach. *Environmental Toxicology and Chemistry Volume 40, Issue 3 p. 859-870.* <https://doi.org/10.1002/etc.4835> <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/etc.4835>
  38. ANSES (2017): AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'évaluation des risques sanitaires d'alkyls per- et polyfluorés dans les eaux destinées à la consommation humaine. Saisine n° 2015-SA-0105 Saisine liée n° 2012-SA-0001 <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2015SA0105.pdf>
  39. EFSA (2018): Risk to human health related to the presence of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid in food. European Food Safety Authority. <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/5194>; <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2018.5194>
  40. ITRC (2021): PFAS — Per- and Polyfluoroalkyl Substances. Interstate Technology Regulatory Council. Juni 2022. <https://pfas-1.itrcweb.org/9-site-risk-assessment/>
  41. 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 non-aqueous large volume injection HPLC-MS/MS. *Environ. Sci. Technol.* 2013, 47, 5226–5234. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es3034999>
  42. Stockholm Convention: Perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related compounds. <http://chm.pops.int/Implementation/Alternatives/AlternativestoPOPs/ChemicalslistedinAnnexA/PFOA/tabid/8292/Default.aspx>
  43. Wang, N. Szostek, B., Buck, R.C., Folsom, P.W., Sulecki, L.M., Gannonet, J.T. (2009): Fluorotelomer alcohol aerobic soil biodegradation: Pathways, metabolites and metabolite yields. *Chemosphere. Volume 75, Issue 8, May 2009, Pages 1089-1096* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653509000496>
  44. Liu, J., Avendaño, S.M. (2013): Microbial degradation of polyfluoroalkyl chemicals in the environment: a review. *Environment international.* 1 November 2013, DOI:10.1016/j.envint.2013.08.022. CorpusID:28773717. <https://www.semanticscholar.org/paper/Microbial-degradation-of-polyfluoroalkyl-chemicals-Liu-Avenda%C3%B1o/cd3c413c79adf7cec83822997cf350a9705cd23d>
  45. Zhanga, Z., Sarkara, D., Kumar, J., Datta, B.R. (2022): Biodegradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review. *Bioresource Technology, Volume 344, Part B, January 2022, 126223* <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421015650>
  46. Wang, Z.Y., Cousins, I.T., Scheringer, M., Hungerbühler, K. (2013): Fluorinated alternatives to long-chain perfluoro-alkyl carboxylic acids (PFCAs),

- perfluoroalkane sulfonic acids (PFASs) and their potential precursors, *Environ. Int.*, 2013, 60, 242 – 248. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24660230/>
47. Karg, F. (2022): Management of FTOH: Fluorotelmere Alcohols (volatile PFAS) in ambient air of public site use scenarios (schools, kindergartens) & residences: site investigation, toxicological Health Risk Assessments (TERQ) / Gestion des FTOH : Fluorotéломère-Alcools (PFAS volatils) dans l'air ambiant des ERP sensibles (écoles, crèches) & habitations : diagnostics et évaluation des risques toxicologiques. AtmosFair, Lyon: 20 & 21/09/2022. Congress Minutes. [https://www.saturne.net/mud/index.php?d=atmosfair2022\\_program\\_abstracts](https://www.saturne.net/mud/index.php?d=atmosfair2022_program_abstracts)
  48. Karg, F. (2022): Actualized Legal framework of PFAS management in Soil, Groundwater and soil & discharge effluents and Leachates in Germany and France & EC wide potential evolution of the legislation concerning PFAS management in the next years. RemTech, Ferrara – Italia, 22/09/2022. Minutes of Congress.
  49. Karg, F. (2022): PFAS: Poly- & Perfluorierte aliphatische Substanzen: Vorkommen, Umweltchemie und Management Seminar zum PFAS-Management (PFC/PFT): Technische & juristische Lösungen zum Management bei PFAS-Altlasten (Boden & Grundwasser sowie bei Bodengas & Raumluftkontaminationen mit FTOH = flüchtige PFAS). HPC INTERNATIONAL-Seminar: Düsseldorf-Ratingen 27.09.2022.
  50. Karg, F. (2022): PFAS: Management of Pollution and Health Risks: Site Investigations, Environmental Chemistry, Risk Assessment (sensitive ERP and others), Regulatory Thresholds and Treatments (including volatile PFAS FTOH in soils, groundwater, soil gas & ambient air). International PFAS-Congress ARET-SFSE-HPC INTERNATIONAL, Paris 20 October 2022. Minutes of Congress. [https://www.saturne.net/mud/index.php?d=pfas\\_congress22\\_abstracts\\_pg](https://www.saturne.net/mud/index.php?d=pfas_congress22_abstracts_pg)
  51. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2022): Leitfaden zur PFAS-Bewertung. Stand: 21.02.2022. [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Bodenschutz/pfas\\_leitfaden\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/pfas_leitfaden_bf.pdf)
  52. B-LFU (2022): Vorläufige Leitlinien zur Bewertung von PFAS-Verunreinigungen in Wasser und Boden. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Stand Juli 2022. [https://www.lfu.bayern.de/analytik\\_stoffe/doc/leitlinien\\_vorlaufbewertung\\_pfc\\_verunreinigungen.pdf](https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/doc/leitlinien_vorlaufbewertung_pfc_verunreinigungen.pdf)
  53. Umweltbundesamt (2020): Senkung der Vorsorge-Maßnahmenwerte für PFOA/PFOS im Trinkwasser. <https://www.umweltbundesamt.de/senkung-der-vorsorge-massnahmenwerte-fuer-pfoapfos>
  54. LANUV (2022): Bewertungsmaßstäbe für PFAS-Konzentrationen für NRW. Leitfaden des Bundes zur PFAS-Bewertung, in NRW per Erlass vom 04.03.2022 eingeführt. <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/gefährstoffe/pfc/bewertungsmassstaebe#c6521>
  55. BAuA (2014): Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 402, Abschnitt 5.2.1 Stoff- und Bewertungsindex, [http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS-402.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS-402.pdf?__blob=publicationFile&v=7)
  56. LAWA (2017): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser: Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC). Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. 28.07.2017. [https://www.lawa.de/documents/03\\_anlage\\_3\\_bericht\\_gfs\\_fuer\\_pfc\\_endfassung\\_22\\_11\\_2017\\_2\\_1552302208.pdf](https://www.lawa.de/documents/03_anlage_3_bericht_gfs_fuer_pfc_endfassung_22_11_2017_2_1552302208.pdf)
  57. WHO/IPCS (2009): Assessment of combined exposures to multiple chemicals: report of a WHO/IPCS international workshop on aggregate/cumulative risk assessment. [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44113/9789241563833\\_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44113/9789241563833_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
  58. AFSSET, Karg, F. et al (2010): Valeurs toxicologiques de référence (VTR) pour les substances cancérigènes (Toxicological Reference Values for cancerogenic Compounds) - Méthode de construction de VTR fondées sur des effets cancérigènes - Saisine n°2004/AS16. Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail, 05/2010 (now ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire). [http://www.afsset.fr/upload/bibliotèque/141844903203317036420911165719/VTR\\_cancer\\_methodologie\\_afsset\\_mars10.pdf](http://www.afsset.fr/upload/bibliotèque/141844903203317036420911165719/VTR_cancer_methodologie_afsset_mars10.pdf); <https://www.anses.fr/fr/system/files/CHIM2004etAS16Ra.pdf>
  59. Umweltbundesamt (2011): Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung und Risikoanalyse an kontaminierten Standorten. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0351.pdf>
  60. ITVA-E1-AH7 (2020): Draft: Arbeitshilfe zur standortspezifischen humantoxikologischen Gefährdungsabschätzung und Ableitung von Maßnahmenwerten zum Management von schädlichen Bodenveränderungen oder Altlasten. Entwurf 2020.
  61. IPCS / WHO (2010): WHO Human Health Risk Assessment Toolkit: Chemical Hazards. 88 pages. [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44458/9789241548076\\_eng.pdf;jsessionid=B27779C17F31F535ED9F5AD57DA7D023?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44458/9789241548076_eng.pdf;jsessionid=B27779C17F31F535ED9F5AD57DA7D023?sequence=1)
  62. Wieneke, B., Zeilmaker, M., Fragki, S., Lijzen, J., Verbruggen, E., Bokkers, B. (2020): Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substance Mixtures: A Relative Potency Factor Approach. *Environ Toxicol Chem* 2021; 40:859 – 870. <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/etc.4835>
  63. Karg, F. (2018): Internationale Ansätze in der Gefährdungsabschätzung im Vergleich zum deutschen Bodenschutz-recht. (International Approaches of Health Risk Assessments in Comparaison with German Regulations) Seminar: Wirkungspfad Boden – Mensch: Regierungspräsidium Stuttgart (Seminar: Exposures from Soil to Humans. Stuttgart/Germany 20/02/2018. Seminarunterlagen.
  64. Karg, F. (2019): Needs for Technical & Regulatory Management for contaminations by PFT (PFAS):

- Poly- & Perfluorinated Tensides: Study cases for Environmental Chemistry, site Investigations, Risk Assessment and Site Decontamination & Remediation (Besoins de Gestion technico-réglementaire des Contaminations par des TPF : Tensioactifs Poly- & Perfluorés : Etudes de cas concernant la chimie environnementale, les évaluations des risques et la décontamination & réhabilitation des sites pollués. Minutes of Congress INTERSOL Lille / France: 26th to 28th of March 2019.
65. Karg, F. (2022): TERQ\*-Modell zur Rückrechnung von Raumluftkonzentrationen (PCB aus Fugen, Anstrichen, Deckenplatten, etc.) sowie bei anderen Schadstoffen zur Ermittlung der Notwendigkeit von Sanierungsmaßnahmen (TERQ\*-Model for Definition of Needs for Building Remediation & Decontamination in Case of PCB-Presence in In-Door Ambient Air)/Gesundheitsgefahren durch PCB in Gebäuden (Health Risks by PCB in Buildings). DECONEX Fachkongress Schadstoffmanagement/Congress Pollution Management in Buildings. Essen/Germany 19-20/01/2022. Congress Minutes.
66. ATSDR (2021): Toxicological Profile for Perfluoroalkyls. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp200-p.pdf>
67. MDHHS (2019): Michigan Department of Health and Human Services, Division of Environmental Health Michigan PFAS Action Response Team Human Health Workgroup. Public health drinking water screening levels for PFAS. [https://www.michigan.gov/documents/pfasresponse/MDHHS\\_Public\\_Health\\_Drinking\\_Water\\_Screening\\_Levels\\_for\\_PFAS\\_651683\\_7.pdf](https://www.michigan.gov/documents/pfasresponse/MDHHS_Public_Health_Drinking_Water_Screening_Levels_for_PFAS_651683_7.pdf)
68. TCEQ (2016): Perfluoro Compounds (PFCs): RfD Values. Texas Commission on Environmental Quality <https://www.tceq.texas.gov/assets/public/implementation/tox/evaluations/pfcs.pdf>
69. NJ-DW-QI (2017): Health-based maximum contaminant level support document: Perfluoro-octanoic acid (Pfoa). New Jersey Drinking Water Quality Institute Health Effects Subcommittee February 15, 2017. <https://www.state.nj.us/dep/watersupply/pdf/pfoa-appendix.pdf>
70. UBA (2020): Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen Anhang A. Texte 137/2020. Umweltbundesamt, Berlin. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-13\\_texte\\_137-2020\\_handbuch\\_pfas-anhang-a.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-13_texte_137-2020_handbuch_pfas-anhang-a.pdf)
71. BfR (2018): Perfluorierte Verbindungen PFOS und PFOA sind in Lebensmitteln unerwünscht. Bundesinstitut für Risikobewertung. <https://www.bfr.bund.de/cm/343/perfluorierte-verbindungen-pfos-und-pfoa-sind-in-lebensmitteln-unerwünscht.pdf>
72. State of New Hampshire Environmental Services (2019): Direct Contact Risk-Based Soil Concentrations for Perfluoro-octanoic acid (PFOA), Perfluoro-octane sulfonate (PFOS), Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS) and Perfluoro-nonanoic acid (PFNA): State of New Hampshire, December 11, 2019. <https://www4.des.state.nh.us/nh-pfas-investigation/wp-content/uploads/PFAS-DCRB-value-121119.pdf>
73. US Department of Defense (Assessed 27/10/2022): Appendix I – PFAS Toxicity Profiles. <https://defence.gov.au/Environment/PFAS/docs/Tindal/Reports/201806HHRAAppIToxicityProfiles.pdf>
74. Wie-Chun Chou, Zhoumeng Lin (2020): Probabilistic human health risk assessment of perfluorooctane sulfonate (PFOS) by integrating in vitro, in vivo toxicity, and human epidemiological studies using a Bayesian-based dose-response assessment coupled with physiologically based pharmacokinetic (PBPK) modeling approach. *Environment International*, Volume 137, April 2020, 105581. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32087483/>
75. US-EPA (2021): Health & Environmental Research Online (HERO). United States Environmental Protection Agency. [https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference\\_id/5026091](https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/5026091)
76. US-EPA (2019): Systematic Review Protocol for the Perfluorodecanoic Acid (PFDA) IRIS Assessments (Preliminary Assessment Materials). United States Environmental Protection Agency. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=NCEA&count=10000&dirEntryId=345088&searchall=&howcriteria=2&simplesearch=0&timstype=](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NCEA&count=10000&dirEntryId=345088&searchall=&howcriteria=2&simplesearch=0&timstype=)
77. EFSA (2020): PFAS in Lebensmitteln: Risikobewertung und Festlegung einer tolerierbaren Aufnahmemenge durch die EFSA. European Food Safety Authority. 17.09.2020. <https://www.efsa.europa.eu/de/news/pfas-food-efsa-assesses-risks-and-sets-tolerable-intake>

### Autorenschaft

Dr. rer. nat. Frank Karg<sup>(1,2)</sup>

Wissenschaftlicher Direktor der HPC-Gruppe & Vorstand-CEO der HPC INTERNATIONAL  
Fachausschussleiter ITVA-E1 (Gefährdungsabschätzung)  
E-Mail: frank.karg@hpc-international.com  
Telefon: 0033 607 346 916

Ulrike Hintzen<sup>(1)</sup>, Diplom-Geologin/Projekt Direktorin  
E-Mail: ulrike.hintzen@hpc-international.com  
Telefon: 02065 708 492-1

Lucie Robin-Vigieron<sup>(2)</sup>, Chemie & Sanitätsingenieurin/  
Projekt Direktorin  
E-Mail: lucie.robin-vigieron@hpc-international.com  
Telefon: 0033 298 154 063

Dr. Stephan Mostersteg<sup>(3)</sup>, Senior Engineer-  
Kreislaufwirtschaft, Bodenschutz Environmental SE  
E-Mail: stephan.mostersteg@thyssenkrupp.com  
Telefon: 0203 52-26332

<sup>(1)</sup> HPC INTERNATIONAL SAS

Dr. Alfred-Herrhausen-Allee 12, 47228 Duisburg

<sup>(2)</sup> HPC INTERNATIONAL SAS

Perharidy Medical Centre, 29680 Roscoff, Frankreich

<sup>(3)</sup> THYSSENKRUPP

thyssenkrupp Steel Europe AG,

Kaiser-Wilhelm-Straße 100, 47166 Duisburg