

TEXTE

137/2020

Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS- Kontaminationen

Abschlussbericht

TEXTE 137/2020

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 76 231 0
FB000332/ANL

Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen

Abschlussbericht

von

Dr. Thomas Held, Dr. Michael Reinhard
Arcadis Germany GmbH, Darmstadt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Arcadis Germany GmbH
Europaplatz 3
64293 Darmstadt

Abschlussdatum:

November 2019

Redaktion:

Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes
Jörg Frauenstein

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Die Erstellung der vorliegenden Arbeitshilfe wurde durch eine Projektbegleitgruppe unterstützt. Für die vielen hilfreichen Diskussionen und Hinweise sowie die Qualitätssicherung möchten wir uns bedanken. Mitglieder der Projektbegleitgruppe waren:

Frau Dr. Inge Bantz, Landeshauptstadt Düsseldorf, Umweltamt

Herr Andreas Bielke, Bundesanstalt für Immobilienaufgaben

Herr Mauricio Breitstadt, Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Frau Dr. Alexandra Christ, Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz

Herr Jörg Frauenstein, Umweltbundesamt

Herr Bernd Garz, Bundesanstalt für Immobilienaufgaben

Herr Gernot Huber, Bayerisches Landesamt für Umwelt

Frau Dr. Helena Salowsky, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

Herr Stefan Schroers, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Frau Monika Schwab-Wyssler, Bundesamt für Umwelt, Schweiz

Herr Dr. Thomas Strassburger, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Herr Reiner Söhlmann, Landkreis Rastatt, PFC-Geschäftsstelle

Herr Ingo Valentin, Landeshauptstadt Düsseldorf, Umweltamt

Kurzbeschreibung

Die Stoffgruppe der PFAS gewinnt bei der Bearbeitung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen zunehmend an Bedeutung. Nachdem in Deutschland inzwischen mehrere Arbeitshilfen und methodische Ansätze zur Erfassung, Messung und Bewertung von PFAS-Kontaminationen entwickelt wurden, fehlten bislang bundesweit abgestimmte Arbeitshilfen für deren Sanierung und den ihr vorgelegerten Untersuchungsphasen der orientierenden Untersuchung (OU), Detailuntersuchung (DU) und Sanierungsuntersuchung (SU).

Die vorliegende Arbeitshilfe „Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen“ unterstützt vollzugstauglich die zuständigen Behörden bei der Vorauswahl, der Bewertung und der Entscheidung für ein geeignetes und verhältnismäßiges Sanierungsverfahren und zeigt relevante Rahmenbedingungen sowie gegebenenfalls flankierende Maßnahmen auf.

Wegen der unterschiedlichen Stoffeigenschaften der PFAS sind auch die möglichen Sanierungsverfahren einzelstoffspezifisch zu bewerten. Es werden für die in Frage kommenden Sanierungsverfahren die Vor- und Nachteile, die technischen und genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen sowie deren Nachhaltigkeit aufgezeigt.

In die Arbeitshilfe sind die Ergebnisse von zwei in den Jahren 2018 und 2019 durchgeführten länderübergreifenden Fachgesprächen eingeflossen.

Abstract

The contaminant group PFAS is becoming increasingly important in the treatment of contaminated sites. In Germany, after several guidelines and methodological approaches for registration of potentially contaminated sites, the investigation and evaluation of PFAS have been developed, there have so far been no nationwide coordinated guidelines providing management tools for the remediation of local and extended PFAS contaminations and the previous phases of the orientating investigation, detailed investigation, and remediation feasibility appraisal.

The present guideline "Remediation management for local and extended PFAS contamination" prepared in the context of a research project ensures that the authorities are fully operational in the selection, evaluation and decision-making of appropriate and proportionate remediation solutions and support management concepts and shows relevant framework conditions and, if necessary, accompanying measures.

Due to the varying properties of the individual substances of the PFAS group, the possible technical remediation options must be assessed on a substance-specific basis. For technical remediation options in question, the advantages and disadvantages of the various solutions, technical requirements, aspects of legal approval as well as their sustainability are discussed in the guideline.

The guideline has incorporated the results of two nationwide technical workshops held in 2018 and 2019.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis (Allgemein).....	8
Abkürzungsverzeichnis (Fluorierte Verbindungen)	11
Zusammenfassung.....	14
Summary.....	15
1 Einleitung und Zielsetzung.....	16
2 Allgemeine Grundlagen	17
2.1 Sanierungsbestimmende Stoffeigenschaften der PFAS-Verbindungen	17
2.2 Abgrenzung von lokalen und flächenhaften PFAS-Kontaminationen.....	18
2.3 Konzeptionelles Standortmodell	19
2.4 Wirkungspfade und Rezeptoren.....	22
2.5 Mögliche betroffene Behörden und Rechtsgebiete	26
2.6 Probenahme, Leitparameter, Precursor, Summenparameter und Qualitätssicherung	33
3 Sanierungsmanagement und -planung für Punktquellen.....	36
3.1 Sanierungsmanagement	36
3.2 Sanierungsuntersuchung	38
3.2.1 Festlegung von Sanierungszielen/-zielwerten	38
3.2.2 Ergänzende Untersuchungen zur Sanierungsplanung	40
3.2.3 Auswahl und Bewertung von Sanierungsverfahren.....	41
3.3 Hinweise zur Sanierungsausführung	48
4 Sanierungsmanagement für flächenhafte PFAS-Kontaminationen.....	49
4.1 Einleitung	49
4.2 Management bei PFAS-Einwirkung auf das Grundwasser (Wirkungspfad Boden → Grundwasser)	49
4.2.1 Orientierende Untersuchung - Abgrenzung der schädlichen Bodenveränderungen	49
4.2.2 Orientierende Untersuchung - integrale Untersuchung und Bewertung	50
4.2.3 Integrale Detailuntersuchung von Teilbearbeitungsgebieten	55
4.2.4 Integrale Sanierungsuntersuchung für Teilbearbeitungsgebiete	56
4.2.5 Integraler Sanierungsplan für Teilbearbeitungsgebiete	56
4.2.6 Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen (als Sofortmaßnahmen).....	57

4.3	Management bei PFAS-Einwirkung auf Grund- und Oberflächenwassernutzungen (Wirkungspfad Boden → Gewässer)	58
4.4	Management bei PFAS-Einwirkung auf Nutzpflanzen (Wirkungspfad Boden → Pflanze)	59
4.5	Management bei PFAS-Einwirkung auf von Menschen genutzten Flächen (Wirkungspfad Boden → Mensch)	61
4.6	Management bei PFAS-Einwirkung auf Hausgärten (Wirkungspfad Boden → Mensch)	62
4.7	Management im Umgang mit PFAS-kontaminierten Böden	63
5	Kreislaufwirtschaft	66
6	Öffentlichkeitsbeteiligung	70
6.1	Erfordernis der Öffentlichkeitbeteiligung und grundlegende Vorgehensweise	70
6.2	Beteiligte Interessengruppen (Stakeholder)	71
6.3	Risikokommunikation	71
7	Quellenverzeichnis	75

Anhang A PFAS-Charakterisierung

Anhang B Bewertung und ermessensleitende Dokumente

Anhang C Sanierungsverfahren

Anhang D Projektbeispiele

Anhang E Forschungsbedarf

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Konzeptionelles Standortmodell	20
Abbildung 2	Mögliche Expositionspfade am Beispiel einer flächenhaften Düngemittelaufbringung ...	23
Abbildung 3	PFAS-Verteilung im Abstrom von Seen oder künstlichen Grundwassereinschnitten	25
Abbildung 4	Vereinfachtes Schema zur Identifizierung der Wirkungspfade und Rezeptoren	25
Abbildung 5	Prüfschema (Orientierende Untersuchung)	35
Abbildung 6	Beispiel Sanierungsstrategie.....	36
Abbildung 7	Anforderungen an die Sanierung von Boden und Grundwasser im Rahmen der Gefahrenabwehr.....	39
Abbildung 8	Mögliche Sanierungsverfahren für Grundwasser (blau: <i>In-situ</i> -Anwendung).....	44
Abbildung 9	Mögliche Sanierungsverfahren für Boden (blau: <i>In-situ</i> -Anwendung).....	46
Abbildung 10	Beispielhaftes Schema zum Einmischverhalten der PFAS in den Grundwasserleiter	51
Abbildung 11	Realer Beispielfall für einen jahreszeitabhängigen, modellierten Schadstoffeintrag aus einer Einzelfläche in das Grundwasser	52
Abbildung 12	Schematische Konzentrationsverläufe zweier sich überlagernder Schadstofffahnen	52
Abbildung 13	Beispiel für die Abgrenzung eines Flächenclusters und Teilbearbeitungsgebietes.....	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Auswahl von möglichen PFAS Austragsquellen und betroffenen belasteten Medien.....	26
Tabelle 2	Mögliche betroffene Behörden (Rechtsgebiete) bei unterschiedlichen Schadstoffquellen	28
Tabelle 3	Mögliche betroffene Behörden (Rechtsgebiete) bei belasteten Böden	29
Tabelle 4	Mögliche betroffene Behörden (Rechtsgebiete) bei belastetem Grundwasser und Oberflächengewässer	30
Tabelle 5	Mögliche betroffene Behörden (Rechtsgebiete) bei belastetem Abfall und Abraum	32
Tabelle 6	Designkriterien und Überlegungen zur PFAS-Sanierung (ergänzt und verändert, nach NGWA, 2017)	42
Tabelle 7:	Zusammenfassung der Verfahrensbewertung für Grundwasser	45

Abkürzungsverzeichnis (Allgemein)

AbfKlärV	Abfallklärschlammverordnung
AbwAG	Abwasserabgabengesetz
AFFF	<i>Aqueous Foam Forming Fluids</i> (Wässrige schaumbildende Flüssigkeiten)
AFFF (AR)	Alkoholbeständige wasserfilmbildende Schaummittel
AIX	<i>Anion Exchanger</i> (Anionenaustauscher)
AK	Aktivkohle
AOF	Adsorbierbares organisch gebundenes Fluor
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
AP	Alkalische Phosphatasen
ASE	<i>Accelerated solvent extraction</i> (Extraktion mit erhöhtem Druck und Temperatur)
BAF	Bioakkumulationsfaktor
BauGB	Baugesetzbuch
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BCF	Biokonzentrationsfaktor
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
BG	Bestimmungsgrenze
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BMF	Biomagnifikationsfaktor
BSAF	Biota-Sediment-Akkumulationsfaktor
BV	Bettvolumina
BW	<i>Body weight</i> (Körpergewicht)
BWaldG	Bundeswaldgesetz
CBA	<i>Cost-benefit analysis</i> (Kosten-Wirksamkeitsanalyse)
CIC	<i>Combustion ion chromatography</i> (Verbrennungs-Ionenchromatographie)
CMC	<i>Critical micelle concentration</i> (kritische Mizellenkonzentration)
CSM	<i>Conceptual site model</i> (konzeptionelles Standortmodell)
DCM	Dichlormethan
DIN EN	Deutsches Institut für Normung, Europäische Norm
DOC	<i>Dissolved organic carbon</i> (gelöster organischer Kohlenstoff)
DüngG	Düngegesetz
DüV	Düngeverordnung
EBCT	<i>Empty bed contact time</i> (Leerbett-Kontaktzeit)

EC	<i>European Commission</i> (Europäische Kommission)
ECF	Elektrochemische Fluorierung
EOF	Extrahierbares organisch gebundenes Fluor
F&G	<i>Funnel-and-Gate</i>
FlurbG	Flurbereinigungsgesetz
FFFP	Wasserfilmbildende Fluor-Proteinschaummittel
FFFP (AR)	Alkoholbeständige wasserfilmbildende Fluor-Proteinschaummittel
FP	Fluor-Proteinschaummittel
FP (AR)	Alkoholbeständige Fluor-Proteinschaummittel
FutMG	Futtermittelgesetz
GAC	<i>Granular activated carbon</i> (granuläre Aktivkohle)
GC-PCI-MS	Gaschromatographie-Massenspektrometrie-Kopplung mit pos. chem. Ionisierung
GFS	Geringfügigkeitsschwellenwert
GOK	Geländeoberkante
GOW	Gesundheitlicher Orientierungswert
GWM	Grundwassermessstelle
HDPE	<i>High density polyethylene</i> (Hart-Polyethylen)
HPLC-MS/MS	<i>High performance liquid chromatography – tandem-mass spectrometry</i> (Flüssigchromatographie mit Tandem-Massenspektrometrie-Kopplung)
IA	Ionenaustauscher
ISCO	<i>In-situ Chemical Oxidation</i> (In-situ chemische Oxidation)
JD-UQN	Umweltqualitätsnorm, jährlicher Durchschnittswert
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LD ₅₀	Letale Dosis für 50 % der Organismen
LDPE	<i>Low density polyethylene</i> (Polyethylen geringer Dichte)
LfU	Landesamt für Umwelt
LMBG	Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetzes
LNAPL	<i>Light non-aqueous phase liquids</i> (leichte nicht-wässrige Flüssigphasen)
LW	Leitwert
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MTBE	Methyl-tert-butylether
MW	Molekulargewicht
NF	Nanofiltration
NOAEL	<i>No observed adverse effect level</i> (Konzentration ohne beobachtbaren nachteiligen Effekt)
NRW	Nordrhein-Westfalen

OECD	<i>Organization for economic co-operation and development</i> (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
P&T	Pump and Treat (Hydraulische Grundwassersanierung)
PBT	Persistent, bioakkumulativ, toxisch
POP	<i>Persistent Organic Pollutants</i> (Persistente organische Schadstoffe)
PRB	Permeable reaktive Barrieren
PU	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
QA/QC	<i>Quality Assurance, Quality Control</i> (Qualitätssicherung, Qualitätskontrolle)
REACH	<i>Registration, evaluation, authorisation of chemicals</i> (Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien)
RO	<i>Reversed osmosis</i> (Umkehrosmose)
RPF	Relative Potenzfaktoren
RSSCT	<i>Rapid small-scale column tests</i> (schnelle kleinkalibrige Säulenversuche)
RTF	<i>Root transfer factor</i> (Wurzel-Transferfaktor)
SchALVO	Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung
SHMV	Schadstoff-Höchstmengenverordnung
SPE	<i>Solid phase extraction</i> (Festphasenextraktion)
TBA	tert-Butylalkohol
TD	Thermische Desorption
TDI	Tolerable Daily Intake (tolerierbare tägliche Aufnahmemenge)
TF	Transferfaktor
TMF	Trophischer Magnifikationsfaktor
TOC	<i>Total organic carbon</i> (gesamter organischer Kohlenstoff)
TOP	<i>Total oxidizable precursor</i> (Gesamtmenge oxidierbarer Precursor)
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
TS	Trockensubstanz
UV	Ultraviolett
vB	<i>very bioaccumulative</i> (sehr bioakkumulativ)
VDP	Verband Deutscher Papierfabriken
vPvB	<i>very persistent, very bioaccumulative</i> (sehr persistent, sehr bioakkumulativ)
VOF	<i>Volatile organic fluorine</i> (Flüchtiges organisches Fluorid)
W/F	Wasser-zu-Feststoff-Verhältnis
WAK	Wasseraktivkohlefilter
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Abkürzungsverzeichnis (Fluorierte Verbindungen)

2H-PFHxA	Perfluorhexansäure (das 2. C-Atom bindet H und F)
ADONA	Ammonium-4,8-dioxa-3H-perfluornonanoat
Alkyl-PAP	Perfluoralkyl-organische Phosphate
APFO	Perfluoroktansulfonat, Ammoniumsalz
diPAP	Fluortelomerphosphatdiester
EtFASA	N-Ethyl-Perfluoralkansulfonamide
EtFASE	N-Ethyl-Perfluoralkansulfonamid-ethanole
FASA	Perfluoroalkylsulfonamide
FASE	Perfluoralkylsulfonamidethanole
FCH	Fluorcarbonharze
FTAC	Fluortelomeracrylate
FTAL	Fluortelomer-aldehyde
FTCA	Fluortelomercarboxylsäuren
FTEO	Fluortelomerethoxylate
FTI	Fluortelomerjodide
FTMAC	Fluortelomer-methacrylate
FTO	Fluortelomerolefine
FTOH	Fluortelomeralkohole
FTS	Fluortelomersulfonsäuren
FTSaAm	Fluortelomersulfonamidamine
FTSaB	Fluortelomersulfonamidbetaine
FTSAS	Fluortelomer-mercaptoalkylamid-sulfonat
FTUAL	Fluortelomer ungesättigte Aldehyde
FTUCA	Ungesättigte Fluortelomercarbonsäuren
FUCA	Fluorierte ungesättigte Carbonsäuren
H4PFOS	H4-Polyfluoroktansulfonsäure
HFPO-DA	Hexafluorpropylenoxiddimersäure
MeFASA	N-Methyl-Perfluoralkansulfonamide
MeFASE	N-Methyl-Perfluoralkansulfonamid-ethanole
monoPAP	Fluortelomerphosphatmonoester
N,N-Me2FOSA	N,N-Dimethylperfluor-1-octansulfonamid
N-EtFOSE	N-Ethylperfluorooctylsulfonamidoethanol
N-MeFOSE	N-Methylperfluorooctylsulfonamidoethanol

PAP	Polyalkylphosphate
PFAA	Perfluoralkansäuren
PFAI	Perfluoroalkyljodide
PFAL	Perfluoraldehyde
PFAS	Poly- und perfluorierte Alkylsubstanzen
PFBA	Perfluorbutansäure
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure
PFCA	Perfluoralkancarbonsäuren
PFDA	Perfluordekansäure
PFDoA	Perfluordodekansäure
PFDoS	Perfluordodekansulfonsäure
PFEA	Perfluoralkylethersäuren
PFEtS	Perfluorethansulfonate
PFHpA	Perfluorheptansäure
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure
PFHxA	Perfluorhexansäure
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure
PFMOAA	Perfluor-2-methoxyessigsäure
PFMOPrA	Perfluor-2-methoxypropansäure
PFNA	Perfluornonansäure
PFO2HxA	Perfluor-2-dioxahexansäure
PFOA	Perfluoroktansäure
PFOAF	Perfluoralkylcarbonylfluorid
PFOS	Perfluoroktansulfonsäure
PFOSA	Perfluoroktansulfonamid
PFOSF	Perfluoralkylsulfonylfluorid
PFPA	Perfluorierte Phosphorsäuren
PFPE	polyfluorierte Polyether
PFPeA	Perfluorpentansäure
PFPiA	Perfluoroalkylphosphinsäuren
PFPrA	Perfluorpropansäure
PFPrS	Perfluorpropansulfonsäure
PFSA	Perfluoralkansulfonsäuren
PFSiA	Perfluoralkylsulfinsäuren
PTFE	Polytetrafluorethylen

SAmPAP	Sulfonamidethanol-basierte Phosphate
sFTOH	sekundäre Fluortelomeralkohole
TFA	Trifluoressigsäure
triPAP	Fluortelomerphosphatriester
UAcid	Ungesättigte Fluortelomercarbonsäuren

Zusammenfassung

Die Stoffgruppe der PFAS gewinnt bei der Bearbeitung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen zunehmend an Bedeutung. Nachdem in Deutschland inzwischen mehrere Arbeitshilfen und methodische Ansätze zur Erfassung, Messung und Bewertung von PFAS entwickelt wurden, fehlten bislang vergleichbare Arbeitshilfen für das Sanierungsmanagement von punktuellen und flächenhaften PFAS-Kontaminationen. Dabei ist es erforderlich, auch Hinweise zur PFAS-spezifischen Vorgehensweise in planungsbegleitenden Untersuchungen zu geben.

Die im Rahmen des Ressortforschungsplans des BMU erstellte Arbeitshilfe „Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen“ unterstützt vollzugstauglich die zuständigen Behörden bei der Auswahl, der Bewertung und der Entscheidungsfindung zu geeigneten und verhältnismäßigen Sanierungslösungen und Managementkonzepten und zeigt relevante Rahmenbedingungen sowie flankierende Maßnahmen auf.

Wegen der unterschiedlichen Eigenschaften der innerhalb der Stoffgruppe PFAS vorkommenden Verbindungen sind auch die möglichen technischen Sanierungsoptionen sehr unterschiedlich zu bewerten. Es werden für technische Sanierungsoptionen Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Lösungsansätze, technische und genehmigungsrechtliche Voraussetzungen, aber auch deren Nachhaltigkeit aufgezeigt. In die Arbeitshilfe sind Ergebnisse von zwei in den Jahren 2018 und 2019 durchgeführten länderübergreifenden Fachgesprächen eingeflossen.

Die Arbeitshilfe ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 werden die PFAS-spezifischen Grundlagen beschrieben, die für die späteren Entscheidungen zur Sanierung wesentlich sind. Dazu gehören insbesondere die Wirkungspfade und Rezeptoren, die betroffenen Behörden und Rechtsgebiete sowie Hinweise zu Probenahme, Leitparametern und Precursor.

Kapitel 3 beschreibt die Sanierung von PFAS-Punktquellen. Diese unterscheidet sich nicht grundlegend von der seit über 30 Jahren praktizierten Sanierung konventioneller Schadstoffe. Die Schadstoffgruppe PFAS weist jedoch einige Besonderheiten in ihrem Verhalten auf, die eine Anpassung der bodenschutzrechtlichen Bearbeitungsstufen erforderlich machen.

In Kapitel 4 werden die Besonderheiten beim Sanierungsmanagement von flächenhaften Kontaminationen beschrieben und Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Derzeit gibt es bei vielen PFAS-Sanierungen Schwierigkeiten bei verschiedenen abfallrechtlichen Aspekten im Rahmen der Kreislaufwirtschaft. Kapitel 5 beschreibt die derzeitige Lage und gibt Hilfestellungen.

Eine grundlegende Herausforderung beim Umgang mit PFAS-kontaminiertem Boden ist, dass es derzeit für sehr große Bodenvolumen keine verhältnismäßigen Dekontaminationsmöglichkeiten und kaum Beseitigungsmöglichkeiten in Deponien gibt. In Kapitel 5 sind die derzeitige Lage beschrieben und Handlungsvorschläge zum Umgang mit Böden im Rahmen der Kreislaufwirtschaft formuliert.

Durch die hohe Mobilität und Persistenz besteht insbesondere bei flächenhaften PFAS-Verunreinigungen ein großes Interesse der Öffentlichkeit und oft eine hohe Unsicherheit. In Deutschland besteht zwar keine rechtliche Pflicht, es wird jedoch empfohlen, vor allem bei größeren Projekten die Öffentlichkeit proaktiv zu beteiligen. In Kapitel 6 sind Empfehlungen zur Öffentlichkeitsarbeit beschrieben.

In den Anhängen A bis C sind detaillierte Informationen zu der Stoffgruppe der PFAS, zu derzeit angewandten Bewertungen und zu Sanierungsverfahren enthalten. Sanierungsbeispiele finden sich in Anhang D und in Anhang E ist der weitere Forschungsbedarf formuliert.

Summary

The contaminant group PFAS is becoming increasingly important in the treatment of contaminated sites. In Germany, after several guidelines and methodological approaches for registration of potentially contaminated sites, the investigation and evaluation of PFAS have been developed, guidelines providing management tools for the remediation of local and extended PFAS contaminations still have been missing. It is also necessary to provide guidance on how to proceed in the investigation phase during the planning.

The present guideline "Remediation management for local and area-based PFAS contamination" is intended to ensure that the authorities are fully operational in the selection, evaluation and decision-making of appropriate and proportionate remediation solutions and support management concepts and should demonstrate relevant framework conditions and, if necessary, accompanying measures.

Due to the varying properties of individual substances of the PFAS group, the possible technical remediation options are also to be assessed differently. For technical remediation options, the advantages and disadvantages of the various solutions, technical and licensing requirements, as well as their sustainability are discussed.

The guideline has incorporated the results of two nationwide technical workshops held in 2018 and 2019.

The guideline is structured as follows: Chapter 2 describes the general basis for remediation management. This includes the source-receptor-pathways and the receptors to be considered in the management of remediation, the concerned authorities and areas of law to be taken into account, as well as information on sampling, key parameters and precursors.

The remediation management of local PFAS point sources is not fundamentally different from the management of conventional pollutants that has been in practice for more than 30 years. However, the pollutant group PFAS has some peculiarities in its behavior, which require some modifications. Chapter 3 describes possible procedures for remediation management for point sources.

Chapter 4 describes the special features of remediation management for extended contaminations.

At present, many PFAS remediations have difficulties in disposal. Chapter 5 describes the current situation and provides guidance. A fundamental challenge when dealing with PFAS-contaminated soil is that there are limited possibilities to decontaminate the soil and the fact that only a small number of disposal sites exists, which accept PFAS-containing soils. Chapter 5 describes the current situation and proposes actions to deal with soils in the context of the recycling management.

Due to the high mobility and persistence, there is a great public interest and often a high degree of uncertainty, especially in the case of extended PFAS contaminations. In Germany, there is no legal obligation, but it is recommended that the public be proactively involved especially in the case of larger contaminations. Chapter 6 describes recommendations for public relation works.

Annexes A to C contain detailed information on the PFAS group, on current assessments and on remediation procedures. Project examples can be found in Annex D and in Annex E further research needs are formulated.

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Stoffgruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) kommt nicht natürlich vor, sondern ist ausschließlich anthropogenen Ursprungs. Sie umfasst mehr als 4.700 Stoffe (OECD, 2018). Die in der Arbeitshilfe verwendete Abkürzung PFAS entspricht der international einheitlich verwendeten Bezeichnung für die Stoffgruppe, in Deutschland wird dazu die Bezeichnung PFC verwendet.

PFAS sind persistent, sehr mobil sowie öko- und humantoxikologisch hoch wirksam. Die nicht vollständig fluorierten, so genannten polyfluorierten Chemikalien können zu persistenten, vollständig fluorierten (perfluorierten) Chemikalien abgebaut werden und werden als Vorläufer (Precursor) bezeichnet. Ein vollständiger mikrobieller Abbau der PFAS wurde bisher noch nicht nachgewiesen.

PFAS werden während der gesamten Produktlebenszyklen in die Umwelt emittiert, d. h. von der Herstellung der Ausgangschemikalien, über den Einsatz bei der Fluorpolymerherstellung oder der Verwendung der PFAS-haltigen Verbraucherprodukte im Alltag bis hin zur Entsorgung der Produkte. Sind PFAS einmal in die Umwelt gelangt, verbleiben sie dort aufgrund ihrer Persistenz für sehr lange Zeit (ECHA, 2018). Im Hinblick auf den nachsorgenden Bodenschutz sind vor allem die Wirkungspfade Boden → Grundwasser und Boden → Pflanze relevant.

Es ist zwischen lokalen, durch Punktquellen verursachte und flächenhaften PFAS-Kontaminationen zu unterscheiden. Vereinfacht ausgedrückt, sind Punktquellen klassische Quellen wie beispielsweise Galvaniken, Feuerlöschplätze und vergleichbare Einsatzorte. Flächenhafte Kontaminationen sind großräumig und können zum Beispiel durch die Aufbringung PFAS-kontaminierter Düngemittel und sogenannten „Bodenverbesserer“ oder durch luftgetragene PFAS (Aerosole) entstehen.

Bislang ist aufgrund der wenig aussagekräftigen Datenlage noch keine abschließende Einschätzung der vorhandenen Umweltbelastung durch PFAS möglich. Vorliegende Erfassungen der Länder konzentrieren sich derzeit vorwiegend auf Verdachts- und Schadensfälle mit punktförmigen Schadstoffinträgen (Flughäfen einschließlich militärischer Standorte, Großbrände mit Einsatz PFAS-haltiger Feuerlöschschäume, etc.). Weitaus unklarer ist die Datenlage zu flächenhaften Belastungen von Böden durch PFAS. Insbesondere in Baden-Württemberg sind auf landwirtschaftlich genutzten Flächen sehr großflächige PFAS-Kontaminationen gefunden worden, die durch die Beaufschlagung mit kontaminierten Düngemitteln entstanden sind. Auch im bayerischen Gendorf und im holländischen Dordrecht sind flächenhafte Belastungen durch atmosphärische Depositionen aus fluorchemischen Anlagen bekannt. Die bekannten Fälle geben Anhaltspunkte auf das mögliche Vorliegen weiterer flächenhafter PFAS-Kontaminationen in Deutschland.

Nachdem in Deutschland inzwischen mehrere Arbeitshilfen und methodische Ansätze zur Erfassung, Messung und Bewertung von PFAS entwickelt wurden, fehlten bislang vergleichbare Arbeitshilfen für Managementinstrumente zur Sanierung von punktuellen und flächenhaften PFAS-Kontaminationen. Dabei ist es erforderlich, auch Hinweise zur Vorgehensweise in der Untersuchungsphase zu geben.

Wegen der differenzierten Eigenschaften der Stoffgruppe PFAS (Anhang A) sind auch die möglichen technischen Sanierungsoptionen (Anhang C) sehr unterschiedlich zu bewerten. Es werden für technische Sanierungsoptionen Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Lösungsansätze, technische und genehmigungsrechtliche Voraussetzungen, aber auch deren Nachhaltigkeit aufgezeigt und verglichen.

Die vorliegende Arbeitshilfe soll vollzugstauglich die zuständigen Behörden bei der Auswahl, der Bewertung und der Entscheidungsfindung zu geeigneten und verhältnismäßigen Sanierungslösungen und Managementkonzepten unterstützen und relevante Rahmenbedingungen und flankierende Maßnahmen aufzeigen.

Der in der Arbeitshilfe dargestellte Wissensstand reflektiert die Kenntnisse im Jahr 2019. Es ist empfehlenswert, die vorliegende Arbeitshilfe fortzuschreiben.

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Sanierungsbestimmende Stoffeigenschaften der PFAS-Verbindungen

Die Stoffeigenschaften der PFAS sind in Anhang A zusammengefasst. PFAS unterscheiden sich substantiell von herkömmlichen „klassischen“ Schadstoffen. Aufgrund der Tatsache, dass perfluorierte Verbindungen weitgehend inert gegenüber mikrobiellem und chemischem Angriff sowie, mit Ausnahme der FTOH, nicht flüchtig sind, scheiden viele Sanierungsverfahren aus. Ihre hohe Mobilität führt nach dem Eintrag der PFAS ins Grundwasser rasch zu ausgedehnten Grundwasserfahnen, für die sich *In-situ*-Verfahren allein aus Kostengründen derzeit verbieten (Held, 2017).

Nur für einen geringeren Teil der mehreren Tausend in Industrie und Haushalt eingesetzten PFAS-Verbindungen existieren kommerziell verfügbare analytische Nachweisverfahren (Anhang A, Kapitel 4). Analysierbar sind zumindest die relevanten Perfluoralkancarbon- und -sulfonsäuren, darunter alle 13 Verbindungen, für die es aktuelle Beurteilungswerte gibt (Anhang B).

Ein großer Teil der PFAS ist polyfluoriert und mikrobiell transformierbar. Als nicht weiter abbaubare Endprodukte entstehen (oft mit großer Zeitverzögerung) die Perfluoralkancarbon und -sulfonsäuren. Dies sind genau die Substanzen, die mobil sind, toxisch wirken und für die es bereits teilweise geregelte Prüfwerte gibt. Aufgrund der Transformierbarkeit werden die Ausgangsverbindungen als Precursor bezeichnet. Eine Nichtbeachtung der Precursor kann in allen Bearbeitungsstufen zu unvollständigen Bewertungen führen. Deshalb sollen diese Substanzen im Sanierungsmanagement mitberücksichtigt werden, auch wenn es hierzu keine Beurteilungswerte gibt (Held u. Reinhard, 2016).

So kann beispielsweise bei Nichtberücksichtigen der Precursor eine Gefahrverdachtsuntersuchung unmittelbar nach dem Einsatz von fluorverbindungshaltigen Feuerlöschschäumen (sogenannte AFFF-Schäume¹) das Ergebnis haben, dass vermeintlich keine perfluorierten PFAS vorhanden sind. Aus den Precursor werden aber mit der Zeit die analytisch nachweisbaren perfluorierten PFAS durch mikrobielle Transformation gebildet und freigesetzt. Diese Gefährdung könnte im schlechtesten Fall bei einer Gefahrverdachtsuntersuchung übersehen und die Situation falsch eingeschätzt werden.

Sanierungsbestimmende Stoffeigenschaften der PFAS-Verbindungen

PFAS bilden keine Produktphasen, akkumulieren vor allem in der ungesättigten Bodenzone, reichern sich an Luft/Wasser-Grenzflächen an und sind nicht mikrobiell mineralisierbar. Eine Anreicherung der PFAS in Schwer- oder Leichtphasen bzw. an der Grenzfläche zu den Phasen ist möglich.

Ein Eintrag in das Grundwasser kann sehr lange Schadstofffahnen verursachen. Die Biotransformation von Precursor kann in Abhängigkeit der Redoxbedingungen in der Quelle und an Orten fern der Eintragsstelle zu einer Neubildung perfluorierter Carbon- und Sulfonsäuren führen. Vor allem ihre hohen Resistenzen gegenüber mikrobiellem, chemischem und thermischem Abbau sind bestimmend bei der Auswahl von Sanierungsverfahren.

¹ AFFF = Aqueous Foam Forming Films

2.2 Abgrenzung von lokalen und flächenhaften PFAS-Kontaminationen

Für die nachfolgende Bearbeitung ist es zunächst erforderlich, lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen abzugrenzen. Das gelingt nicht immer auf einfache Weise, weil die Übergänge fließend sind.

Ein Beispiel einer lokalen oder punktuellen PFAS-Kontamination ist der Eintrag von PFAS in Boden und Grundwasser auf dem Standort einer Galvanik. Da die PFAS sehr mobil sein können, bilden diese sehr lange Schadstoffbahnen im Grundwasser aus. Dies verursacht mitunter auch Sekundärkontaminationen, zum Beispiel aus der Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen mit belastetem Wasser aus der Schadstoffbahn, aus Abwasserleitungen in Kanalgräben bzw. größere Oberflächengewässer oder umgelagerten PFAS-belasteten Erdaushub.

Wenn hingegen zum Beispiel PFAS-belastete „Bodenverbesserer“ in vergleichsweise großen Mengen großflächig ausgebracht wurden, so wird von einer flächenhaften PFAS-Kontamination gesprochen. Flächenhafte PFAS-Kontaminationen von Böden und Grundwasser können auch durch den Eintrag luftgetragener Schadstoffe (z.B. aus Schornsteinen, Abluftanlagen) verursacht werden. Durch Auswaschungseffekte und partikelgebundenen Transport erfolgte eine Deposition der PFAS in die Böden und Gewässer der Umgebung, hauptsächlich in Richtung der dominierenden Windströmung. Ausgehend von belasteten Böden können die PFAS ins Grundwasser verfrachtet werden. Aufgrund der Auskämmeffekte der Bäume, die auch für andere über die Luft verbreitete Schadstoffe nachgewiesen sind, werden in der Streuauflage von Waldflächen deutlich höhere PFAS-Konzentrationen festgestellt als auf landwirtschaftlichen Flächen und Siedlungsgebieten (LfU Bayern, 2018). Die Ausdehnung der Belastung um die Emittentenstandorte herum kann erheblich sein und bis zu mehreren Zehner Kilometern reichen (Liu et al., 2016, Oliaei et al., 2013).

Von den flächenhaften PFAS-Kontaminationen abgegrenzt sind diffuse, sehr geringe, aber offensichtlich flächendeckend nachweisbare ausschließlich anthropogen verursachte PFAS-Gehalte in als unbelastet eingestuften Böden. Dies wurde beispielsweise mit dem Bodendauerbeobachtungsprogramm des Landes Baden-Württemberg² (LUBW, 2016, 2017) gezeigt. Die Untersuchungen der LUBW zu PFAS-Gehalten in sogenannten „Hintergrund-Böden“ belegen mit moderner instrumenteller Analytik aus wässrigen Bodeneluat durchgängig bestimmbare, wenngleich sehr geringe Gehalte (DIN 19529; HPLC-ESI-MS/MS). Bei Waldböden und –auflagen wurden teilweise etwas höhere Gehalte nachgewiesen als auf Acker- und Grünlandböden. Feststoffgehalte (DIN 38414-14) von PFAS in Hintergrundböden sind mit der genannten Analytik in der Regel nicht bestimmbar. In Einzelfällen werden PFOA und PFOS im Bereich der analytischen Bestimmungsgrenze (1 µg/kg) detektiert. Untersuchungen in Bayern zeigen entsprechende Ergebnisse³. Als Ursache für die sich in den Eluat von Böden abzeichnende Hintergrundbelastung wird derzeit eine ubiquitäre Deposition über den Luftpfad als wahrscheinlich angenommen.

Eine Zwischenstellung zwischen lokalen und flächenhaften PFAS-Kontaminationen können Flughäfen einnehmen. Neben den bekannten Punktquellen, wie beispielsweise Feuerlöschübungsplätze, Feuerwachen, lokaler Einsatz von PFAS-haltigen Feuerlöschschäumen, wird häufig eine diffuse Belastung großer Flächen des Standortes festgestellt, die möglicherweise auf die Windverdriftung von Feuerlöschschäumen oder auf andere Prozesse (Überschwemmungen aus Ablaufgräben u. ä.) zurückzuführen sind. Hier muss einzelfallbezogen entschieden werden, ob die Flächen getrennt als Punktquellen oder integriert als flächenhafte Kontamination bearbeitet werden sollen.

² Die PFAS-Summe im Eluat lag im Mittel bei 0,2 µg/L in Ackerböden, bei 0,3 µg/L in Grünlandböden und bei 0,6 µg/L in Waldböden. In allen wässrigen Schüttel eluat wurden die Carbonsäuren PFBA, PFPA, PFHxA, PFHpA und PFOA sowie mit Ausnahme von einer Probe PFNA nachgewiesen.

³ https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/per_polyfluorierte_chemikalien/pfc_belastung_boeden/index.htm

Unterscheidung zwischen lokalen und flächenhaften PFAS-Kontaminationen

Lokale Kontaminationen können vor allem bei punktuellen Einträgen auftreten, z.B. bei Galvaniken, Brandschäden und beim Einsatz PFAS-haltiger Löschschäume. Flächenhafte PFAS-Kontaminationen werden beispielsweise durch die Ausbringung von PFAS-belasteten Düngemitteln auf Ackerflächen oder durch die Deposition PFAS-belasteter Aerosole im Umkreis von Produktionsstätten verursacht. Mitunter kann es sinnvoll sein, eine Agglomeration von Punktquellen auf einem Betriebsgelände als flächenhafte PFAS-Kontamination zu bearbeiten. Eine Unterscheidung von lokalen und flächenhaften PFAS-Kontaminationen per Definition ist nicht sinnvoll.

2.3 Konzeptionelles Standortmodell

Ziel eines konzeptionellen Standortmodells ist es, die komplexen Zusammenhänge bei PFAS-Kontaminationen zu verdeutlichen und klar darzustellen. Ein Verzicht auf das konzeptionelle Standortmodell erhöht das Risiko von Fehlinterpretationen, die bei Sanierungen mit erheblichen Kostenrisiken verbunden sein können.

In der Regel liegen erst mit Abschluss der Detailuntersuchung nach BBodSchG und BBodSchV ausreichende Daten zu einem Standort vor, die das Erstellen eines konzeptionellen Standortmodells (im englischen Conceptual Site Model; CSM) erlauben. Das konzeptionelle Standortmodell fügt alle Daten (Schadstoffeintragscharakteristik, Schadstoffverteilung, Geologie, Hydrogeologie, Schadstoffverteilung, Transportwege und -prozesse sowie Schadstoffminderungsprozesse) eines Standortes zu einem Gesamtbild zusammen und erlaubt somit ein umfassendes Verständnis eines Standortes.

Für Teilbereiche, in denen ein messtechnischer Nachweis fehlt, wird auf das interdisziplinäre Expertenwissen (Hypothesen) zurückgegriffen. Diese Hypothesen sind, falls erforderlich, durch die Erhebung weiterer Standortdaten zu überprüfen (Held, 2014). Während der weiteren Bearbeitung des Standorts werden, bis zum Abschluss der Überwachung des Sanierungserfolges, zusätzliche Daten zum Standort anfallen. Somit werden über sehr lange Zeiträume zu unterschiedlichen Zeiten die verschiedensten Daten erhoben, die stets in das konzeptionelle Standortmodell zu integrieren sind.

Das konzeptionelle Standortmodell erlaubt es, die für den Standort relevanten Daten in einer klaren und transparenten Struktur darzustellen. Dies wird mit einem „Format“ erreicht, das einfach zu verarbeiten, zu verstehen und anzuwenden ist. Das konzeptionelle Standortmodell kann optional eine textliche Beschreibung des Standorts, eine grafische Darstellung aller relevanten Standortparameter und eine geclusterte Darstellung möglicher Expositionspfade über die verschiedenen Umweltkompartimente beinhalten.

Üblicherweise beginnt die Konstruktion eines konzeptionellen Standortmodells mit den ersten Erkundungen eines Standortes und wird kontinuierlich fortgeschrieben. Ein konzeptionelles Standortmodell soll folgende Aussagen erlauben:

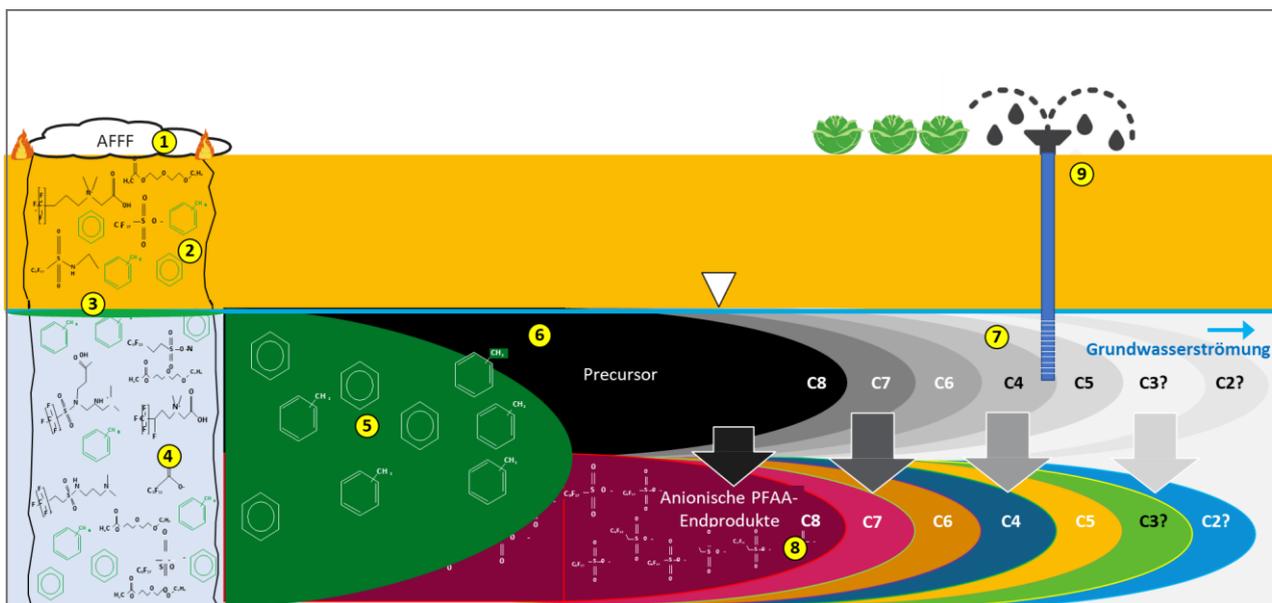
- ▶ Identifizierung und Lokalisierung des Schadstoffpotentials.
- ▶ Identifizierung und Lokalisierung der Schadstoffquelle(n).
- ▶ Abgrenzung der Migrationspfade in den einzelnen Umweltmedien (Grundwasser, Oberflächengewässer, Böden, Sedimente, Biota und Luft).

- ▶ Kennzeichnung der anthropogenen Hintergrundkonzentrationen in jedem Umweltmedium⁴
- ▶ Identifizierung und Charakterisierung der potenziellen Rezeptoren (Mensch und Ökologie).
- ▶ Festlegung und Kennzeichnung der Systemgrenzen.

Wegen des komplexen und von herkömmlichen Schadstoffen abweichenden Verhaltens der PFAS wird im Folgenden ein konzeptionelles Standortmodell für einen Worst-Case-Fall in Form einer schematisierte und idealisierten Grafik vorgestellt (Abbildung 1), dies ist im folgenden Text beschrieben. Damit soll deutlich werden, welche Prozesse maximal im Untergrund möglich sind. Dieses Vorgehen dient dazu, die nachfolgende Planung der Standorterkundung zu erleichtern.

- ▶ Werden beispielsweise AFFF-Schäume zum Löschen von Flüssigkeitsbränden eingesetzt ①, so gelangen die AFFF-Bestandteile einschließlich nicht-fluorierter organischer Verbindungen (Anhang A, Kapitel 11.2) zusammen mit den zu löschenden flüssigen Chemikalien (z.B. Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) aus unverbranntem Brennstoff) in den Untergrund ②.
- ▶ Es ist anzunehmen, dass PFAS und MKW nahezu den gleichen Fließwegen folgen, obwohl das Ausmaß der Kontamination signifikant unterschiedlich sein kann. Diese Co-Kontaminanten, insbesondere leichte nicht-wässrige Flüssigphasen (LNAPL), können zusätzlich den Transport von PFAS beeinflussen (Guelfo und Higgins, 2013; Lipson et al. 2013; McKenzie et al. 2015). Inwieweit die Mobilität der Co-Kontaminanten durch die PFAS rheologisch beeinflusst sein kann, ist zu untersuchen. Es ist möglich, dass die PFAS die Mobilität der Co-Kontaminanten (als Stoffgemisch) erhöhen können.

Abbildung 1 Konzeptionelles Standortmodell



Im vorliegenden konzeptionellen Standortmodell sind nicht alle möglichen relevanten Rezeptoren eingetragen, dies ist jedoch für ein zuverlässiges Standortmodell unerlässlich. Quelle: Hurst, 2017

⁴ Begründung: die anthropogen verursachten Hintergrundkonzentrationen von PFAS im Boden werden in einigen Bundesländern gegenwärtig erforscht. Bis hierzu Ergebnisse vorliegen, ist bei der Untersuchung von PFAS-Verunreinigungen ggf. die anthropogene Hintergrundbelastung zu bestimmen.

Vor allem aber werden die PFAS einschließlich der Precursor in der ungesättigten Bodenzone, insbesondere im organikreichen Oberboden sorbiert und bilden die Schadstoffquelle. Der Schadstoffaustrag aus der Quelle (Elutionsverhalten) ist im Wesentlichen abhängig von:

- der Sorptionsstärke im Quellbereich,
- der Konzentration der Begleitschadstoffe (PFAS und Begleitstoffe können als Stoffgemisch reagieren; aus dem Stoffgemisch können PFAS dann wieder diffusiv freigesetzt werden),
- den mikrobiellen Transformationsprozessen, die zu einer Freisetzung von Perfluoralkansäuren im Rahmen des Abbaus von Precursor führen und
- der Freisetzung der PFAS durch Abbau des TOC, d.h. durch Verminderung der PFAS-Sorption.

Da zunächst die ungesättigte Zone unterhalb der Quelle (Oberboden) unbelastet ist, werden die mittels Sickerwasser verfrachteten PFAS dort durch Sorption (mit unterschiedlicher Stärke) zurückgehalten und gelangen erst verzögert in das Grundwasser. Der verzögerte PFAS-Eintrag aus der ungesättigten Bodenzone in das Grundwasser wird zusätzlich zu den oben genannten Prozessen vor allem durch folgende Parameter bestimmt:

- Sickerwasserrate bzw. Grundwasserneubildungsrate in Abhängigkeit von der hydraulischen Durchlässigkeit des Bodens. Diese Raten können den Veröffentlichungen der einzelnen Bundesländer entnommen werden, beispielsweise Armbruster (2002),
 - Abstand der Quelle zur Grundwasseroberfläche.
- ▶ Werden sehr große Mengen von Begleitschadstoffen als Flüssigphase freigesetzt, kann es zur Ausbildung einer Leichtphase (LNAPL) im Bereich des Grundwasserspiegels kommen ③.
 - ▶ Aus der ungesättigten Bodenzone werden die PFAS in das Grundwasser eingetragen ④. Inwieweit sie im Quellbereich zu erhöhten Gehalten bodengebundener Schadstoffe im Grundwasserleiter führen, ist noch nicht ausreichend untersucht, aber entsprechend den Sorptionseigenschaften wahrscheinlich. Kationische PFAS werden wegen der dominierenden negativen Ladung der Bodenoberfläche stärker zurückgehalten als anionische. Auch zwitterionische PFAS dürften ein abweichendes Sorptionsverhalten zeigen ⑧. Systematische Untersuchungen zur Sorption der Precursor gibt es noch nicht, dies dürfte auch schwierig sein, weil es sich bei den Precursor um eine große, sehr heterogene Gruppe handelt. Gezielte einzelfallspezifische Untersuchungen zur Verteilung der Precursor können hier Anhaltspunkte zum Sorptionsverhalten geben (Tiefenverteilung im Boden, Vorkommen im Grundwasser oder nur im Boden, etc.).

Parallel zu den PFAS werden Begleitschadstoffe in das Grundwasser eingetragen. Deren natürlicher mikrobieller Abbau führt in der Regel zu einer Anaerobisierung des Grundwasserleiters und damit zu einer weitgehenden Unterbindung der mikrobiellen Precursortransformation (Harding-Marjanovic et al. 2015; McKenzie et al. 2015; McGuire et al. 2014).

- ▶ Die Schadstofffahne der Begleitschadstoffe ist in der Regel deutlich kürzer als die der PFAS ⑤. Erst wenn sich das Redoxmilieu soweit wieder verändert hat, dass aerobe Bedingungen vorliegen, ist die Transformation der Precursor möglich ⑥.
- ▶ Auch die Precursor werden im begrenzten Umfang in dem Grundwasserleiter transportiert. Die heterogene Gruppe der Precursor weist Moleküle mit unterschiedlicher Größe (Molekulargewicht) auf. Es ist anzunehmen, dass die Hydrophobizität mit dem Molekulargewicht zunimmt. Entsprechend kommt es im Grundwasserleiter zu einer chromatographischen Auftrennung der Precursor nach Molekulargewicht bzw. (vereinfacht) nach Länge der perfluorierten Kette ⑦.
- ▶ Ist eine aerobe mikrobielle Transformation möglich, so werden vermutlich distal (quellennah) bevorzugt länger-kettige und longitudinal (quellenfern) bevorzugt kürzer-kettige Perfluoralkansäuren freigesetzt.

- ▶ Die Perfluoralkansäuren selbst unterliegen einer stark unterschiedlichen Sorption an die Bodenmatrix. Sulfonsäuren werden stärker retardiert als Carbonsäuren der gleichen C-Kettenlänge. Zudem nimmt die Stärke der Sorption mit der Kettenlänge zu. Entsprechend ist eine chromatographische Auftrennung der PFAS entlang der Migrationsrichtung im Grundwasser zu erwarten.

Erschwert wird das Erkennen einer solchen chromatographischen Auftrennung durch die Tatsache, dass einerseits im Grundwasserleiter selbst Perfluoralkansäuren zeitverzögert und örtlich variabel aus den Precursor gebildet werden können und zum anderen, dass auch die Nachlieferung aus der ungesättigten Bodenzone zeit- und ortsvariabel sein kann.

So kann beispielsweise eine späte Freisetzung von kurzkettigen PFAS (z.B. PFBA) aus den Precursor im ungesättigten Oberboden dazu führen, dass diese im Grundwasser innerhalb des Quellbereiches noch lange Zeit nach Schadenseintritt (also zu einem Zeitpunkt, zu dem sie im Boden ausgelaugt sein sollten) nachweisbar sind.

- ▶ Wird aus der meist ausgedehnten PFAS-Fahne Grundwasser zu Beregnungszwecken entnommen, kann sich im Oberboden eine flächig ausgedehnte Sekundärquelle ausbilden. Eine Aufnahme in Pflanzen ist in Abhängigkeit der Prozessparameter (u.a. Schadstoffkonzentration, Beregnungsrate, Dauer) möglich ⑨.

Konzeptionelles Standortmodell (Conceptual Site Model, CSM)

Ziel des konzeptionellen Standortmodells ist die klare Darstellung und Verdeutlichung komplexer Zusammenhänge bei PFAS-Kontaminationen. Ein Verzicht auf das konzeptionelle Standortmodell erhöht das Risiko von Fehlinterpretationen, die bei Sanierungen mit erheblichen Kostenrisiken verbunden sein können. Deshalb ist das konzeptionelle Standortmodell, obwohl dieses bei der herkömmlichen Altlastenbearbeitung nicht immer angewendet wird, als Leistungsinhalt systematisch in die gutachterliche Bearbeitung der PFAS-Kontaminationen zu integrieren.

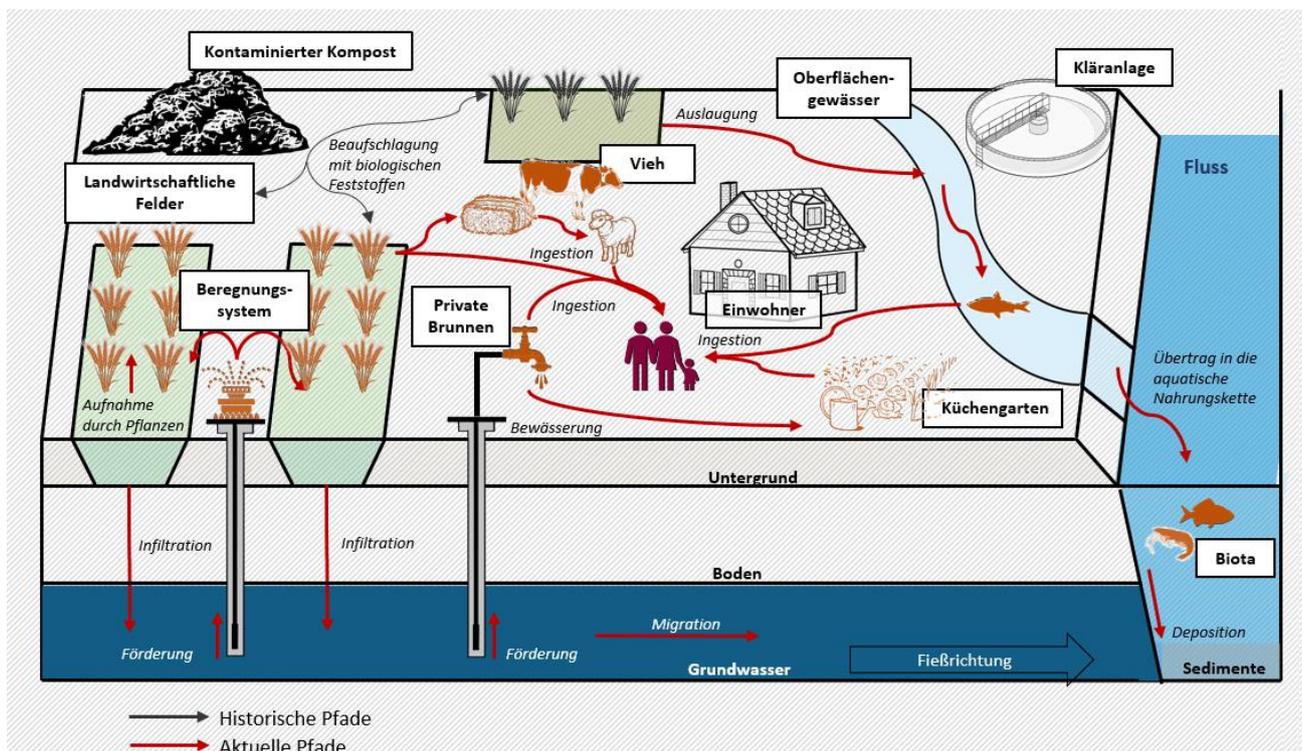
Das konzeptionelle Standortmodell beschreibt die am Standort ablaufenden Schadstofftransport- und -minderungsprozesse sowie die vorhandenen Redoxbedingungen. Es muss dem besonderen Verhalten der PFAS (beispielsweise auch die Transformation der Precursor erst an der aeroben Fahnen Spitze) gerecht werden und es muss alle Wirkungspfade und Rezeptoren enthalten. Bei PFAS-Kontaminationen sind oft mehr Rezeptoren als bei herkömmlich Altlasten betroffen. Das konzeptionelle Standortmodell dient als Grundlage für die Sanierungsplanung und wird im Laufe des Projektes stetig fortgeschrieben.

2.4 Wirkungspfade und Rezeptoren

Basierend auf den im Kapitel 2.3 geschilderten Schadstoffverteilungen können die einzelnen Wirkungspfade und Rezeptoren identifiziert und in das konzeptionelle Standortmodell integriert werden. Abbildung 2 gibt einen schematischen und beispielhaften Überblick über die möglichen Expositionspfade am Beispiel einer Bodenverunreinigung durch verunreinigte Düngemittel.

Weitere Schadstoffquellen können versickerte PFAS-haltige Flüssigkeiten (Galvaniken, etc.), Sickerwässer aus Ablagerungen, Löschschaumschäden, staub- oder fluidgebundene Schäden aus Emissionen, Ausbringungen von Schlämmen aus Abwasseraufbereitungsanlagen etc. sein.

Abbildung 2 Mögliche Expositionspfade am Beispiel einer flächenhaften Düngemittelaufbringung



Quelle: Wattelle-Laslandes, 2018

Werden PFAS aus Punktquellen freigesetzt, so sind häufig folgende Wirkungspfade (zunächst unabhängig von den jeweiligen Beurteilungswerten, siehe Anhang B) von Bedeutung und im Einzelfall zu betrachten:

- (1) **Boden → Grundwasser.** Die Bodenbelastung kann lokal oder flächenhaft sein. Auch erhöhte Bodenbelastungen im Umfeld von Produktionsanlagen durch atmosphärische Deposition sind möglich. Die Bodenbelastung kann auch eine Sekundärquelle, zum Beispiel nach Bewässerung mit verunreinigtem Wasser sein. Vom Boden aus gelangen die PFAS über die Auswaschung mit Niederschlägen in das Grundwasser. Das Grundwasser kann vielfältig genutzt sein. Von der öffentlichen oder privaten Trinkwassernutzung, gewerblichen Nutzungen z.B. für Produktions- oder Kühlzwecke, der Nutzung als Tränkwasser für Vieh bis zur Nutzung als Beregnungswasser für Landwirtschaft oder Gärten gibt es viele Möglichkeiten der Betroffenheit. Diese müssen entlang der sich ausbreitenden Schadstofffahne im Einzelfall geprüft werden, was meist auch eine Begehung der Gebiete erfordert.
- (2) **Boden → Mensch (Direktpfad).** Aufgrund der hohen Sorptionskapazität insbesondere der länger-kettigen PFAS kann der Direktpfad prinzipiell von Relevanz sein.
- (3) **Boden → Grundwasser → Oberflächengewässer → Fisch → Mensch.** Infolge der sich ausbildenden langen Schadstofffahnen kann das Grundwasser in Oberflächengewässer gelangen und ökotoxikologische sowie toxikologische Effekte über Fischverzehr verursachen. Die stärksten Belastungen von Lebensmitteln mit PFAS wurden in Fisch, Fischprodukten und Meeresfrüchten nachgewiesen (Gellrich, 2014).
- (4) **Boden → Grundwasser → Beregnungswasser → Boden.** Insbesondere bei langen PFAS-Fahnen kann es dazu kommen, dass das PFAS-belastete Grundwasser zu Beregnungszwecken für landwirtschaftlich genutzte Flächen verwendet wird. Dadurch können sich die PFAS im Oberboden anreichern und eine Sekundärquelle für die weiteren Wirkungspfade bilden.

- (5) **Boden** → **Nutzpflanze** → **Mensch**. Dieser Wirkungspfad spielt vor allem bei der Kontamination von landwirtschaftlich genutzten Flächen (PFAS im durchwurzelteten Boden) eine Rolle. Die Flächen selbst können primäre Schadensherde sein oder aber durch regional erhöhte atmosphärische Deposition oder nach Beregnung des Bodens mit PFAS-belastetem Grundwasser sekundär belastet worden sein. Pflanzen nehmen PFAS in einzelnen Pflanzenteilen zum Teil sehr unterschiedlich auf. Zudem unterliegt die Aufnahme jahreszeitlichen und witterungsbedingten Schwankungen. Darüber hinaus wechseln im Jahresverlauf die Pflanzenbestände in ihrer wuchsbedingten Artenzusammensetzung, so dass mögliche Stoffaufnahmen und -einlagerungen auf einer definierten Fläche ebenfalls stark variieren können.
- (6) **Boden** → **Nutzpflanze** → **Tier** → **Mensch**. Ausgehend von PFAS-belastetem Boden können die Schadstoffe über Futterpflanzen und Tränkwasser in Nutztiere und damit den Menschen gelangen. Darüber hinaus ist eine Direktaufnahme des PFAS-belasteten Bodens durch grasende Weidetiere möglich (Futteranhaftungen). Ferner kann es zu einer Anreicherung von PFAS in Honig und Wachs von Bienen kommen, wenn Bienenvölker im näheren Umkreis verunreinigter Flächen gehalten werden.

Ob der Wirkungspfad

(7) **Boden** → **Bodenluft** → **Innenraumluf** → **Mensch**

von Relevanz ist, lässt sich anhand der vorliegenden Daten noch nicht beurteilen. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, dass Precursor in den ungesättigten Bodenbereich unterhalb von Bebauung gelangen (u.U. auch durch Ausgasung aus Grundwasser) und dort unter aeroben Bedingungen transformiert/hydrolysiert werden. Dabei wäre es denkbar, dass leichtflüchtige Fluortelomeralkohole (FTOH) gebildet werden, die prinzipiell das Potential haben, auszugasen und sich in Innenräumen anzureichern. Wegen der nur langsamen Transformationsraten und der Tatsache, dass die FTOH selbst wieder mikrobiell zu nichtflüchtigen Perfluoralkansäuren transformiert werden können, wird dieser Wirkungspfad als wenig wahrscheinlich eingeschätzt. Erste Arbeiten zu diesem Thema scheinen diese Annahme zu bestätigen⁵.

Der Wirkungspfad

(8) **Boden – Oberflächengewässer**

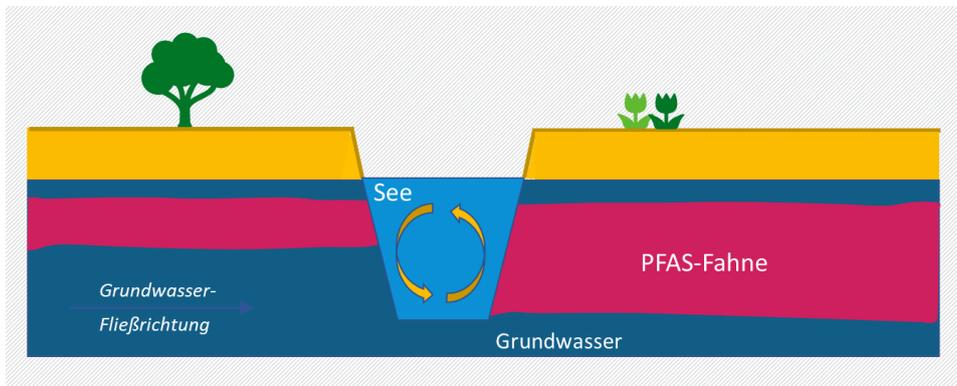
kann betroffen sein, wenn es zu Abschwemmungen PFAS-haltiger Böden oder Einträgen PFAS-haltiger Flüssigkeiten (Gewerbeabwässer, Löschschaumabwässer) in Gräben oder Bäche gekommen ist. Diese können zu einer Sekundärbelastung der Ufersedimente führen. Ausgehend von belasteten Bachläufen ist eine Eingrenzung belasteter Einzugsgebiete möglich.

Mitunter befinden sich auch in das Grundwasser einbindende Oberflächengewässer innerhalb der PFAS-Fahnen. Liegt die PFAS-Belastung im Grundwasser oberflächennah vor, kann ein tiefer Grundwassereinschnitt, z. B. bei Kiesgrubenabgrabungen eine vertikale und horizontale Aufweitung der Fahne bewirken. Verantwortlich dafür sind die Strömungen innerhalb des Binnensees.

⁵ An einem Standort wurde vor etwa 10 Jahren eine aus der Papierproduktion herrührende PFAS-Belastung des landwirtschaftlich genutzten Oberbodens verursacht. Eine Beprobung der Bodenluft ergab den Nachweis von 4:2, 6:2 and 8:2 FTOH im unteren ng/m³-Bereich. Diese Werte liegen im Bereich der beispielsweise bei städtischen Kläranlagen gefundenen Konzentrationen in der Luft und damit bei nur geringen Belastungen (Kopf, 2017). Wie sich junge PFAS-Schäden verhalten, sollte noch überprüft werden. Unabhängig von Schadensfällen ist aber von einer Belastung von Innenräumen durch Ausgasungen z.B. aus Textilien (Teppiche, Ledersofas usw.) sowie Verwendung von Imprägniersprays und sonstigen Haushaltsgegenständen auszugehen. Dies müssen bei Messungen berücksichtigt werden. Bei der Analytik sollte der TOP-Assay mit enthalten sein.

Neben üblichen Konvektionsströmungen kann es im Winter zu einem Absinken des abgekühlten Wassers in tiefere Bereiche, die während des Sommers aufgewärmt wurden, kommen (Abbildung 3).

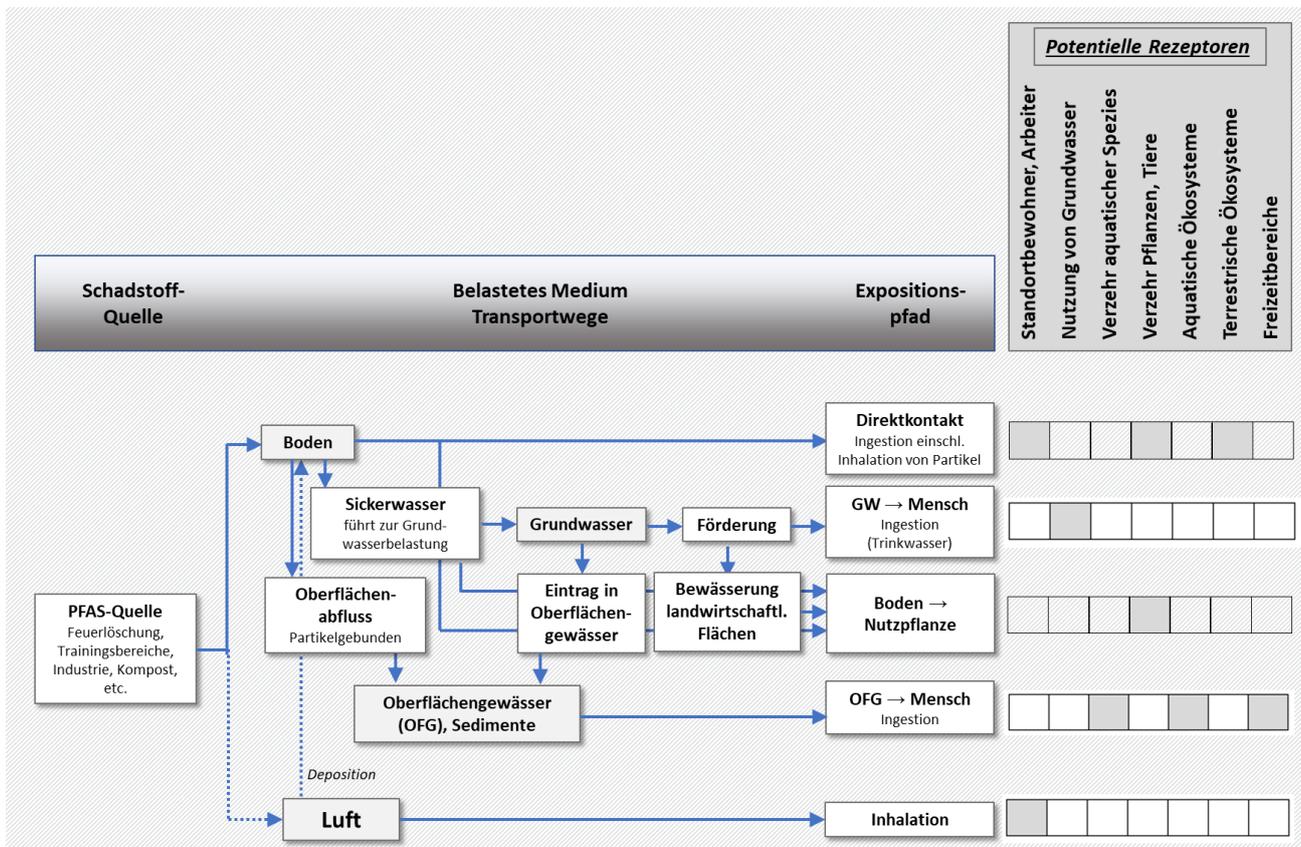
Abbildung 3 PFAS-Verteilung im Abstrom von Seen oder künstlichen Grundwassereinschnitten



Quelle: Arcadis Germany GmbH, 2019

In Abbildung 4 ist ein vereinfachtes Schema gezeigt, mit dessen Hilfe für eine erste Einschätzung rasch auf den Grundlagen der jeweils ermittelten Standortdaten alle relevanten Wirkungspfade und betroffenen Rezeptoren ermittelt werden können.

Abbildung 4 Vereinfachtes Schema zur Identifizierung der Wirkungspfade und Rezeptoren



Quelle: nach NGWA, 2017, ergänzt und verändert

Wirkungspfade und Rezeptoren

Während bei den konventionellen Schadstoffen der Wirkungspfad Boden → Grundwasser dominiert, spielen bei den PFAS zusätzliche Wirkungspfade eine substanzielle Rolle. Hier ist neben einer Verfrachtung in Oberflächengewässer insbesondere der Eingang über Nutzpflanzen und tierische Lebensmittel in die menschliche Nahrung zu prüfen.

Um eine vollständige Bewertung gewährleisten zu können, sind die möglichen Wirkungspfade zu Beginn der Bearbeitung systematisch zu erfassen.

2.5 Mögliche betroffene Behörden und Rechtsgebiete

Wegen der besonderen Eigenschaften der PFAS, sich über sehr große Areale und ohne natürlichen Schadstoffabbau auf verschiedenen Wirkungspfaden ausbreiten und mehrere Rezeptoren betreffen zu können, sind in vielen Fällen im Vergleich zu der bisherigen Schadensbearbeitung viele andere Rechtsbereiche und Behörden bei der Bearbeitung zu berücksichtigen. Dabei ist auch die Gefahrenlage der kontinuierlichen Ausbreitung zu beachten. Letzteres betrifft potenziell zukünftig betroffene Rezeptoren. Es empfiehlt sich, zu Beginn der Bearbeitung ein Scoping mit den möglicherweise betroffenen Behörden durchzuführen, um Zuständigkeiten, Aufgaben und Abläufe in der weiteren Bearbeitung zu klären. Für die Bearbeitung von PFAS-Kontaminationen im Rahmen des Bundes-Bodenschutzrechts gilt die hier vorgegebene Systematik.

In den Tabellen und Erläuterungen soll eine Hilfestellung zur Identifikation der betroffenen Behörden und Rechtsgebiete gegeben werden. Die Behördenstrukturen und Bezeichnungen können in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich sein. Es wurden in den Tabellen möglichst verallgemeinernde Begriffe verwendet. Die Ausführungen dienen ausschließlich zur ersten Orientierung und beinhalten keine Gewähr der Vollständigkeit oder Richtigkeit. Die rechtlichen Zuordnungen müssen immer für den Einzelfall geprüft werden.

Die Tabellen 1 bis 5 sind so aufgebaut, dass zunächst die möglichen primären Austragsquellen (Tabelle 1) und dann die möglichen betroffenen Medien (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) aufgelistet sind. Diese sind durchnummeriert. Die Nummern dienen zum schnelleren Auffinden der betroffenen Behörden und Rechtsgebiete, die in den anschließenden Tabellen aufgeführt sind.

Tabelle 1 Auswahl von möglichen PFAS Austragsquellen und betroffenen belasteten Medien

Nr.	Mögliche primäre Austragsquellen und betroffene belastete Medien
	Mögliche primäre Austragsquellen
1.1	Löschschaume auf oder in Böden
1.2	Versickerte PFAS-haltige Flüssigkeiten auf oder in Böden, Handhabungsverluste in Industrieanlagen (z.B. Galvaniken)
1.3	Luftemissionen über Aerosole aus PFAS-verarbeitenden Industrieanlagen auf oder in Böden
1.4	Abwasseremissionen in Gewässer
1.5	Emissionen über Schlämme aus Abwasseraufbereitungsanlagen auf oder in Böden
1.6	Düngemittel

Nr.	Mögliche primäre Austragsquellen und betroffene belastete Medien
	Mögliche betroffene PFAS belastete Medien
2	Böden
2.1	Ackerboden
2.2	Grünland (Weidefläche)
2.3	Hausgärten
2.4	Erosionsböden
2.5	Bodenaushub Baumaßnahmen
2.6	Böden in Baugebieten
2.7	Böden Flurbereinigungsgebiete
2.8	Waldböden
2.9	Böden auf Gewerbe- und Industriegrundstücken
3	Grundwasser
3.1	Trinkwasser
3.2	Gartenbewässerung
3.3	Viehtränken
3.4	Bewässerung Landwirtschaft
3.5	Energetische Nutzung
3.6	Grundwasserhaltung bzw. -nutzung bei Baumaßnahmen (u.a. Baugebiete und Verkehrswegebau)
3.7	Gewerbliche Nutzung als Produktions- oder Kühlwasser
4	Oberflächengewässer
4.1	(Bade-)Seen
4.2	Fischzucht
4.3	Bäche, Flüsse
4.4	Uferbereiche, -sedimente
4.5	Überschwemmungsgebiete
4.6	Trinkwasser (siehe 3.1)
5	Abfälle
5.1	Beseitigung auf Deponien
5.2	Verwertung Produktionsabfälle
5.3	Verwertung Bodenaushub Klärschlamm
5.4	Verwertung Grüngut
5.5	Verwertung Bauschutt
6	Abraum aus Rohstoffabbau
6.1	Abraum Kiesabbau mit Sekundärbelastungen
6.2	Abraum Bergbau mit Sekundärbelastungen

Tabelle 2 Mögliche betroffene Behörden (Rechtsgebiete) bei unterschiedlichen Schadstoffquellen

Nummer aus Tabelle 1	Kurzbezeichnung	Behörden (Rechtsgebiete)	Anmerkungen
1.1	Löschschäume	Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	Schadensbearbeitung: BBodSchG, BBodSchV
1.2	Leckagen aus Anlagen	Immissionsschutzbehörde (BImSchG) Wasserrechtsbehörde (WHG) Gewerbeaufsicht ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	BImSch-genehmigte aktive Anlagen: vorrangig BImSchG Altstandorte: BBodSchG, BBodSchV wenn keine spezielleren Regeln in BImSchG: Vorsorge nach BBodSchG, BBodSchV, bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV
1.3	Luft	Immissionsschutzbehörde (BImSchG) ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	vorrangig BImSchG wenn keine spezielleren Regeln: Vorsorge nach BBodSchG, BBodSchV bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV
1.4	Abwasser	Wasserrechtsbehörde (WHG, AbwAG) ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	bei Gewässerverunreinigungen: Wasserrecht, WHG; Abwasser in Gewässer: AbwAG bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV
1.5	Schlämme	Abfallrechtsbehörde (KrWG, AbfKlärV) ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	Aufbringen von Schlämmen: vorrangig Vorschriften KrWG, AbfKlärV; wenn keine spezielleren Regeln: Vorsorge nach BBodSchG, BBodSchV; bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV
1.6	Düngemittel	Landwirtschaftsbehörde (DünG, DüV, BioAbfV, AbfKlärV) Immissionsschutzrechts-/Baurechtsbehörde (Anlagenüberwachung) ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	vorrangig bei Düngemitteln: DünG, DüV, BioAbfV, AbfKlärV Anlagenüberwachung des Herstellers. Hinweis: ggf. kann auch das Abfallrecht betroffen sein. wenn keine spezielleren Regeln: Vorsorge nach BBodSchG, BBodSchV, bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV

Bei der Umnutzung PFAS-kontaminierter Flächen (resultierend aus Punktquellen), aber auch bei der *Bauleitplanung*⁶ innerhalb ausgedehnter PFAS-kontaminierter Flächen, spielt das Baurecht eine wesentliche Rolle. Das Baurecht ist nach dem Subsidiaritätsprinzip das speziellere Recht und gilt zunächst vorrangig.

⁶ Die Bauleitplanung ist das wichtigste Planungswerkzeug der städtebaulichen Entwicklung einer Gemeinde. Sie wird zweistufig in einem formalen bauplanungsrechtlichen Verfahren vollzogen. Zunächst wird in der vorbereitenden Bauleitplanung ein Flächennutzungsplan für das gesamte Gemeindegebiet erarbeitet. In der verbindlichen Bauleitplanung werden sodann Bebauungspläne für räumliche Teilbereiche des Gemeindegebiets aufgestellt. Während der Flächennutzungsplan nur behördenverbindliche Darstellungen über die Grundzüge der Bodennutzung enthält, regeln die Festsetzungen der Bebauungspläne die bauliche und sonstige Nutzung von Grund und Boden detailliert und allgemeinverbindlich. Die Bebauungspläne bestimmen somit wesentliche bauplanungsrechtliche Voraussetzungen, unter denen die Bauaufsichtsbehörden für Bauvorhaben Baugenehmigungen erteilen.

Tabelle 3 Mögliche betroffene Behörden (Rechtsgebiete) bei belasteten Böden

Nummer aus Tabelle 1	Kurzbezeichnung	Behörden (Rechtsgebiete)	Anmerkungen
2.1	Ackerboden	<p>Lebensmittelüberwachungsbehörde (LMBG)</p> <p>ggf. Futtermittelbehörde (FutMG)</p> <p>Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)</p> <p>Landwirtschaftsfachbehörde</p>	<p>bei Herstellung Lebensmittel: Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz (LMBG), Schadstoff-Höchstmengenverordnung (SHmV)</p> <p>bei Herstellung Futtermittel: Futtermittelgesetz (FutMG)</p> <p>bei schädliche Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV. Bodenauf- und -abträge zur Vermeidung Erosion nach BBodSchG, BBodSchV (§12 u.a.)</p> <p>Fachtechnische Unterstützung zur Bewirtschaftung: Landwirtschaftsfachbehörde</p>
2.2	Grünland (Weidfläche)	<p>Lebensmittelüberwachungsbehörde (LMBG)</p> <p>ggf. Futtermittelbehörde (FutMG)</p> <p>Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)</p> <p>Landwirtschaftsfachbehörde</p>	<p>bei Herstellung Lebensmittel (Fleischwirtschaft): LMBG, SHMV (Anmerkung: ggf. Einschaltung Veterinäramt als Teil der Lebensmittelüberwachung)</p> <p>bei Herstellung Futtermittel: FutMG</p> <p>bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV. Bodenauf- und -abträge nach BBodSchG, BBodSchV (§12 u.a.)</p> <p>Fachtechnische Unterstützung zur Bewirtschaftung: Landwirtschaftsfachbehörde</p>
2.3	Hausgärten	<p>Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)</p>	<p>bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV</p>
2.4	Erosionsböden	<p>Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)</p> <p>ggf. Wasserrechtsbehörde (WHG)</p>	<p>Bodenerosion durch Wasser: BBodSchV §8 (auch Überschwemmungsgebiete)</p> <p>Bodenerosion Ufer, Gewässerrandstreifen nach WHG</p>
2.5	Umlagerung Bodenaushub bei Baumaßnahmen	<p>Baurechtsbehörde, Straßenverkehrsbehörde, Eisenbahnbundesamt</p> <p>ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)</p> <p>ggf. Abfallrechtsbehörde (KrWG)</p>	<p>vorrangig: Bauordnungs-/Bauplanungsrecht</p> <p>Für Belange des Bodenschutzes gelten i.d.R. die materiellen Vorgaben von BBodSchG und BBodSchV, bei Aufbringen in oder auf durchwurzelbare Schicht: BBodSchV §12, bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV</p>
2.6	Böden in Baugebieten	<p>Gemeinde (BauGB)</p> <p>ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)</p> <p>ggf. Wasserrechtsbehörde (WHG)</p>	<p>Aufstellen Flächennutzungs- / Bebauungspläne und Baugenehmigungen: nach BauGB</p> <p>Für Gewichtung der Belange des Bodenschutzes gelten materielle Vorgaben von BBodSchG und BBodSchV, bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV</p> <p>Regenwasserversickerung regelt Wasserrecht (WHG)</p>

Nummer aus Tabelle 1	Kurzbezeichnung	Behörden (Rechtsgebiete)	Anmerkungen
2.7	Böden in Flurbereinigungsgebieten	Flurbereinigungsbehörde (FlurbG) ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	vorrangig: FlurbG Für Belange des Bodenschutzes gelten materielle Vorgaben von BBodSchG und BBodSchV
2.8	Waldböden	Forstbehörde (BWaldG) ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	vorrangig BWaldG wenn keine spezielleren Regeln: Vorsorge nach BBodSchG, BBodSchV, bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV
2.9	Böden auf Gewerbe- und Industriegrundstücken	Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	Vorsorge nach BBodSchG, BBodSchV, bei schädlichen Bodenveränderungen: BBodSchG, BBodSchV

Da der Umgang mit Bodenbelastungen im, nach dem Vorsorgeprinzip formulierten Baurecht nicht geregelt ist, wird bei der Bauleitplanung häufig hilfsweise auf die BBodSchV (z. B. den hier geregelten Prüfwerten) zurückgegriffen. Altlastenverdachtsflächen, Altlasten, Verdachtsflächen schädlicher Bodenveränderungen oder schädliche Bodenveränderungen selbst werden nach Bodenschutzrecht behandelt.

Tabelle 4 Mögliche betroffene Behörden (Rechtsgebiete) bei belastetem Grundwasser und Oberflächengewässer

Nummer aus Tabelle 1	Kurzbezeichnung	Behörden (Rechtsgebiete)	Anmerkungen
Betroffenes Medium: Grundwasser			
3.1	Trinkwasser	Wasserbehörde (WHG) Gesundheitsamt (TrinkwV) ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV) Gesundheitsamt	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG). Wasserschutzgebiete regelt WHG, Verbote tlw. SchALVO (z. B. Auf-/Einbringen von Böden) Fremdüberwachung der Wasserversorger, Überprüfung Eigenwasserversorgung Bodenbedingte Gewässer-/Grundwassergefährdungen regelt BBodSchG/BBodSchV. Direkteinträge in Gewässer regelt Wasserrecht Ufer oder Gewässerrandstreifen (5 m im Innenbereich und 10 m im Außenbereich ab Linie Mittelwasserstand) regelt WHG. Nicht zuordnbare Gewässerverunreinigungen regelt WHG
3.2	Gartenbewässerung	Wasserbehörde (WHG) ggf. Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG) Indirekte Schadstoffbeaufschlagung von Böden durch belastetes Wasser: BBodSchG, BBodSchV
3.3	Viehtränken	Wasserbehörde (WHG) Lebensmittelüberwachungsbehörde, Veterinäramt (LMBG)	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG) bei Herstellung Lebensmittel (Fleischwirtschaft): LMBG, SHMV

Nummer aus Tabelle 1	Kurzbezeichnung	Behörden (Rechtsgebiete)	Anmerkungen
3.4	Bewässerung Landwirtschaft	Wasserbehörde (WHG) Lebensmittelüberwachungsbehörde (LMBG)	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG) bei Herstellung Lebensmittel: LMBG, SHMV
3.5	Energetische Nutzung	Wasserbehörde (WHG)	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG)
3.6	Grundwassernutzung bei Baumaßnahmen	Wasserbehörde (WHG)	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG)

Betroffenes Medium: Oberflächengewässer

4.1	(Bade-)Seen	Wasserbehörde (WHG) Gesundheitsbehörde	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG) berät Wasserbehörde
4.2	Fischzucht	Wasserbehörde (WHG) Lebensmittelüberwachungsbehörde (LMBG)	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG) bei Herstellung Lebensmittel: LMBG, SHMV
4.3	Bäche, Flüsse	Wasserbehörde (WHG)	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG)
4.4	Uferbereiche, -sedimente	Wasserbehörde (WHG)	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG)
4.5	Überschwemmungsgebiete	Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV) ggf. Wasserrechtsbehörde (WHG)	Bodenerosion durch Wasser: BBodSchV §8 (auch Überschwemmungsgebiete) Bodenerosion Ufer, Gewässerrandstreifen nach WHG

In der Bauleitplanung müssen alle Konflikte gelöst werden, die der ausgewiesenen Nutzung entgegenstehen würden. Möglichkeiten zur Lösung von Konflikten, die mit belastetem Aushubmaterial zusammenhängen, sind in Kapitel 4.7 enthalten.

Die *Landwirtschaftsbehörde* überwacht einerseits die Verwendung von Düngern und hat auch die Aufgabe der Beratung und fachlichen Unterstützung. Wenn es zu Belastungen im Erntegut kommt, kann sie durch die Beratung der Landwirte und Empfehlungen, z.B. zu Fruchtfolgen, einen erheblichen Beitrag zur Minderung der Belastungsfolgen leisten.

In der *Trinkwasserverordnung* (TrinkwV, 2018) ist u.a. eine gegebenenfalls erforderliche Aufbereitung des Trinkwassers sowie eine Eigenüberwachung durch ein geeignetes Überwachungsprogramm (Parameter, Überwachungshäufigkeit) festgeschrieben. Die Fremdüberwachung obliegt dem Gesundheitsamt. Mit der Aktualisierung vom 09.01.2018 wurde eine sogenannte risikobewertungsbasierte Anpassung der Probenahmeplanung eingeführt. Diese soll Wasserversorgern mehr Flexibilität bei der Untersuchung des Trinkwassers gewähren. Wasserversorger können nun in enger Abstimmung mit dem zuständigen Gesundheitsamt die vorgeschriebenen Untersuchungen des Trinkwassers an die individuellen Gegebenheiten vor Ort anpassen, um einen maximalen Erkenntnisgewinn zu erlangen. Hierfür muss der Wasserversorger eine Risikobewertung erstellen, die eine fundierte und nachvollziehbare Begründung für eine Anpassung von Untersuchungsumfang und -häufigkeit liefert. Damit besteht auch die Notwendigkeit, PFAS, sofern hierfür ein Verdacht vorliegt, in das Untersuchungsprogramm mit aufzunehmen. Im Standarduntersuchungsprogramm der TrinkwV sind PFAS nicht enthalten.

Tabelle 5 Mögliche betroffene Behörden (Rechtsgebiete) bei belastetem Abfall und Abraum

Nummer aus Tabelle 1	Kurzbezeichnung	Behörden (Rechtsgebiete)	Anmerkungen
Betroffenes Medium: Abfall			
5.1	Beseitigung auf Deponien	Abfallrechtsbehörde (KrWG)	Abfallrechtliche Beseitigung: KrWG
5.2	Verwertung Produktionsabfälle	Abfallrechtsbehörde (KrWG)	Abfallrechtliche Verwertung: KrWG
5.3	Verwertung Klärschlamm	Abfallrechtsbehörde (KrWG)	Abfallrechtliche Verwertung: KrWG
5.4	Verwertung Bodenaushub	Abfallrechtsbehörde (KrWG) Bodenschutzbehörde (BBodSchG, BBodSchV)	Abfallrechtliche Verwertung: KrWG bei Aufbringen in oder auf durchwurzelbare Schicht: BBodSchV §12 Umlagerung innerhalb Sanierung: BodSchV §12, Verbote zu WSG tlw. in SchALVO enthalten (z. B. Auf-/Einbringen von Böden)
5.5	Verwertung Grüngut	Abfallrechtsbehörde (KrWG)	Abfallrechtliche Verwertung: KrWG
5.6	Verwertung Bauschutt	Abfallrechtsbehörde (KrWG)	Abfallrechtliche Verwertung: KrWG
Betroffenes Medium: Abraum aus Rohstoffabbau			
6.1	Abraum Kiesabbau	i.d.R. Wasserbehörde (WHG)	Nutzung, Bewirtschaftung und Inanspruchnahme regelt Wasserrecht (WHG). Hier meist Eingriff in das Grundwasser
6.2	Abraum Bergbau	Bergbehörde (BBergG)	Unter Bergaufsicht

Das *Gesundheitsamt* ist die fachliche Leitstelle für den Öffentlichen Gesundheitsdienst mit vielen Aufgaben. Dem Gesundheitsamt werden beispielsweise regelmäßig die Ergebnisse der Untersuchungen der Wasserversorger auf PFAS vorgelegt.

Mögliche betroffene Behörden und Rechtsgebiete

Die systematische Bearbeitung von PFAS-Schäden unterliegt den Vorgaben des Bodenschutzrechts. Wegen des breiten Einsatzes und wegen der hohen Mobilität der PFAS können mehrere Rechtsgebiete und Behörden betroffen sein.

Zu Beginn der Bearbeitung sind die möglichen Wirkungspfade, Rezeptoren und damit betroffenen Rechtsbereiche systematisch zu erheben. Es empfiehlt sich, zu Beginn der Bearbeitung einen Scoping-Termin mit den Behörden durchzuführen, um Zuständigkeiten, Aufgaben und Abläufe in der weiteren Bearbeitung zu klären. Bei der Auswahl ist auch das zukünftige Ausbreitungsgebiet der PFAS-Belastung im Grundwasser und die zukünftigen Rezeptoren oder Beeinflussungen zu erheben. Die betroffenen Rechtsgebiete sind ebenfalls zu berücksichtigen.

2.6 Probenahme, Leitparameter, Precursor, Summenparameter und Qualitätssicherung

Probennahme und Leitparameter. Bei allen Probennahmen sind die für PFAS erforderlichen speziellen Bedingungen (Anhang A, Kapitel 4) zu beachten. Da mehrere Tausend PFAS-Verbindungen vorkommen können, stellt sich zunächst die Frage, in welchem Umfang die Schadstoffe zu analysieren sind. Es empfiehlt sich, als Leitparameter die von der LAWA-LABO-Kleingruppe „*Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für PFC*“ 2017 genannten Verbindungen zu analysieren. Bei Aktualisierungen ist die Liste der Verbindungen entsprechend fortzuschreiben. Vorgeschlagene Leitparameter sind:

▶ Perfluorbutansäure	PFBA
▶ Perfluorbutansulfonsäure	PFBS
▶ Perfluorpentansäure	PFPeA
▶ Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS
▶ Perfluorhexansäure	PFHxA
▶ Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS
▶ Perfluorheptansäure	PFHpA
▶ Perfluoroktansulfonsäure	PFOS
▶ Perfluoroktansäure	PFOA
▶ H4-Polyfluoroktansulfonsäure	H ₄ PFOS
▶ Perfluornonansäure	PFNA
▶ Perfluoroktansulfonamid	PFOSA
▶ Perfluordekansäure	PFDA

Für die Perfluorpentansulfonsäure (PFPeS) sind keine Geringfügigkeitsschwellenwerte abgeleitet. Unabhängig davon wird empfohlen, diesen Parameter mit analysieren zu lassen, um das Stoffspektrum der perfluorierten Substanzen vollständig erfassen zu können.

Fluorhaltige Schaumlöschmittel können zu Verunreinigungen mit PFAS führen, die nicht in dieser Liste enthalten sind. Nach einem Einsatz solcher Löschschäume sollte daher zusätzlich auf solche Stoffe analysiert werden. Hier kommen insbesondere Polyfluoralkylbetaine in Betracht, die z.B. als PFOS-Ersatzstoffe in Capstone™-Produkten enthalten sind.

Aufgrund der Tatsache, dass manche Böden anhand der Feststoffanalytik (Bestimmungsgrenze meist 1 – 10 µg/kg) scheinbar PFAS-frei sind, aber im wässrige Eluat (Bestimmungsgrenzen meist 1 – 10 ng/L) PFAS-Konzentrationen oberhalb der Beurteilungswerte aufweisen, sind bei den Untersuchungen Eluatanalysen notwendig.

Aktuell werden in den einzelnen Bundesländern noch verschiedene Elutionsverfahren angewendet, es ist jedoch absehbar, dass das 1:2-Verfahren (DIN 19529) und der Säulenschnelltest (DIN 19528) Konsens finden bzw. in der geplanten Mantelverordnung festgeschrieben werden.

Gezielte Untersuchungen von Precursor sind für eine vollständige Gefährdungsabschätzung erforderlich.

Precursor und Summenparameter. Perfluorierte, mobile und toxische PFAS können aus Vorläufersubstanzen (Precursor) gebildet werden (Kapitel 2.3). Es ist daher erforderlich, die Precursor bei der Untersuchung zu berücksichtigen, auch wenn es dafür keine Beurteilungswerte gibt. Da es sich bei den PFAS um eine Stoffgruppe handelt, die aus mehreren Tausend Substanzen besteht, werden auch in Zukunft eine vollumfängliche analytische Einzelwerterfassung und Prüfwerte nicht entwickelt werden können.

Zur Analyse stehen die Verfahren AOF, EOF und TOP-Assay⁷ (Anhang A, Kapitel 4) zur Verfügung. Bei diesen wird der Gesamtanteil der adsorbierbaren (AOF) oder extrahierbaren organischen Fluorverbindungen (EOF) angegeben. Wenn man die bekannten, perfluorierten Parameter abzieht, erhält man näherungsweise den Anteil der bisher unbekannt Precursor. Unbekannt bleibt nach der Analyse weiterhin, um welche Precursorverbindungen es sich handelt und mit welchem Potenzial oder Kinetik diese zu mobilen, perfluorierten Verbindungen abgebaut werden können. Trotzdem sind die Untersuchungen obligatorisch durchzuführen. Grund ist die Feststellung der Menge und räumlichen Verteilung der Schadstoffe, die in der BBodSchV §2 im Rahmen der Detailuntersuchung gefordert ist. Bei Anordnungen nach §4 BBodSchG kann die Erforderlichkeit von Precursor-Untersuchungen entsprechend begründet werden. Wenn keine Precursor im Boden oder Grundwasser festgestellt werden, kann die weitere Auswertung zu der Ausbreitung anhand der Analyse der Standard- bzw. projektspezifischen Leitparameter erfolgen.

Wenn Precursor festgestellt werden, sind diese bei der weiteren Gefährdungsabschätzung zu berücksichtigen.

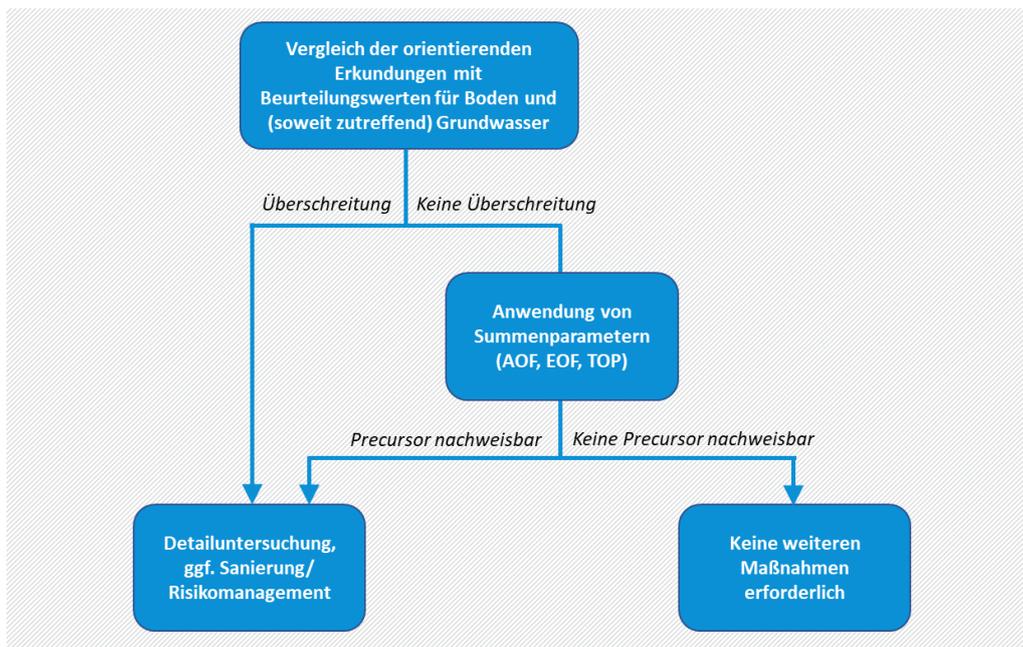
Die Bewertung der Precursor sollte sich am Freisetzungsverhalten der perfluorierten PFAS orientieren und zur Bestimmung der Quellstärke bzw. des Schadstoffpotenzials dienen. Das Freisetzungsvermögen kann indirekt über die Beobachtung der Freisetzung der perfluorierten PFAS durch Bodenuntersuchungen oder versuchstechnisch über Abbauprobieren erfolgen. Eine Standardisierung solcher Abbauprobieren gibt es noch nicht. Die Entwicklung der Versuche auf Basis derzeit laufender Forschungsvorhaben und der aktuelle Stand des Wissens sind dabei zu berücksichtigen.

Manche Precursor können in Abhängigkeit ihrer Molekülgröße und -struktur sehr ortsfest, andere aber auch mobil sein und im Grundwasser vorkommen. Aufgrund der Tatsache, dass Precursor erst dann zur Freisetzung der Perfluoralkansäuren führen, wenn das Grundwasser aerob wird, ergibt sich bei Löschschäden die Notwendigkeit, neben den PFAS-Einzelverbindungen und den Summenparametern auch die Begleitschadstoffe (z. B. konventionelle Tenside) zu analysieren. Neben den Tensid-spezifischen Analysen sollten auch der DOC (um gegebenenfalls unbekannte organische Inhaltsstoffe zu erfassen) sowie sämtliche Redoxindikatoren (gelöster Sauerstoff, Nitrat, gelöstes Mangan und Eisen, Sulfat und Methan) analysiert werden. Damit können die Redoxbedingungen im Aquifer identifiziert und beurteilt werden, wo ein Precursorabbau wahrscheinlich ist. Dieser kann in einer Fahne folglich auch zeitverzögert stattfinden.

Für den Fall, dass sich bereits bei der orientierenden Untersuchung von PFAS-Verdachtsflächen der Umstand ergibt, dass die gemessenen Konzentrationen unterhalb der jeweiligen Beurteilungswerte liegen, soll mit Hilfe des Prüfschemas in Abbildung 5 ausgeschlossen werden, dass in größerem Maße Precursor vorliegen, die nach einer mikrobiellen zeitverzögerten Transformation später noch zu einer Überschreitung der Beurteilungswerte führen können.

⁷ Die Methoden AOF und EOF geben die Konzentrationen in µg/L Fluorid an, während beim TOP-Assay die Precursor in perfluorierte Carbon- und Sulfonsäuren umgewandelt und diese quantifiziert werden. Für Vergleiche der Ergebnisse von AOF/EOF mit den Ergebnissen von TOP oder der konventionellen Analytik müssen die Konzentrationen der Einzelverbindungen immer in µg/L Fluorid umgerechnet werden.

Abbildung 5 Prüfschema (Orientierende Untersuchung)



Quelle: Arcadis Germany GmbH, 2019

Qualitätssicherung. Die PFAS neigen zur Sorption an Oberflächen von Laborgefäßen. Deshalb kann es einerseits zu Minderbefunden und andererseits, durch Desorption bei nachfolgenden Proben, zu so genannten Memory-Effekten kommen. Deshalb sollen regelmäßig Blindproben (nachweislich PFAS-freie Proben der gleichen Matrix) in das gesamte Untersuchungsprogramm integriert werden, um Hinweise auf mögliche Querkontaminationen zu erhalten (ca. 10 % bezogen auf die Gesamtzahl an Analysen). Außerdem sollen regelmäßig Doppelbestimmungen der Ausgangsmatrix durchgeführt werden, die bei der Probenvorbereitung beginnen (ca. 10 %, s.o.). In den Analysenberichten soll der Ablauf der Eluatherstellung (inkl. Trübung, etc.) angegeben werden.

Probennahme, Leitparameter Precursor und Qualitätssicherung

Bei der Probennahme sind besondere Bedingungen zu berücksichtigen, um Querkontaminationen oder Schadstoffverluste zu vermeiden. Da die PFAS mehr als 4.700 Verbindungen umfassen, muss sich die Einzelstoff-Analytik auf eine kleine Anzahl von Leitparametern beschränken. Die Liste der Leitparameter enthält im Wesentlichen perfluorierte Carbon- und Sulfonsäuren. Dies sind auch die Endprodukte der mikrobiellen Precursor-Transformation. Um das zeitlich und räumlich differierende Ausmaß der Neubildung der perfluorierten Carbon- und Sulfonsäuren abschätzen zu können, sind die Gesamtkonzentration der Precursor sowie die Redoxbedingungen zu bestimmen. Hierfür stehen entsprechende Analysenverfahren zur Verfügung. Die Notwendigkeit zur Precursor-Analyse gilt ungeachtet der Tatsache, dass die Summenanalysen teilweise noch nicht genormt sind und für die Summenwerte keine Beurteilungswerte vorliegen.

Wegen Sorptions- und Memory-Effekten in der Laborausrüstung sind regelmäßig Blind- und Doppelanalysen durchzuführen.

3 Sanierungsmanagement und -planung für Punktquellen

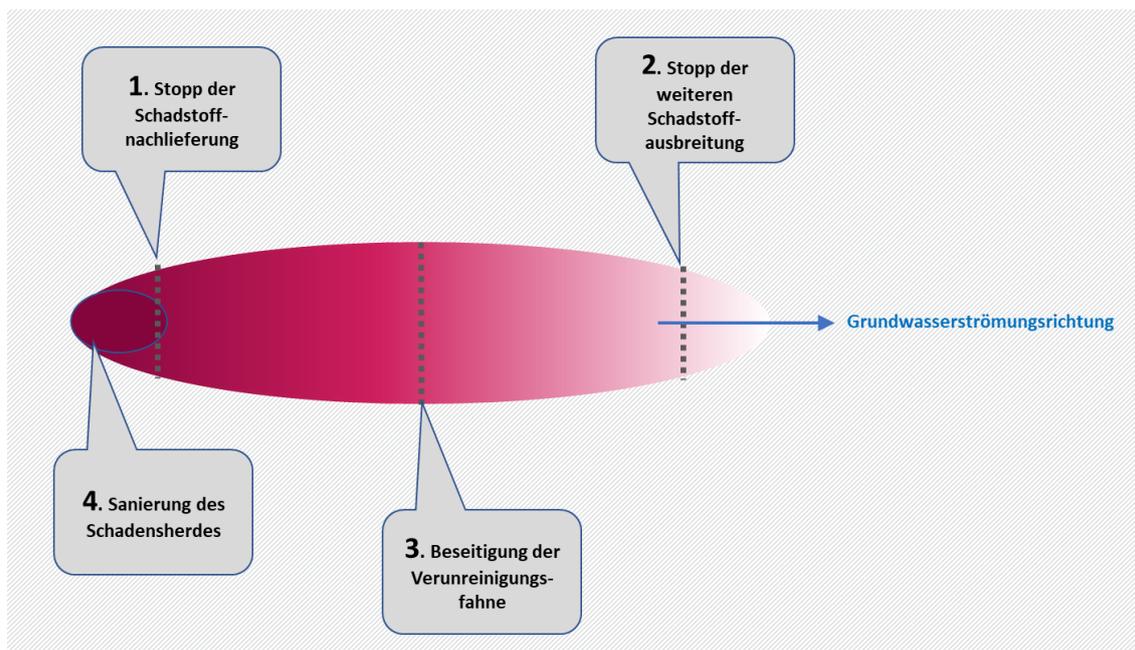
3.1 Sanierungsmanagement

Das Management der Sanierung von punktuellen PFAS-Kontaminationen kann sich wegen der Komplexität von PFAS-Schäden deutlich von herkömmlichen Sanierungen unterscheiden.

Sanierungsstrategie. Nach Abschluss der Detailuntersuchung und abschließender Gefährdungsabschätzung empfiehlt es sich, auf Grundlage des konzeptionellen Standortmodells die strategische Vorgehensweise für die Sanierung festzulegen. Aufgrund der hohen Mobilität der PFAS, zusammen mit der fehlenden mikrobiellen Mineralisierung, konnte sich schon häufig eine sich stetig ausdehnende Schadstofffahne ausbilden, sodass ein zeitlicher Aspekt der Schadstoffausbreitung bei ungehindertem Verlauf zu berücksichtigen ist. Im Rheintal wurde beispielsweise an einem Standort eine Ausbreitung der PFAS-Fahnen von 200 m/a festgestellt.

Es kann bei komplexen Fällen erforderlich sein, nach der Bewertung der betroffenen Rezeptoren hinsichtlich ihrer Schutzwürdigkeit die Sanierungsmaßnahmen zu priorisieren. Ein Beispiel ist in Abbildung 6 gezeigt. Aus zeitlichen Aspekten ist es empfehlenswert, die abgestuften (Teil-)Sanierungen nacheinander und nicht parallel zu planen und durchzuführen. Nur so kann in der Regel ein möglichst rascher Eintritt in die Sanierung realisiert werden.

Abbildung 6 Beispiel Sanierungsstrategie



Quelle: Bantz, 2018

Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen. Eine Priorisierung kann zur Folge haben, dass bei zeitlich aufeinander folgenden Sanierungsmaßnahmen für einige (nachrangig priorisierte) Rezeptoren Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen solange festgelegt werden müssen, bis die späteren Sanierungsmaßnahmen erfolgen. Ein Beispiel für Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen ist das Untersagen der genehmigungsfreien Entnahme von Grundwasser und Oberflächenwasser zu Bewässerungszwecken im Rahmen einer Allgemeinverfügung. Die rechtliche Grundlage für eine solche Maßnahme bildet das WHG (Vermeidung) in Verbindung mit dem vorsorgenden Bodenschutz nach BBodSchG. So könnte das Gießen der Gärten mit PFAS-belastetem Grundwasser zu einer schädlichen Bodenveränderung führen.

Auch eine Anreicherung in Nutzpflanzen ist nicht ausgeschlossen (vorsorgender Gesundheitsschutz) (vgl. Anhang D).

Die strategische Abfolge und Priorisierung der Maßnahmen resultiert als logische Folge aus dem konzeptionellen Standortmodell und der Bewertung der betroffenen Rezeptoren bzw. Schutzgüter im Einzelfall.

Vollständigkeitsprüfungen. Nach Festlegung der Sanierungsstrategie empfiehlt sich bei komplexen Fällen im Rahmen der Sanierungsuntersuchung die Durchführung einer systematischen Vollständigkeitsprüfung der vorangegangenen Untersuchungen. Bei der Vollständigkeitsprüfung handelt es sich nicht um das Aufzeigen von Defiziten der vorangegangenen Untersuchungsstufen (Orientierende Untersuchung, Detailuntersuchung), vielmehr ist es das Ziel, zu analysieren, welche Daten für die Auswahl des am besten geeigneten Sanierungsverfahrens noch fehlen und noch benötigt werden.

Ist das Verfahren ausgewählt, folgt eine Grundlagenermittlung für die technische Planung. Auch hierfür sind in der Regel weitere Untersuchungen notwendig.

Überwachung. Langzeitüberwachungen sind von Überwachungen im Nachgang zu abgeschlossenen Sanierungsmaßnahmen zu unterscheiden. Insbesondere sind bei einer Priorisierung von Sanierungsmaßnahmen die betroffenen Schutzgüter (z. B. Grundwasser, Seen) in ein Monitoringprogramm aufzunehmen. Dieses dient auch dazu, die Grundlage für die Bewertung möglicher zukünftiger Eingriffe in den Wasserhaushalt bewerten zu können. Bei anthropogenen Eingriffen (Wasserhaltung) muss von Seiten des Antragsstellers nachvollziehbar und prüfbar dargelegt werden, welche Auswirkungen von der beantragten Maßnahme, insbesondere auch auf den Bereich einer PFAS-Verunreinigung, ausgehen werden. Gegebenenfalls sind bei der Wasserhaltung neben einer Reinigung des möglicherweise PFAS-belasteten Grundwassers zusätzliche Gegenmaßnahmen erforderlich, um eine Schadstoffverlagerung in bisher nicht belastete Bereiche zu vermeiden. Während und nach der Maßnahme sind die Effekte im Grundwasser durch ein entsprechend zu planendes intensives Monitoring zu überwachen.

Auch nach einer Sanierung ist die Überwachung fortzusetzen. Residuale PFAS-Kontaminationen nach dem Abschluss einer aktiven Sanierungsphase brauchen einen bestimmten Zeitraum, um den Zustand der räumlichen Unveränderlichkeit des residualen Schadens (Quelle und Fahne) zu erreichen.

Sanierungsmanagement für Punktquellen

Bei komplexen Schadensfällen und mehreren betroffenen Rezeptoren sollten diese aus zeitlichen Gründen hinsichtlich ihrer Schutzwürdigkeit bewertet und die Sanierungsmaßnahmen priorisiert werden. Es ist empfehlenswert, die abgestuften (Teil-)Sanierungen nacheinander und nicht parallel zu planen und durchzuführen. Nur so kann im Regelfall ein möglichst rascher Eintritt in die Sanierung realisiert werden.

Eine Priorisierung kann zur Folge haben, dass bei zeitlich aufeinander folgenden Sanierungsmaßnahmen für einige nachrangig priorisierte Rezeptoren Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen solange festgelegt werden müssen, bis die späteren Sanierungsmaßnahmen erfolgen. Diese Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen sind ebenfalls im Planungsprozess mit zu berücksichtigen.

Langzeitüberwachungen und Monitorings sind zu planen und frühzeitig zu beginnen, um die künftige Entwicklung der PFAS-Konzentrationen im Grundwasser beurteilen zu können.

3.2 Sanierungsuntersuchung

3.2.1 Festlegung von Sanierungszielen/-zielwerten

Grundlagenermittlungen zu Sanierungszielen. Bei den PFAS können verschiedene Wirkungspfade betroffen sein (Kapitel 2.4). Wenn in den vorangegangenen Phasen noch nicht geschehen, können auch im Rahmen der Festlegung von Sanierungszielen/-zielwerten ergänzende Untersuchungen erforderlich werden. Für den Wirkungspfad Boden → Nutzpflanze können derzeit Transferfaktoren noch nicht abgeschätzt werden. Forschungsvorhaben hierzu laufen derzeit. Es wird empfohlen, die jeweils aktuellen Ergebnisse bei der Untersuchung und Bewertung von Nutzpflanzengehalten zu berücksichtigen. Bei der Bewertung von Hausgärten sind Einzelfall- und Expositionsbewertungen in Form von Sensitivitätsberechnungen (Kapitel 4.6) angeraten. Dazu kann es erforderlich werden, Untersuchungen von angebauten Gartenfrüchten oder Gemüse durchzuführen. Der Wirkungspfad Boden → Grundwasser wird mit Hilfe von Sickerwasserprognosen bewertet. Dabei sind auch die Precursor zu berücksichtigen und in der Gefährdungsabschätzung die räumliche Verteilung der Precursor und der Redoxbedingungen zu klären. Damit kann die Frage beantwortet werden, ob lokal ein Potenzial der Umwandlung von Precursor zu regulierten mobilen PFAS-Verbindungen vorliegt. Im Worst Case kann die mikrobielle Transformation (beispielsweise in der Schadstofffahne weit abstromig des Eintragsbereiches) dazu führen, dass erst zeitverzögert in der Zukunft (beispielsweise nach Abschluss der Erkundung) die Prüfwerte für die regulierten Verbindungen überschritten werden. Dies ist sowohl bei der Festlegung der Sanierungsziele als auch bei der Planung der Sanierung zu berücksichtigen.

Ableitung von Sanierungszielen. Allgemeingültige Sanierungszielwerte wurden vom Gesetzgeber nicht festgelegt, weil sie immer einzelfallbezogen zu begründen sind. Mit Sanierungszielwerten können verbal beschriebene Sanierungsziele konkretisiert werden. Sie müssen im Einzelfall begründet und auf Basis der verbalen Sanierungsziele abgeleitet werden. Für PFAS wie auch für andere Schadstoffe kann im Rahmen des Ableitungsprozesses eine Orientierung an folgenden Grundlagen erfolgen (Anhang B):

- ▶ Grundwasser:
 - Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS)
 - Leit- und gesundheitliche Orientierungswerte der Trinkwasserkommission (LW, GOW)
- ▶ Boden:
 - Sickerwasser-Prüfwerte
 - Sickerwasserprognosen für den Ort der Beurteilung
 - TDI-Werte

Im Jahr 2019 wurde für eine Reihe von Verbindungen bundeseinheitliche Beurteilungswerte abgestimmt für:

- ▶ Grundwasser (GFS/GOW-Werte, Quotientensumme⁸),
- ▶ Deponierung und Wiederverwertung von Böden,
- ▶ Direkteinleitungen in Oberflächengewässer.

⁸ Meist werden die auftretenden Verunreinigungen in Boden und Grundwasser durch verschiedene PFAS-Verbindungen hervorgerufen. Um die Summenwirkung der Gesamtheit der PFAS zu erfassen, wird eine Quotientensumme gebildet. Dabei wird für jede gefundene PFAS-Einzelsubstanz der Quotient aus analysierter Konzentration (beispielsweise im Bodeneluat) und zugehörigem GFS-Wert berechnet. Die einzelnen Quotienten werden dann addiert und bilden so die Quotientensumme. Bei einer Quotientensumme ≤ 1 ist nicht von einer schädlichen Bodenveränderung auszugehen. Bei einer Quotientensumme > 1 ist näher zu prüfen, ob eine schädliche Bodenveränderung vorliegt. Die Überschreitung der Quotientensumme bedeutet nicht unmittelbar eine Gefährdung für betroffene Schutzgüter, sondern dient als Schwellenwert, ab dem durch die zuständigen Bodenschutzbehörden nähere Untersuchungen angestellt werden müssen (https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpk/Abt5/Ref541/PFC/Seiten/Boden_Grundwasser.aspx).

Diese werden voraussichtlich im Jahr 2020 veröffentlicht. Die Festlegung von Sanierungszielen bei PFAS-Kontaminationen wird grundsätzlich analog zum Vorgehen bei anderen Kontaminationen vorgenommen. In einigen Bundesländern gibt es ermessenleitende Regeln, die u.a. auch Frachtbetrachtungen des abströmenden Grundwassers beinhalten.

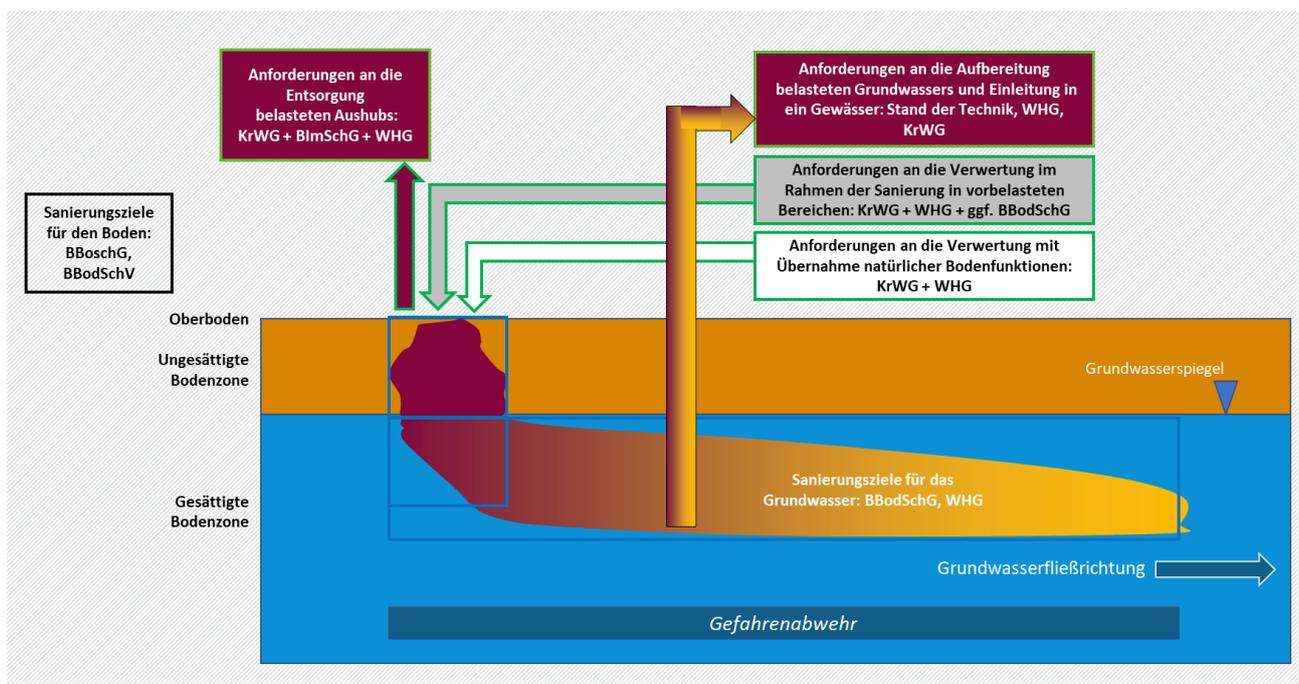
Es ist zu beachten, dass die GFS, LW oder GOW in der Regel *keine* Sanierungszielwerte sind. Es bedarf einer Prüfung des Einzelfalls und der Verhältnismäßigkeit. In verschiedenen Gerichtsprozessen ist das alleinige Heranziehen der Geringfügigkeitsschwellenwerte als Sanierungsziele als nicht zulässig erklärt worden. Ein Sanierungsziel ist demnach einzelfallbezogen unter dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit abzuleiten und zu begründen.

Für andere Schadstoffgruppen existieren bereits Arbeitshilfen, die die Verhältnismäßigkeitsprüfung thematisieren (LABO, 2015, ITVA, 2018, LUBW 2012, HLNUG, 2018). Diese Arbeitshilfen sind nicht direkt übertragbar, geben aber wertvolle Hinweise für eine Sanierungszielermittlung unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeitsprüfung. Die Umsetzung in einer Bund-/Länderarbeitshilfe zu diesem Thema wird als wünschenswert erachtet, wenn damit eine rechtliche Verbindlichkeit (z.B. Mantelverordnung) erreicht wird.

Gegebenenfalls sind im Rahmen der Sanierungszielwertfindung Nutzungseinschränkungen erforderlich. Dies kann vor allem dort der Fall sein, wo großflächige PFAS-Bodenbelastungen vorliegen.

Oft werden Vorschläge für Sanierungszielwerte von Gutachtern abgeleitet. Die Festlegung dieser zunächst noch vorläufigen Sanierungszielwerte erfolgt durch die Behörde unter Berücksichtigung des Einzelfalls. Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung wird überprüft, welche Sanierungsverfahren geeignet sind, die Sanierungsziele zu erreichen. Gegebenenfalls kann eine iterative Anpassung der Sanierungsziele bis hin zu einer Umstellung des Sanierungsverfahrens erforderlich werden.

Abbildung 7 Anforderungen an die Sanierung von Boden und Grundwasser im Rahmen der Gefahrenabwehr



Quelle: Bantz, 2018

Auch während der Sanierung sollten in Abhängigkeit des Sanierungserfolgs die Sanierungsziele regelmäßig überprüft werden. Dies gilt vor allem dann, wenn sich die Schadstoffkonzentrationen asymptotischen Werten nähern und eine Verhältnismäßigkeitsprüfung ergibt, dass eine Weiterführung der Sanierung nicht angemessen wäre (LUBW, 2012, HLNUG, 2018).

Wird die Sanierung jedoch bei höheren Restbelastungen beendet, sind die Konsequenzen abzuschätzen und zu würdigen. Erfahrungen aus PFAS-Sanierungsprojekten zur Erreichbarkeit von Sanierungszielwerten in Bereich der GFS/GOW fehlen derzeit noch. Neben den Sanierungszielwerten sind weitere Anforderungen an die Sanierung von Boden und Grundwasser zu berücksichtigen (Abbildung 7).

Festlegung von Sanierungszielen/-zielwerten

Sanierungsziele und Sanierungszielwerte sind wie bei allen anderen Schadstoffen einzelfallspezifisch festzulegen und zu begründen. Sie müssen verhältnismäßig sein. Im Rahmen des einzelfallbezogenen Ableitungsprozesses können die bekannten Beurteilungswerte (GFS, GOW, LW) als Einstieg orientierend herangezogen werden.

3.2.2 Ergänzende Untersuchungen zur Sanierungsplanung

Bei vielen Sanierungen sind zur abschließenden Auswahl der Sanierungsverfahren und zur Grundlagenermittlung ergänzende Untersuchungen erforderlich. Bei diesen Untersuchungen sind die folgenden PFAS-typischen Aspekte zu beachten.

Historische Nachrecherche. In der Regel hat bei der systematischen Altlastenuntersuchung schon eine Erfassung der Standorte und Historische Erkundung stattgefunden. Im Vorfeld der Sanierung ist diese zur Risikominimierung zu validieren, um bei der Sanierung keine weiteren Schäden zu übersehen (Held, 2015). Vor allem beim Einsatz von Feuerlöschschäumen können beispielweise nicht nur die bekannten Eintragsstellen (Feuerlöschung, Übungsplätze, Brandwachen) eine Rolle spielen, sondern auch mögliche andere Quellen, wie beispielsweise Lagerplätze für Löschsäume, Reinigungsorte für genutzte Schläuche und dauerhaft installierte Löschvorrichtungen. Zeitzeugenbefragungen sind bei PFAS-Schäden von sehr hohem Wert. Im Vergleich zu anderen Schäden sind PFAS-Schäden meist vergleichsweise jung, sodass oft noch verlässliche Zeitzeugenaussagen erhältlich sind.

Hintergrundgehalte in Böden. Noch unklar, aber vermutet, wird die Existenz einer diffusen, ausschließlich anthropogenen verursachten Hintergrundbeaufschlagung von PFAS auf Böden. Diese wird durch das folgende Ausbreitungsmodell erklärt. Trotz der Tatsache, dass PFAS (außer FTOH) eine sehr geringe Flüchtigkeit aufweisen, ist der Transport über die Luft ein relevanter Migrationsweg bei der Freisetzung aus Produktionsstandorten. Ursache dafür ist die Bindung der PFAS an Aerosole (Flüssigkeits- oder Partikelphasen). In der Luft unterliegen einige PFAS in geringem Umfang der Photooxidation. Nach dem Transport der Aerosole kann eine atmosphärische Deposition zu messbaren PFAS-Belastungen im Boden und in den Oberflächengewässern führen (Young u. Mabury, 2010, Ahrens u. Bundschuh, 2014). Eine atmosphärische Deposition kann als trockene oder nasse, niederschlagsgebundene Ablagerung auftreten (Barton et al., 2007, 2010, Dreyer et al., 2010, Taniyasu et al., 2013). Während der trockenen Deposition können PFAS auf natürliche Weise durch Sedimentation, Diffusion oder andere Prozesse auf Oberflächen abgeschieden werden. Das Auswaschen der PFAS-haltigen Aerosole durch Niederschlag wird als Nassabscheidung bezeichnet.

Zur Unterscheidung von Hintergrundbeaufschlagungen und der PFAS-Verunreinigung aus einer Quelle empfiehlt es sich, die Hintergrundwerte an geeigneter Stelle zu untersuchen. Dies erfolgt durch Untersuchungen von benachbarten Flächen, bei denen nachweislich kein aktiver Schadstoffeintrag stattgefunden hat. Zu vermeiden ist in der Regel die Sanierung von Hintergrundgehalten.

Es ist nicht ausgeschlossen, dass es durch die in jüngerer Vergangenheit eingesetzten Ersatzstoffe auch aktuell noch zu einem ubiquitären luftgebundenen Eintrag von PFAS in den Boden kommt, was zu einer anhaltenden Zunahme der Hintergrundbelastung führen würde. Dieser Prozess muss noch untersucht und gegebenenfalls laufend überwacht werden.

Untersuchungen im Schadensherd oder in der Fahne. Bei Untersuchungen, die für die Planung der Sanierung erforderlich sind, sind zusätzlich zu den PFAS auch alle im Einzelfall möglichen Begleitkontaminationen zu untersuchen. Dies spielt insbesondere bei Feuerlöschschäumen und deren Einsatzorten (beispielsweise Löschung von Treibstoff-Bränden) eine Rolle.

Da es derzeit keine Vor-Ort-Analytik für PFAS gibt, sind adaptive Verfahren (bei denen gleich Analyse- daten anfallen, die als Grundlage für die Festlegung des nächsten Sondierpunktes dienen könnten) nicht verfügbar. Differenzierte, z.T. hochauflösende Grundwasseruntersuchungen werden wie bei Schadensfällen mit anderen Kontaminanten angewendet. So bietet sich beispielsweise zur tiefendiffe- renzierten Beprobung des Grundwassers und zur Abgrenzung der in der Regel langen PFAS-Fahnen die Verwendung von Direct-Push-Verfahren (BAT-Sampler⁹ oder HPT, Hydraulic Profiling Tool) an. Die Ergebnisse können genutzt werden, um die Positionen von zu errichtenden Grundwassermessstel- len zur Dauerbeobachtung festzulegen.

Je nach Untersuchungsziel kann es von Bedeutung sein, die PFAS-Feststoffgehalte im wassergesättig- ten Bereich zu ermitteln. Wegen der Unterschiedlichkeit der PFAS-Eigenschaften und der die Sorption beeinflussenden Parameter ist eine Rückrechnung der sorbierten Mengen auf Basis der Schadstoffkon- zentrationen im Grundwasser meist nicht möglich. Es bleibt daher nur eine Beprobung und Analyse des Bodens. Zu beachten ist hierbei, dass die Bestimmungsgrenzen für die Feststoffgehalte häufig rela- tiv hoch sind. Feststoffgehalte mit dem Ergebnis „< BG“ müssen daher nicht zwangsläufig bedeuten, dass keine relevanten, eluierbaren PFAS-Gehalte zu erwarten sind. Für die Beprobung des gesättigten Bodens sind Liner-Bohrungen erforderlich.

Ergänzende Untersuchungen zur Sanierungsplanung

Im Vorfeld der Sanierung ist zur Risikominimierung die Historische Erkundung zu validieren, um bei der Sanierung keine weiteren Schäden zu übersehen. Zur Unterscheidung von Hintergrundbe- aufschlagungen und der PFAS-Verunreinigung aus einer Quelle empfiehlt es sich, die Hintergrund- werte an geeigneter Stelle zu untersuchen. Dies erlaubt dann auch die Abgrenzung der punktuellen Belastung. Der Sanierungsbedarf richtet sich nach der Gefahrensituation und dem daraus folgen- den Entschließungsermessen der Behörde.

Vor der Planung von Sanierungsverfahren sind Untersuchungen von Begleitkontaminationen erfor- derlich. Diese spielen insbesondere bei Feuerlöschschäumen und deren Einsatzorten (beispiels- weise Löschung von Treibstoffbränden) eine Rolle. Precursor sind sowohl bei der Festlegung der Sanierungsziele als auch bei der Planung zu berücksichtigen.

3.2.3 Auswahl und Bewertung von Sanierungsverfahren

Für die Ableitung und den Entwurf (Design) eines standortspezifisch machbaren Sanierungsverfah- rens sind weitere PFAS-spezifische Faktoren zu berücksichtigen. Diese sind in Tabelle 6 zusamme- stellt.

⁹ Bei der BAT sollte alles aus Glas oder Edelstahl sein. Wenn das HPT-System Leitungen aus PTFE hat, ist es weniger geeignet. Bei einer Top-Down-Beprobung sollten bei jeder Tiefe neue Schläuche verwendet werden.

Tabelle 6 Designkriterien und Überlegungen zur PFAS-Sanierung (ergänzt und verändert, nach NGWA, 2017)

Parameter	Begründung	Krit.**
Konzentration der kritischen PFAS-Verbindungen	Kritische PFAS-Verbindungen sind vor allem solche, die einen geringen Orientierungswert und/oder hohe Mobilität und geringe Sanierbarkeit aufweisen. Auch die ionische Form (neutral, an- oder kationisch) kann bestimmend für die Eignung des Sanierungsverfahrens sein.	+++
PFAS-Kettenlänge	Wenn eine PFAS-Mischung mit stark unterschiedlichen Kettenlängen vorliegt, beeinflusst dies signifikant die Wahl des Sanierungsverfahrens.	+++
Precursor-Inventar	Liegen substanzielle Mengen an Precursor vor? Ist die Mobilisierung von Precursor ein Problem für das Sanierungsareal?	++
Anwesenheit und Art von Co-Kontaminanten	Welche Co-Kontaminanten sind am problematischsten? Wurde vor Ort bereits eine Sanierung durchgeführt, die die PFAS-Verteilung verändert haben könnte? *	++
BSB (Biologischer Sauerstoffbedarf)	Produkte mit fluorierten Tensiden wie AFFF können einen erhöhten BSB aufweisen, der zu einer starken Sauerstoffzehrung und Anaerobisierung des Aquifers gegebenenfalls mit Bildung löslichen Eisens führt.	+
TSS (Gesamtmenge suspendierte Feststoffe)	Aufgrund der tensidischen Natur vieler PFAS reichern sie sich bevorzugt an Grenzflächen wie suspendierten Feststoffen in einem Aquifer an. Dies stellt an die Grundwasseraufbereitung zusätzliche Anforderungen.	++
Grundwasserabstandsgeschwindigkeit	Die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst die diffuse Freisetzung. Wenn PFAS von verfügbaren Oberflächen desorbieren, führen langsame Strömungsgeschwindigkeiten wahrscheinlich zu höheren PFAS-Konzentrationen im Wasser.	+
PFAS-Sanierung vs. hydraulische Sicherung	Sind sowohl die Quelle als auch die Fahne berücksichtigt?	+++
pH	Der pH-Wert beeinflusst Sorptionsprozesse.	+
Organischer Kohlenstoffanteil Boden (TOC)	Die Quantität und Qualität des bodengebundenen organischen Kohlenstoffs beeinflusst das Transportverhalten der PFAS. Ein erhöhter TOC-Gehalt führt zu einer verstärkten Sorption der PFAS.	++
Gibt es natürlich vorkommende Prozesse, die die Sanierung beeinträchtigen könnten?	Beispiele sind: Tonlinsen, erhöhte Ca ²⁺ -Konzentrationen, hoher organischer Kohlenstoffgehalt, schnelle Grundwasserströmungen, etc.	++
Überlagerung mit anderen Schadstoffen	Bei einer Überlagerung mit anderen Schadstoffen (LHKW-Schäden, Chrom-Schäden etc.) können diese eine gezielte Sanierung des PFAS-Schadens beeinträchtigen.	++

* Sanierungsverfahren, die auf die Sanierung von Begleitkontaminationen ausgerichtet sind, können die Mobilität der PFAS beeinflussen. So kann die Forcierung des aeroben mikrobiellen Abbaus oder der *in-situ* chemischen Oxidation (ISCO) zu einer raschen Precursoroxidation führen. Im Ergebnis könnten möglicherweise bevorzugt kurzkettige PFAS gebildet werden, die mobiler sind als die Ausgangsprodukte. Auch sanierungsbedingte geochemische Veränderungen des Aquifers (z. B. Redoxpotential, pH-Wert) können zu einer Mobilisierung der PFAS führen.

** Kritischer Parameter: +++ sehr starker Einfluss, ++ starker und + geringer Einfluss auf die Wahl des Sanierungsverfahrens

Weitere Kriterien, um geeignete Ansätze für eine erfolgreiche Sanierung zu entwickeln, sind:

- ▶ Akzeptabler Zeitrahmen für die Sanierung
- ▶ Technologieakzeptanz und Beteiligung der Stakeholder
- ▶ Weitere zu berücksichtigende Schadstoffe im Bereich der PFAS-Kontamination
- ▶ Kosten zur Sanierung
- ▶ Verhältnismäßigkeit und Nachhaltigkeit des Sanierungskonzeptes
- ▶ Vereinbarkeit mit dem täglichen Standortbetrieb.

Die Vor- und Nachteile sowie die Marktreife verschiedener Sanierungsverfahren sind in Anhang C dargestellt. Sie lassen sich generell unterscheiden in:

- ▶ **Etablierte Verfahren.** Dies sind Verfahren, deren Wirksamkeit unter Pilot-Bedingungen oder im technischen Maßstab demonstriert wurde und für die mehrere Anwendungen in der Literatur gut dokumentiert sind.
- ▶ **Erfolgversprechende Verfahren.** Dies sind Verfahren, deren Wirksamkeit im Pilot- oder Full-Scale-Maßstab demonstriert wurde, deren Übertragbarkeit auf andere Standorte jedoch noch nicht validiert ist.
- ▶ **Experimentelle Verfahren** sind solche, die in der Fachliteratur von mehreren Forschern oder Praktikern dokumentiert sind, aber nur im Labor durchgeführt wurden oder sich noch in der Entwicklung befinden.

Grundwasser. Zur Sanierung des Grundwassers werden derzeit vorwiegend *Pump-and-Treat*-Verfahren mit der Sorption der PFAS auf Aktivkohle verwendet. Alle anderen Verfahren befinden sich, bis auf wenige Ausnahmen, noch im Entwurfs- oder Entwicklungsstadium. In Anhang C sind dennoch nicht nur die Verfahren beschrieben, die schon eine Marktreife erlangt haben oder kurz davorstehen, sondern auch andere Verfahren, bei denen die Chancen sich am Markt etablieren können, nur als vergleichsweise gering angesehen sind. Vor dem Hintergrund, dass derzeit zahlreiche Verfahrensanbieter am Markt aktiv sind, soll diese Zusammenstellung den Lesern die Möglichkeit bieten, angebotene Lösungen hinsichtlich ihrer Erfolgsaussichten besser bewerten zu können. Im Anhang C sind daher auch die Wirkungsweisen der Verfahren, die Einsatzmöglichkeiten, der Entwicklungsstand sowie offene Fragen beschrieben.

Für das Grundwasser wird es wegen der fehlenden mikrobiellen Abbaubarkeit und der oft großen flächigen Ausdehnungen der Fahnen zukünftig vermutlich keine oder nur sehr begrenzte *In-situ*-Sanierungsverfahren geben. Das Standortmanagement wird daher wahrscheinlich meist auf eine hydraulische Sicherung des Grundwasserabstroms hinauslaufen. Zur Sicherung kommen *Pump-and-Treat*-Verfahren oder Barriereverfahren (z. B. *Funnel-and-Gate*) in Frage.

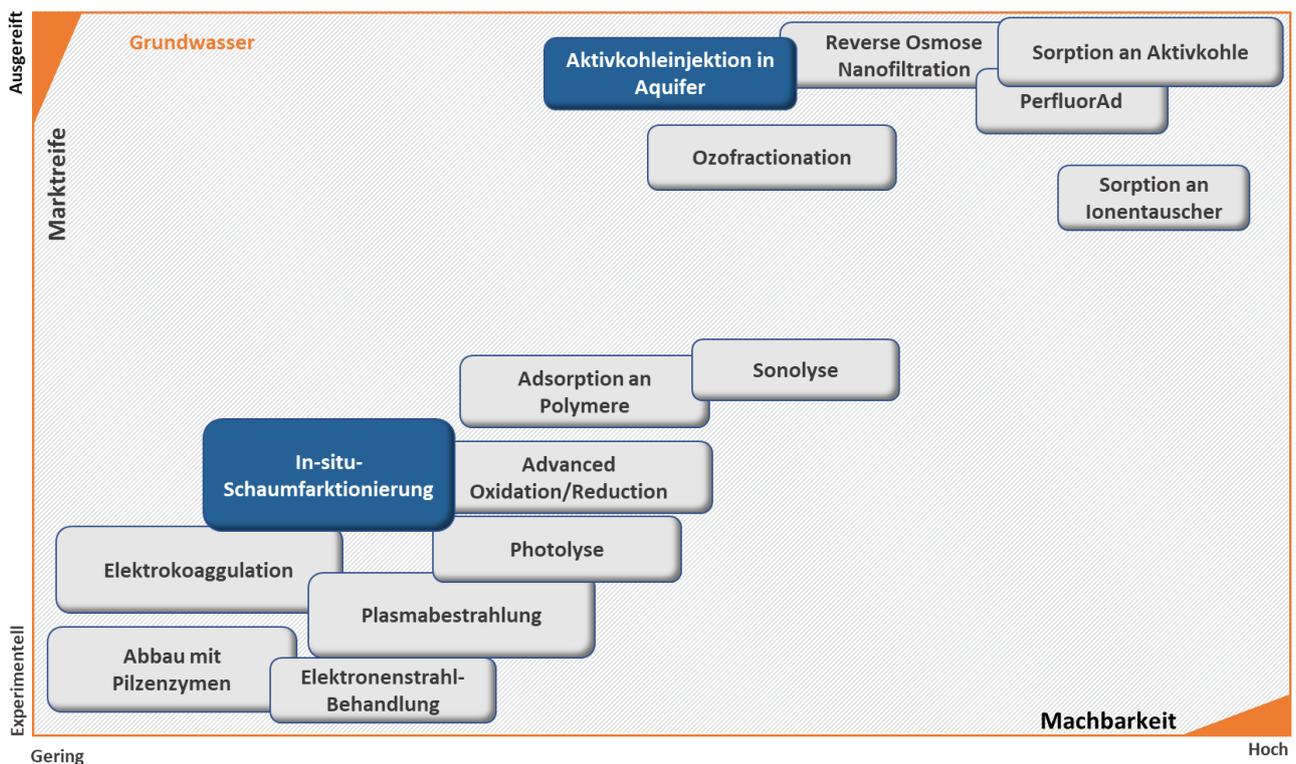
Derzeit identifizierte Sanierungsoptionen für Grundwasser sind hinsichtlich Machbarkeit und Entwicklungsstand nach Einschätzung der Autoren in Abbildung 8 zusammengestellt. Auch wenn einzelne Verfahren bis zur Marktreife entwickelt wurden, ist dies keine Garantie dafür, dass sie sich am Markt etablieren werden.

Die *In-situ*-Schaumfraktionierung wäre nach entsprechender Entwicklung das einzige Dekontaminations-Verfahren, das zur *In-situ*-Anwendung konzipiert ist. Aber auch dieses ist zur flächendeckenden Sanierung der meist ausgedehnten PFAS-Fahnen aus Kostengründen kaum geeignet. Denkbar wäre aber eine Anwendung, die Funktionalität des Verfahrens vorausgesetzt, als Barriereverfahren. Die elektrochemische Oxidation wurde ebenfalls als Barriereverfahren in Betracht gezogen. Wegen der Bildung schädlicher Nebenprodukte wird dies jedoch voraussichtlich in absehbarer Zeit nicht umgesetzt werden.

Zur *In-situ*-Anwendung dient auch die Injektion von Aktivkohle in den Aquifer, dabei handelt es sich aber um ein reversibles Sorptionsverfahren im Sinne einer vorübergehenden Sicherung.

Wegen der teilweise erforderlichen rigiden Reaktionsbedingungen kommen zerstörende Verfahren in den *In-situ*-Reaktoren von *Funnel-and-Gate*-Barriereverfahren (F&G) eher nicht zur Anwendung. Dort wird man sich in den meisten Fällen auf Sorptionsprozesse wie beispielsweise Sorption an Aktivkohle mit all deren Vor- und Nachteilen beschränken müssen. Beladene Sorbentien müssen in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden. Die geringen Beladepazitäten der meisten Sorbentien und das frühe Durchbrechen der kürzerkettigen PFAS haben Überlegungen zur Anwendung von F&G im Feld bisher gehemmt.

Abbildung 8 Mögliche Sanierungsverfahren für Grundwasser (blau: *In-situ*-Anwendung)



Quelle: Arcadis Germany GmbH, 2019

Alle anderen Verfahren basieren auf der Entnahme von Grundwasser mit nachfolgender Behandlung des PFAS-kontaminierten Grundwassers. Als „*Stand Alone*“ wird ein Verfahren dann bezeichnet, wenn die Reaktionsgeschwindigkeiten so hoch sind, dass es im Rahmen der *Pump-and-Treat*-Maßnahmen zur kontinuierlichen Reinigung des geförderten Grundwassers eingesetzt werden kann. Es muss dann unterschieden werden, ob der „Ablaufwert“ einhaltbar ist. Das kann in den meisten Fällen erreicht werden, der Aufwand hierfür ist jedoch unterschiedlich groß. So werden beispielsweise bei den Ionentauschern mehrere Verfahrensstufen benötigt. Bei anderen destruktiven Verfahren muss die Behandlungszeit entsprechend verlängert werden, um den Ablaufwert zu erreichen. Die Behandlungsdauer wird bei verschiedenen Verfahren aber so groß, dass diese Verfahren nicht zur kontinuierlichen Behandlung von abgepumptem Grundwasser eingesetzt werden können. Stattdessen wären sie dann zur Behandlung von PFAS-Konzentraten verwendbar, welche vor allem bei den Sorptionsverfahren (die Machbarkeit einer milden Desorption vorausgesetzt) oder anderen Trennverfahren entstehen.

Ausschlaggebend für die zukünftige Anwendbarkeit der in Abbildung 8 gezeigten Verfahren dürften die Erfahrungen sein, die mit deren Anwendung 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 einige sich vor allem zur Behandlung gering belasteter Wässer ohne hohe Konzentrationen an Störstoffen eignen, gibt es andere (beispielsweise Fällungsverfahren), die sich eignen, um höhere Konzentrationen von PFAS vor der Verwendung von anderen Adsorptionsmitteln mit dem Ziel zu entfernen, die Lebensdauer des nachreichenden Adsorptionsmittels zu verlängern. Infolge der Fällung wird hier jedoch ein Abfallschlamm erzeugt, der vor der Entsorgung noch entwässert werden muss.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Verfahrensbewertung für Grundwasser^(*)

Verfahren	Stand Alone ^(**) ?		Schädliche Nebenprodukte?	Entstehung Konzentrat	In-situ anwendbar?
	Ablaufwert/ SZW ^(***)	Behandlungsdauer			
Sorption Aktivkohle	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja (Aktivkohle-injektion in den Aquifer)
Sorption an Ionenaustauscher	(Ja)	Ja	Nein	(Ja)	Nein
Sorption an Polymere	?	(Ja)	Nein	(Ja)	Nein
PerfluorAd	Nein	Ja	Nein	Ja (Filterkuchen)	Nein
Umkehrosmose	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein
Nanofiltration	Nein	ja	Nein	Ja	Nein
Ozofractionation	Nein	Ja		Ja	Ja (In-situ Schaumfraktionierung)
Sonolyse	(Ja)	Nein	Nein	Nein	Nein
Advanced Oxidation/Reduction	(Nein)	(Nein)	(Ja)	Nein	(Ja)
Elektrochemische Oxidation	(Ja)	(Nein)	Ja	Nein	(Ja)
Mikrobieller Abbau mit Pilzenzymen	Nein	Nein	?	Nein	(Ja)
Photolyse	(Ja)	Nein	Nein	Nein	Nein
Plasmabestrahlung	(Ja)	(Nein)	Nein	Nein	Nein
Elektronenstrahl-Behandlung	(Ja)	(Nein)	Nein	Nein	Nein
In-Situ-Schaum-Fraktionierung	(Nein)	Ja	Nein	Ja	Ja

(*) (Ja) bedeutet „vermutlich ja“, (Nein) bedeutet „vermutlich nicht“, ? = keine Informationen verfügbar.

(**) Stand-Alone-Verfahren sind solche, die in kontinuierlichen Prozessen (wie beispielsweise *Pump-and-Treat*) keine zusätzlichen Verfahren (wie beispielsweise vorherige Aufkonzentrierung) benötigen.

(***) An dieser Stelle steht „Ja“ wenn mit diesem Verfahren die behördlich üblicherweise vorgegebenen Ablaufwerte von Grundwasserbehandlungsanlagen (vgl. Anhang B) oder die Sanierungszielwerte (SZW) mit einer moderaten Behandlungsdauer eingehalten werden können.

Die Entwicklung von neuen Adsorbentien basiert entweder auf einer Anpassung verfügbarer Materialien auf die Entfernung der PFAS oder auf der Herstellung vollkommen neuer Materialien. Keines der Adsorbentien zerstört jedoch die Schadstoffe, sondern führt lediglich zu einer Umlagerung von einer Matrix auf eine andere.

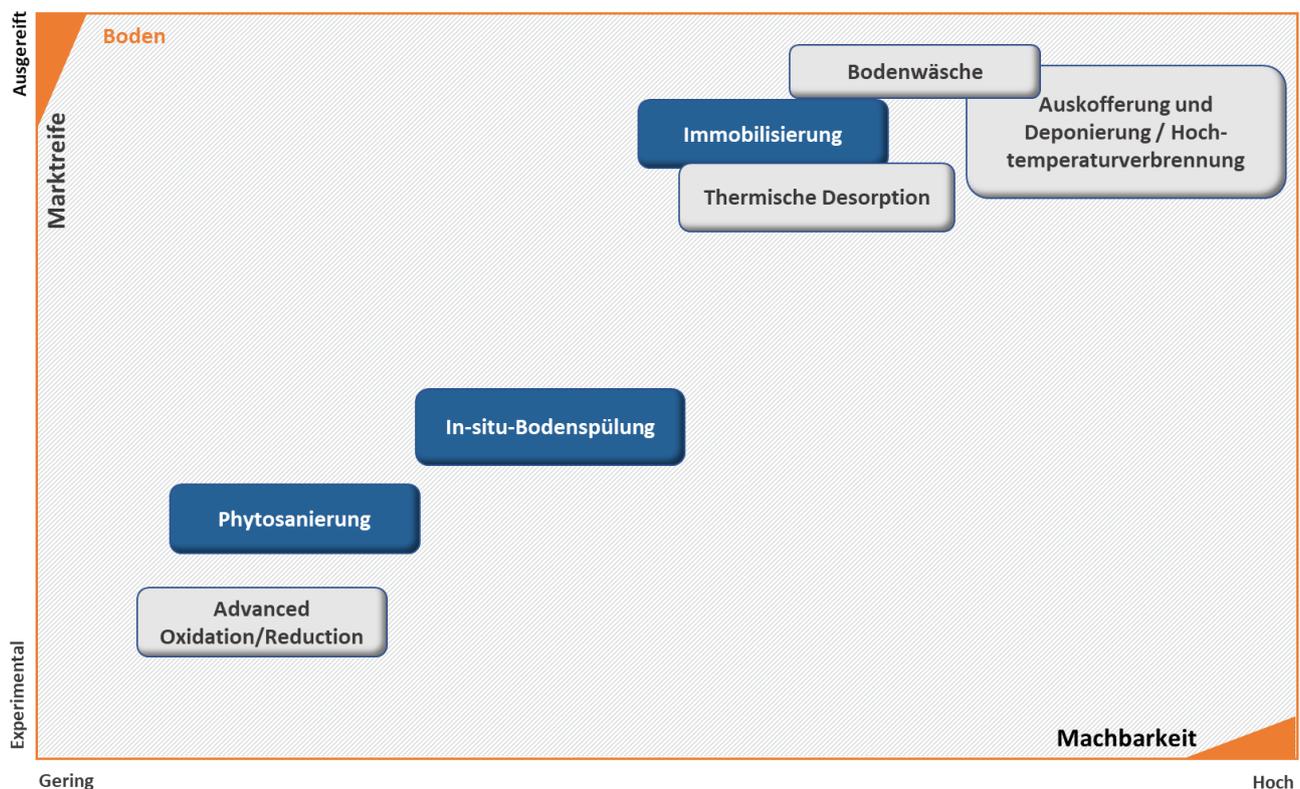
Die individuellen Standortfaktoren eines jeden Sanierungsfalls müssen jeweils für sich betrachtet werden. So sind die Behandlungskosten vor allem stark abhängig vom Spektrum der PFAS-Einzelverbindungen, möglicher Konkurrenzadsorption, eventuell vorhandenen Störstoffen sowie den behördlich festgelegten Reinigungszielwerten.

Bei dem klassischen Verfahren *Pump-and-Treat*-Verfahren gab es bereits Überlegungen, die Mobilität der PFAS im Grundwasserleiter durch eine gezielte Veränderung des Redoxmilieus, beispielsweise durch Injektion von Oxidationsmitteln zu erhöhen. Verfahren der Redoxmanipulation können im Labormaßstab geprüft werden. Dabei kann auch untersucht werden, ob eine forcierte Transformation der Precursor zu erhöhten Konzentrationen an Perfluoralkansäuren führt. Ferner muss dabei im Einzelfall geprüft werden, ob das Ausmaß der Mobilisierung so hoch ist, dass sich die dadurch verursachten Mehrkosten rechnen.

In Tabelle 7 wurden die Ergebnisse der in Anhang C detailliert beschriebenen Verfahrensbeschreibungen zur Reinigung von Grundwasser bewertend zusammengefasst.

Boden. Derzeit konzentrieren sich die Verfahren zur Sanierung des Bodens auf den Austausch und die Verwertung/Entsorgung des kontaminierten Bodens (Abbildung 9).

Abbildung 9 Mögliche Sanierungsverfahren für Boden (blau: *In-situ*-Anwendung)



Quelle: Arcadis Germany GmbH, 2019

Aufgrund begrenzter Deponiekapazitäten ist die Ablagerung PFAS-belasteter Böden mit erheblichem Aufwand und erheblichen Kosten verbunden, wenn es überhaupt gelingt, eine Ablagerungsmöglichkeit zu finden. Wegen des stark begrenzten Deponieraumes und der weit verbreiteten Bedenken der Deponiebetreiber, PFAS-belasteten Boden anzunehmen, stehen Alternativen zur Deponierung des belasteten Bodens hoch im Kurs.

Die lange Zeit, die die natürliche Auslaugung des Schadensherdes in Anspruch nimmt, bedingt, dass wahrscheinlich künftig der Fokus künftig vor allem auf der Quellensanierung (d. h. Behandlung des ungesättigten Bodens) liegen wird. Abbildung 9 zeigt eine Einschätzung der Marktreife und des Entwicklungsstandes für Boden-Sanierungsverfahren. In Anhang C sind diese näher beschrieben. Für neuere Verfahren gilt, dass Erfahrungswerte (technisch-organisatorische Umsetzung, Konzentrationsober- und -untergrenzen, Wirkungs- und Sanierungsdauer, einzelfallübergreifende Anwendbarkeit) und Kostendaten für eine Anwendung im technischen Maßstab weitgehend fehlen.

Gesamtsicherung. Eine weitere Option zur Sanierung ist die Sicherung des Standorts (Abdichtung, Einkapselung). Mit Hilfe der Oberflächenabdichtung wird die Schadstoffauslaugung des ungesättigten Bodens unterbunden. In vielen Fällen ist auch eine vertikale Einkapselung und eine Bewirtschaftung des eingekapselten Bereiches (Grundwasserentnahme und Reinigung) erforderlich. Die Schadstoffe verbleiben jedoch dauerhaft vor Ort. Im Gegensatz zu herkömmlichen Schadstoffen ist nicht mit einer signifikanten Änderung des Redoxmilieus im hydraulisch isolierten Bereich zu rechnen, sofern keine mikrobiell abbaubaren Begleitschadstoffe vorliegen (beispielsweise nicht-fluorierte Tenside aus den Feuerlöschschäumen). Folglich ist auch nicht mit einer Methanbildung zu rechnen, die zusätzliche Anwendungen erfordern würde. Ansonsten unterscheidet sich das bautechnische Sicherungsverfahren bei PFAS-Kontaminationen nicht von dem anderer Belastungen.

Wirksamkeit. Die Wirksamkeit der diskutierten Verfahren im Hinblick auf die Eliminierung von Precursor, Non-Precursor und kurzkettigen PFAS lässt sich durchgängig nicht beantworten. Hierzu fehlen fast immer die entsprechenden Daten. Das trifft auch auf eine Reihe weiterer Verfahrenskenngrößen zu wie u. a.:

- ▶ Wirtschaftliche Machbarkeit (Abschätzung spezifischer Verfahrenskosten),
- ▶ Geschätzte Gesamt-Verfahrenskosten und
- ▶ Nachhaltigkeit (Sanierungsdauer, Energiebedarf, CO₂-Emission).

Bei der Auswahl von Verfahren in der Sanierungsuntersuchung sind Vorversuche dringend empfehlenswert. Das Spektrum der PFAS-Verbindungen, Begleitstoffe und Störstoffe muss dabei berücksichtigt werden, ebenso wie die Mengen anfallender Reststoffe (Eisenschlamm, beladene Aktivkohle usw.).

Die an einer Reihe von derzeit bereits in der Sanierung befindlichen PFAS-kontaminierten Standorten realisierten Sanierungskonzepte sind in Anlage D zusammengestellt.

Sanierungsverfahren

Wegen der besonderen Eigenschaften der PFAS ist die Auswahl der anwendbaren und verfügbaren marktreifen Sanierungsverfahren begrenzt. Gegenwärtig fokussiert sich die Sanierung auf *Pump-and-Treat* und Bodenaustausch als Hauptverfahren. Die Deponierung von PFAS-belastetem Boden ist jedoch kaum noch möglich, weil viele Deponien derzeit kein PFAS-haltiges Bodenmaterial annehmen. Daher sind alternative Verfahren, nicht nur zur Boden-, sondern auch zur Grundwassersanierung von besonderem Interesse. Es soll daher immer geprüft werden, ob diese an einem Standort anwendbar sind und gegebenenfalls zu geringeren Sanierungskosten führen. Die Sanierbarkeit der Precursor ist dabei zu berücksichtigen. Die Anwendbarkeit sowie Vor- und Nachteile innovativer PFAS-Sanierungsverfahren sind ausführlich in Anhang C dargestellt.

In der Regel ist es erforderlich die Verfahren unter standortspezifischen Bedingungen im Labor und gegebenenfalls im Feld zu testen.

3.3 Hinweise zur Sanierungsausführung

Risiko der Schadstoffverschleppung. Die besonderen Eigenschaften der PFAS, insbesondere deren Neigung, sich an Oberflächen anzulagern, sollte bei der Ausführung von Sanierungen bedacht werden. Hier besteht die Gefahr der Schadstoffverschleppung. Um Querkontaminationen zu vermeiden, sollten alle für Probenahmen und die Sanierung verwendete Gerätschaften nach (bzw. gegebenenfalls auch während dem Einsatz) komplett gereinigt werden. PFAS-kontaminierte Reinigungslösungen sind fachgerecht zu entsorgen. Alternativ sollten die Gerätschaften bzw. die Sanierungstechnik ausschließlich für die Bearbeitung PFAS-kontaminierter Standorte eingesetzt werden.

Es sind Schwarzweiß-Bereiche zu definieren und geeignete Möglichkeiten zum Reinigen zu schaffen, um Schadstoffverschleppungen zu vermeiden. Bei Grundwasserreinigungsanlagen besteht die Gefahr der Schadstoffverschleppung prinzipiell auch an Probenahmehähnen oder -leitungen.

Immissionsschutzrecht. Wenn Bodenmaterial im Rahmen einer größeren Sanierung zur Umlagerung bereitgestellt oder behandelt werden soll, wird empfohlen, zu prüfen, ob der Abfall-Anlagenbegriff nach KrWG und BImSchV zutrifft und eine zeitaufwändige Genehmigung nach BImSchG überhaupt erforderlich ist. Eine Genehmigung nach BImSchG führt oft zu einer starken Verzögerung des Sanierungsbeginns. Gegebenenfalls ist die Möglichkeit einer Ausnahmeregelung nach §28 (2) KrWG zu prüfen.

Arbeitsschutz. Die Anforderungen an den Gesundheits- und Arbeitsschutz bei PFAS-kontaminierten Standorten unterscheidet sich nicht von denen an konventionellen Standorten. Generell gelten die Regeln für Arbeiten in kontaminierten Bereichen (TRGS 524, 2011). Es sind die Expositionen und Gefährdungen in Abhängigkeit der Sanierung zu ermitteln. Derzeit existieren keine arbeitsschutzrechtlichen Werte. Hilfsweise könnte durch Gutachter versucht werden, vorläufige Werte für den Wirkungspfad Boden → Mensch abzuleiten, auf die im Hinblick auf das Arbeitsschutzrecht zurückgegriffen werden könnte. Dazu existieren bereits Abschätzungen, die bei Fachvorträgen präsentiert wurden. Demnach lägen die Werte im mg/kg-Bereich. Ob diese jedoch belastbar sind, muss auch mit Blick auf die sich möglicherweise ändernden TDI-Werte geprüft werden. Derzeit gibt es jedoch noch keine verbindlichen Berechnungen für vorläufige Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden → Mensch (direkter Kontakt). Dies bedeutet, dass an dieser Stelle dringender weiterer Handlungsbedarf besteht.

Bei hohen Gehalten mit Precursor ist gegebenenfalls die Resorptionsverfügbarkeit nach DIN 19738 zu prüfen.

Rebound. Durch die Sanierung werden die Untergrundprozesse anthropogen verändert. Diese bilden sich nach Abschluss der Sanierung wieder auf natürliche Bedingungen zurück. Die anthropogenen Veränderungen (P&T, Bodenaustausch) können einen Einfluss auf die Konzentrationen der im Grundwasser gelösten Schadstoffe haben. Daher ist im Anschluss an eine aktive Sanierung der Standort über einen definierten Zeitraum zu überwachen und zu überprüfen, ob die Sanierungszielwerte dauerhaft unterschritten bleiben.

Hinweise zur Sanierungsausführung

Bei der Sanierung von PFAS-Kontaminationen ist insbesondere darauf zu achten, dass Schadstoffverschleppungen vermieden werden und der Arbeitsschutz beachtet wird. Ansonsten folgt die Durchführung der Sanierung den bekannten Anforderungen an Auslegung, Überwachung und Sanierungssteuerung. Erforderliche Genehmigungen sind rechtzeitig zu beantragen, um Zeitverzögerungen zu vermeiden.

4 Sanierungsmanagement für flächenhafte PFAS-Kontaminationen

4.1 Einleitung

Flächenhafte PFAS-Bodenkontaminationen können in einer ersten Annäherung systematisch in (a) zusammenhängende Großflächen und (b) nicht zusammenhängende Anhäufungen von Einzelflächen unterschieden werden. Großflächen sind im Wesentlichen auf PFAS-Einträge über die Luft aus Gewerbe- oder Industrie-Emissionen oder auf Überschwemmungen von Oberflächenwasserabläufen von z. B. Löschübungsplätzen o.ä. zurückzuführen.

Bei Anhäufungen von Einzelflächen fanden nach derzeitigem Kenntnisstand Aufbringungen von PFAS-haltigem Material (z. B. Düngemittel, etc.) auf Einzelflächen statt. Die Einzelflächen verursachen sich überlagernde Einzel-Schadstofffahnen im Grundwasser und insgesamt großflächige Grundwasserverunreinigungen (nachteilige Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit). Nachfolgend werden die Besonderheiten beim Sanierungsmanagement beschrieben und Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt. Grundsätzlich sollte bei großflächigen PFAS-Kontaminationen mit vielen Betroffenen eine aktive Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt werden (Kapitel 0).

4.2 Management bei PFAS-Einwirkung auf das Grundwasser (Wirkungspfad Boden → Grundwasser)

4.2.1 Orientierende Untersuchung - Abgrenzung der schädlichen Bodenveränderungen

Bei großflächigen Bodenverunreinigungen, die in der Regel auch mit großflächigen Grundwasserverunreinigungen einhergehen, existiert meist ein sehr hoher Druck der Öffentlichkeit und die Forderung, sofort Sanierungsmaßnahmen zu ergreifen. Es hat sich, dessen ungeachtet, bewährt, die zu ergreifenden Maßnahmen in der bewährten Grundsystematik des Bodenschutzrechts abzuarbeiten.

Die Orientierende Untersuchungen werden grundsätzlich in Abhängigkeit der entsprechenden einzelfallbezogenen Anhaltspunkte für die schädliche Bodenveränderung durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgen grundsätzlich grundstücksbezogen oder, wenn sich die Belastungsquelle über mehrere Grundstücke erstreckt, quellflächenbezogen.

Mit der orientierenden Untersuchung sind die Schadstoffquellen zu identifizieren und die Sickerwasereinträge zu prognostizieren. Ansonsten würde die Größenordnung der Schadstoffbelastung einzelner Flächen unklar bleiben und eine Auswahl der Zustandsstörer wäre nicht möglich. Außerdem würden bei der weiteren Bearbeitung alle Maßnahmen und Nutzungseinschränkungen für beispielsweise die Landwirtschaft auch unbelastete Grundstücke betreffen. Dies könnte dann zu Schadensersatzforderungen oder nur zu einem Mehraufwand (wenn zum Beispiel ein Vorerntemonitoring durchgeführt wird) führen.

Anhäufung von Einzelflächen. Bei Anhäufungen von Einzelflächen müssen zur Klärung der Frage, bei welchen Flächen ein Verdacht besteht, gezielte Recherchen durchgeführt werden. Wenn sich herausstellt, dass es keine oder unzureichende Recherchemöglichkeiten gibt und lediglich bekannt ist, dass innerhalb eines Gebietes Belastungen auftreten, können gegebenenfalls die Verdachtsbereiche über den Grundwasserpfad, das heißt über die Rückverfolgung der Schadstoffbahnen abgegrenzt werden. Eine rein integrale Vorgehensweise zur Eingrenzung der Bodenkontaminationen ohne Grundstücksbezug ist in dieser Phase der Orientierenden Untersuchung nach derzeitigem Rechtsverständnis (Bodenschutzrecht) nicht möglich.

Wenn der Wirkungspfad Boden → Pflanze betroffen ist, muss eine ackerschlagscharfe Untersuchung erfolgen, weil sonst keine zielgerichteten Bewertungen und keine Festlegung der daraus resultierenden Maßnahmen wie das Vorerntemonitoring möglich wären.

Zusammenhängende Großflächen. Bei Großflächen, deren Belastungen z. B. aus Gewerbe- oder Industrie-Emissionen resultieren, können mit Luft-Schadstoffausbreitungsmodellen, die von der Primärquelle beaufschlagten Bereiche zunächst theoretisch abgegrenzt werden. Wegen der zusammenhängenden Belastungssituation kann auf Basis dieser Daten dann z. B. eine integrale, rasterartige Untersuchung der beaufschlagten flächenhaften Sekundärquelle erfolgen.

Verwendung von Datenbanken. Eine Besonderheit bei der Orientierenden Untersuchung von flächenhaften PFAS-Kontaminationen sind die entstehenden großen Datenmengen. Ohne den Einsatz von Datenbanken und raumbasierten grafischen Informationssystemen werden in der Regel zielführende Auswertungen nicht möglich sein. Wenn der Wirkungspfad Boden → Grundwasser betroffen ist, hat es sich bewährt, schon frühzeitig ein hydraulisches Grundwassermodell oder ein instationäres Schadstofftransportmodell aufzubauen und für die Prognose des Schadstofftransportes anzuwenden.

Orientierende Untersuchung und Abgrenzung der schädlichen Bodenveränderungen

Eine rein integrale Vorgehensweise in der Phase der Orientierenden Untersuchung ist nach aktuellem Rechtsverständnis nach dem Bodenschutzrecht nicht möglich. Es müssen Einzelflächen untersucht werden.

Der Einsatz von Datenbanken und raumbasierten grafischen Informationssystemen ist bei flächenhaften Kontaminationen von Beginn an und kontinuierlich erforderlich.

4.2.2 Orientierende Untersuchung - integrale Untersuchung und Bewertung

Nach Vorliegen der Ergebnisse aus der *Orientierenden Untersuchung mit Abgrenzung der schädlichen Bodenveränderungen* ist es sinnvoll, zu prüfen, welche Einzelflächen zu Clustern zusammengefasst werden können. Hierzu eignen sich integrale Ansätze. Die gemeinsame Bearbeitung von Clustern ist dann sinnvoll, wenn sich die Grundwasserverunreinigungen aus den Einzelflächen überlagern. Im Rahmen dieser Bearbeitung ist auch zu bewerten, ob eine getrennte Erkundung von Einzelflächen oder kleiner Cluster

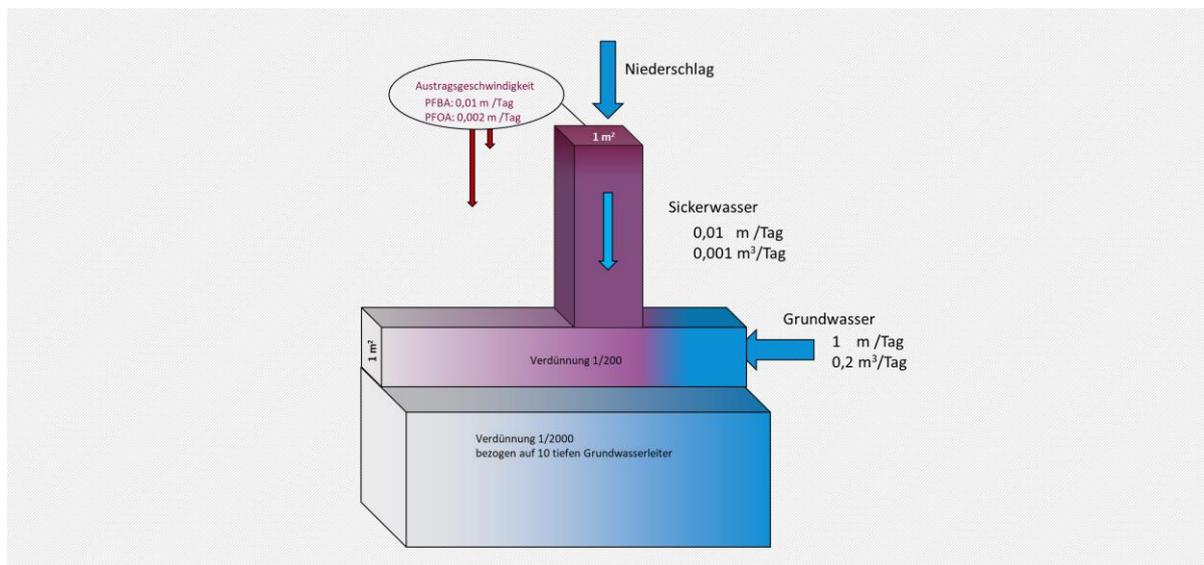
- ▶ überhaupt fachgerecht, d. h. geeignet ist, das Erkundungsziel zu erreichen und/oder
- ▶ nicht zu einem wirtschaftlich hohen, verhältnismäßigen Aufwand führen würde.

Flächencluster können als Teilbearbeitungsgebiete zusammenhängend bearbeitet werden. Die Bildung von Teilbearbeitungsgebieten kann nicht nur bei Anhäufungen von Einzelflächen, sondern auch bei Großflächen sinnvoll sein. Insbesondere ist dies bei heterogenen hydrogeologischen Verhältnissen, insbesondere wenn sich getrennte Fahnen ausgebildet haben, der Fall. Das folgende Beispiel soll die Hintergründe und die Systematik verdeutlichen.

Beispiel

Es wurden PFAS-haltige Stoffe auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht. Dies führte zu einer Anhäufung vieler kontaminierter Einzelflächen. Die leicht mobilisierbaren PFAS-Einzelsubstanzen werden, ausgehend von der Schadstoffquelle in der oberen Bodenschicht, durch versickerndes Niederschlagswasser gelöst und in tiefere Bodenschichten verfrachtet. Mit zunehmender Kettenlänge erfolgt die Verfrachtung verzögert. Mit einer durchschnittlichen Grundwasserneubildungsrate von im Beispielfall rund 300 bis 400 mm/a sickert das Niederschlagswasser (Sickerwasser) durch die ungesättigte Bodenschicht. Das belastete Sickerwasser trifft auf das Grundwasser und vermischt sich mit diesem. Abbildung 10 zeigt ein Schema dieser beispielhaften Situation.

Abbildung 10 Beispielhaftes Schema zum Einmischverhalten der PFAS in den Grundwasserleiter



Quelle: Arcadis Germany GmbH, 2019

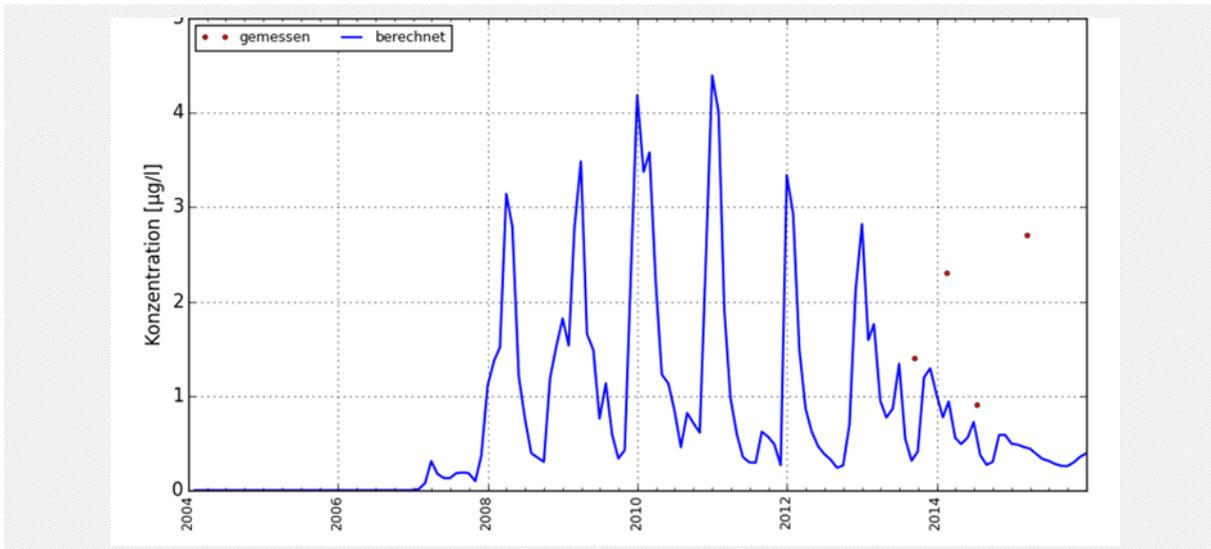
Die Menge des belasteten Sickerwassers schwankt in zeitlicher Abhängigkeit von der Menge des versickernden Niederschlages. Sie hängt wesentlich von der jahreszeitlichen Niederschlagsmenge, der Verdunstung und der Wasseraufnahme durch Pflanzen ab. Bei landwirtschaftlichen Flächen kann im Sommer mitunter die gesamte Niederschlagsmenge aufgenommen (evapotranspiriert) werden. Nach der Ernte wiederum kann die Wasseraufnahme der Pflanzen ganz entfallen. Dies hängt von der Art der angebauten Pflanzen ab. Hierzu addiert sich die geringe Verdunstung im Winter. In den Wintermonaten ist deshalb die versickernde Niederschlagsmenge am größten.

In Abbildung 11 ist ein realer Fall dargestellt. Hier wurde mit einem Grundwassermodell der Schadstoffeintrag aus einer Einzelfläche in das Grundwasser simuliert. Im Winter ist der Schadstoffeintrag am größten, in den Sommermonaten am niedrigsten. Das Abklingen im Jahr 2015 ist nicht auf einen ausklingenden Schadstoffaustrag zurückzuführen, sondern meteorologisch bedingt.

Das Grundwasser fließt in diesem Beispiel mit einer (Abstands-)Geschwindigkeit von rund 1 m/d. Die Retardation (Rückhalt) der PFAS im sandig-kiesigen Grundwasserleiter ist sehr gering. Nach hundert Tagen ist grob abgeschätzt zu erwarten, dass die Schadstoffe circa 30 bis 100 m weit abgeströmt sind. Die Flächengrößen betragen im Beispielfall rund 1 Hektar. Wenn nun eine Fläche im Abstrom von anderen belasteten Flächen liegt, ist es in der Regel nicht möglich, mit verhältnismäßigem Aufwand den exakten Anteil des Schadstoffeintrages aus der betrachteten Fläche in das Grundwasser durch Vergleiche der Zu- und Abstromkonzentrationen zu bestimmen.

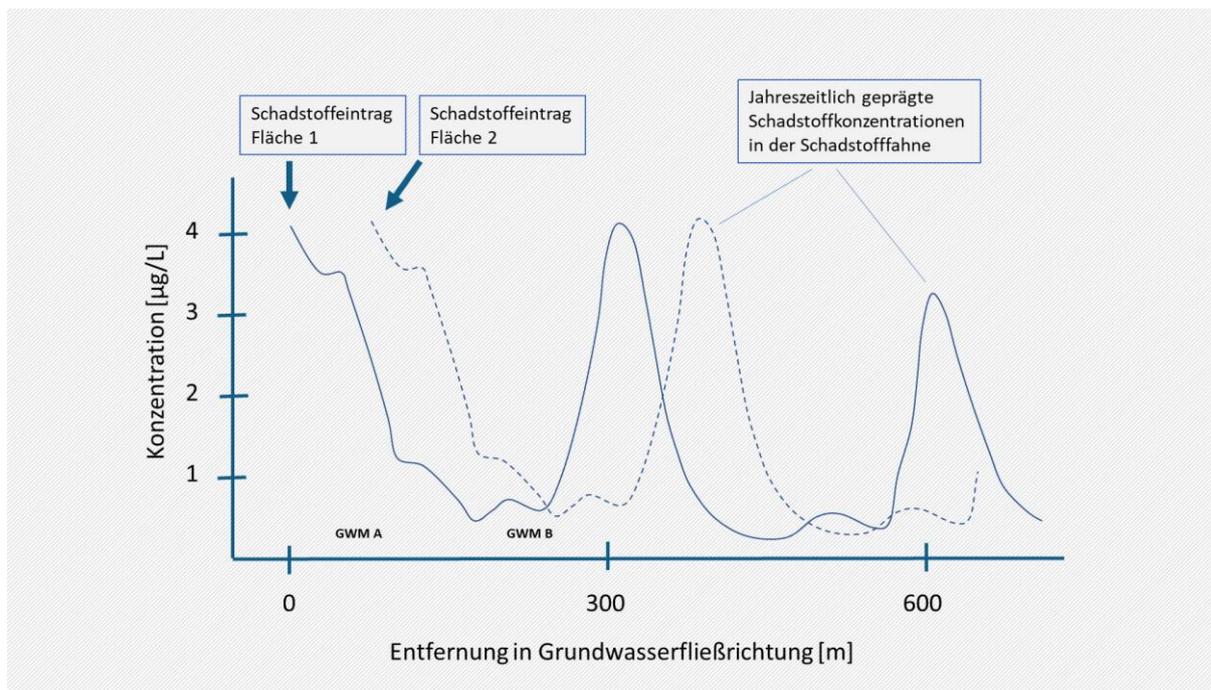
Dieses verdeutlicht das in Abbildung 12 gezeigte Schema. Hier wird erkennbar, dass es bei Einzelerkundungen zu der scheinbar paradoxen Situation kommen kann, dass trotz eines Schadstoffeintrages aus einer Fläche, die Zustromkonzentration zu dieser höher sein kann als die Abstromkonzentration. Wie oben bereits erwähnt, ist diese Situation in Abbildung 12 unter Berücksichtigung eines Retardationsfaktors von 3 (z.B. für PFOA) dargestellt. In dem Beispiel würde die Grundwasserkonzentration in GWM A im Zustrom von Fläche 2 bei 3,5 und in GWM B im Abstrom von Fläche 2 bei 1,5 µg/L liegen.

Abbildung 11 Reale Beispiel für einen jahreszeitabhängigen, modellierten PFOA-Eintrag aus einer Einzelfläche in das Grundwasser



Quelle: Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH

Abbildung 12 Schematische Konzentrationsverläufe zweier sich überlagernder Schadstofffahnen



Quelle: Arcadis Germany GmbH; 2019

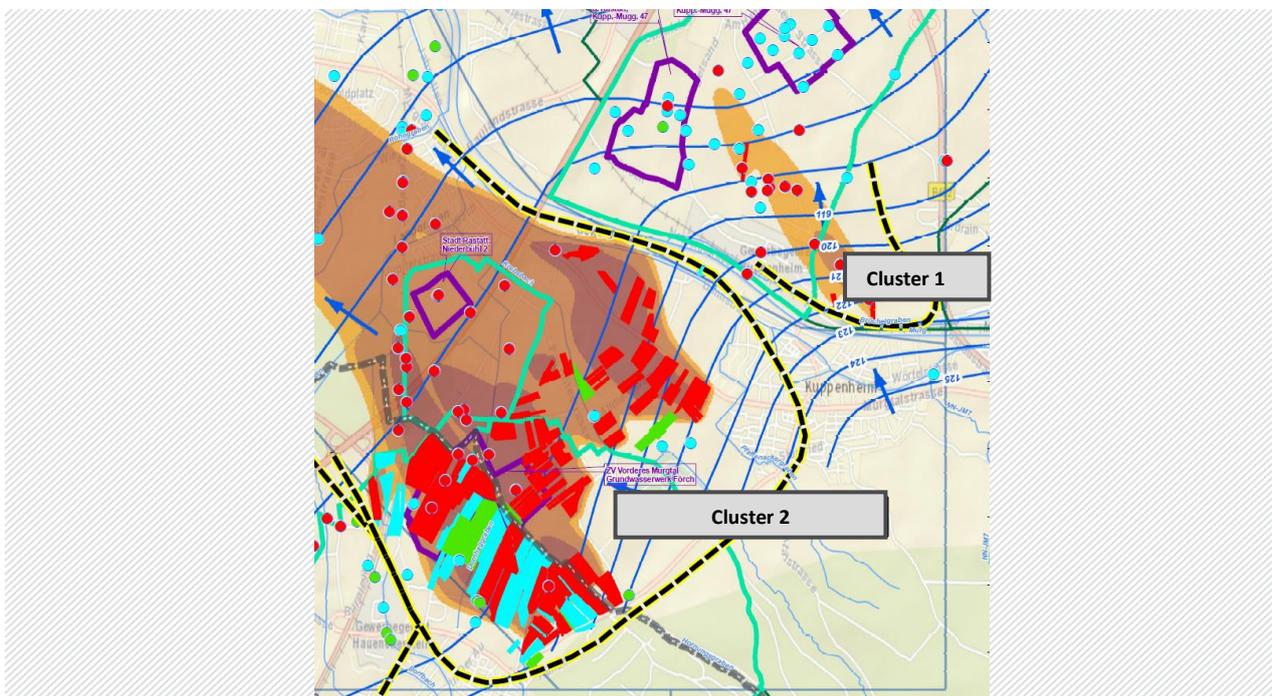
Das Beispiel einer relativ einfachen Situation mit nur zwei Flächen verdeutlicht die Problematik einer Einzelerkundung. Zwar wäre der Schadstoffeintrag grundsätzlich mit Grundwasseruntersuchungen ermittelbar, jedoch wären hierzu engmaschige und langjährige Untersuchungen erforderlich. Außerdem können sich aus einzelnen Einzelflächen abklingende und aus anderen zunehmende Schadstoffeinträge ergeben, die die Auswertungen zusätzlich erschweren würden.

In dem Beispielfall wurde schließlich festgestellt, dass eine Zuordnung der einzelnen PFAS-Beiträge der Belastungsflächen zu einer Schadstofffahne mit verhältnismäßigem Aufwand nicht möglich ist. Es bestand somit die Notwendigkeit, Einzelflächen zu Schadensbereichen (Flächencluster) zusammenzufassen, wenn diese durch Überlagerung der abströmenden Schadstoffe eine gemeinsame Schadstofffahne bilden.

Beispiel Ende

Grundwassermodellierung. Als Hilfsmittel zur Zusammenfassung bzw. Abgrenzung von Schadensbereichen (Flächencluster, Abbildung 13) als Teilbearbeitungsgebiete eignen sich Grundwassermodelle. Als vorteilhaft hat es sich erwiesen, die Ausbreitung des neu gebildeten Grundwassers, das als Niederschlag die belasteten Flächen durchströmt hat, über einen längeren Zeitraum (zum Beispiel 10 Jahre) instationär zu simulieren. Die tatsächliche Ausbreitung der Schadstofffahnen erfolgt dagegen in der Regel retardiert und somit langsamer. Mit dieser Art der modellhaften Darstellung ist es möglich, die zukünftigen Wege und Überlagerungen der Einzelfahnen abzubilden und Flächencluster bzw. Teilbearbeitungsgebiete abgrenzen.

Abbildung 13 Beispiel für die Abgrenzung eines Flächenclusters und Teilbearbeitungsgebietes



Quelle: Arcadis Germany GmbH; 2019

Priorisierung. Die letztlich abgegrenzten Teilbearbeitungsgebiete können priorisiert werden. Zu den Priorisierungsverfahren gibt es in einigen Ländern fachliche Vorgaben. Eine Priorisierung hat bei großflächigen Verunreinigungen den Vorteil, dass gezielt solche Teilbearbeitungsgebiete als erste bearbeitet werden, die eine hohe Betroffenheit auslösen. Die Priorisierung kann sich an betroffenen Wassernutzungen, abgeschätzten Schadstofffrachten im Grundwasser, landwirtschaftlichen Nutzungen, o.ä. ausrichten.

Bei sehr großräumigen Teilbearbeitungsgebieten wird in vielen Fällen eine Priorisierung obligatorisch sein, weil eine gleichzeitige Bearbeitung aller Teilbearbeitungsgebiete durch die verantwortlichen Behörden und Fachleuten personell oft nicht leistbar ist. Außerdem können bei einem abgestuften Vorgehen Erfahrungen und Informationen über Hydrogeologie, Stoffeigenschaften etc. in die jeweils folgenden Erkundungen einfließen.

Sanierungskonzeption. Auf die Orientierende Untersuchung folgt nach die im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vorgegebene Detailuntersuchung. Von der Systematik und einer Detailuntersuchung darf abgesehen werden, wenn die von schädlichen Bodenveränderungen ausgehenden Gefahren mit einfachen Mitteln abgewehrt oder sonst beseitigt werden können. Es hat sich bei den großflächigen Bodenverunreinigungen als hilfreich erwiesen, schon vor Beginn der Detailuntersuchung zu prüfen, ob dies möglich ist. Es ist oft schon zu einem frühen Zeitpunkt offensichtlich, dass, formal gesehen, aufgrund der sehr großen flächenhaften Ausdehnung oder der Betroffenheit von wichtigen Trinkwassergewinnungsanlagen ein Sanierungsbedarf besteht. Vor dem Hintergrund möglicher weiterer Gefährdungen durch Zeitverzug und dem öffentlichen Interesse an einer raschen Lösung wird mitunter bereits zu diesem Zeitpunkt, zur Vermeidung einer unangemessenen Verzögerung einer Sanierung, eine Sanierungskonzeption durchgeführt. Dies erfolgt somit noch während der Orientierenden Untersuchung von Einzelflächen, aber zu einem Zeitpunkt, an dem bereits eine ausreichende Datengrundlage für die Sanierungskonzeption vorliegt. Die Sanierungskonzeption umfasst im Wesentlichen folgende Punkte:

- ▶ grundsätzliche Sanierungsüberlegungen,
- ▶ gesamtanschauliche Darstellung der vorliegenden Messergebnisse mit Frachtbetrachtungen,
- ▶ Bewertung der Situation mit Blick auf besondere Schutzbereiche (z.B. Wasserversorgungsanlagen) und
- ▶ Bewertung von Sanierungsmöglichkeiten vor dem Hintergrund örtlicher Zwangspunkte und Kosten.

Mit den Ergebnissen der Sanierungskonzeption wird geprüft, ob eine rasche technische Lösung oder vorgezogene Hotspot-Sanierungen möglich bzw. fachlich vertretbar sind. Die Sanierungskonzeption wird in der folgenden Bearbeitungsphase der Detailuntersuchung fortgeschrieben und fließt in die Sanierungsuntersuchung ein.

Orientierende Untersuchung, integrale Untersuchung und Bewertung

Bei flächenhaften PFAS-Kontaminationen ist eine integrale Herangehensweise und die Bildung von Teilbearbeitungsgebieten sinnvoll, insbesondere dann, wenn Schadstofffahnen voneinander abgegrenzt werden können.

Eine Priorisierung der Bearbeitungsgebiete sollte erfolgen, wenn in einigen Gebieten eine besondere Betroffenheit vorliegt.

Durch eine Sanierungskonzeption schon vor der Detailuntersuchung wird geprüft, ob eine vorgezogene Sanierung möglich oder vertretbar ist.

4.2.3 Integrale Detailuntersuchung von Teilbearbeitungsgebieten

Die Detailuntersuchung selbst erfolgt integral für die jeweiligen Teilbearbeitungsgebiete. Es sind bei der Detailuntersuchung repräsentative Daten zu erheben:

- ▶ Wirkungspfad Boden → Pflanze.
 - Erhebung, welche Pflanzenarten und -sorten realistischerweise innerhalb der nächsten Jahre angebaut werden dürften. In der Regel erfolgt hierzu eine Einbindung der Landwirtschaftsämter.
 - Beurteilung des Anreicherungsvermögens dieser Pflanzenarten. Hierzu erfolgt ebenfalls eine Einbindung der Landwirtschaftsämter.
- ▶ Wirkungspfad Boden → Grundwasser. Die Ergebnisse der Untersuchung sollen gewährleisten,
 - eine abschließende Gefährdungsabschätzung durchführen zu können,
 - die räumliche Schadstoffverteilung im Boden und Grundwasser so umfangreich und detailliert wie erforderlich beschreiben zu können,
 - die räumlich-zeitliche Ausbreitung der Schadstoffe vom Schadensherd im Grundwasser bis zum Schutzgut beschreiben zu können und
 - ein vollständiges konzeptionelles Standortmodell aufstellen zu können. Das konzeptionelle Standortmodell beschreibt die Schadstoffausbreitung vom Schadensherd bis zu den betroffenen Schutzgütern.
- ▶ Wirkungspfad Boden → Mensch.
 - Erhebung von Daten, um eine mögliche Gefährdung abschließend beurteilen zu können.

Die Grundwasserverunreinigungen sind zu Beginn der Detailuntersuchung in der Regel noch nicht exakt abgegrenzt. Nach Abschluss der integralen Detailuntersuchung muss es, neben einer Erfüllung der in der BBodSchV genannten Anforderungen an eine Detailuntersuchung, für das Teilbearbeitungsgebiet möglich sein, modellgestützt die Anteile der Einzelflächen an der Gesamtbelastung zuordnen zu können. Außerdem müssen ausreichend Daten vorliegen, um die Ausbreitung der Grundwasserbelastung im Grundwasserleiter dreidimensional prognostizieren zu können.

Integrale Detailuntersuchung von Teilbearbeitungsgebieten

Ziel der integralen Detailuntersuchung ist es insbesondere, die Grundlagen für eine modelgestützte Analyse der Anteile der Einzelflächen an der Gesamtbelastung zu schaffen. Außerdem müssen ausreichende Daten erarbeitet werden, um die Ausbreitung der Grundwasserbelastung im Grundwasserleiter dreidimensional prognostizieren und eine Bewertung der Beeinträchtigung der Rezeptoren entlang der relevanten Wirkungspfade vornehmen zu können.

4.2.4 Integrale Sanierungsuntersuchung für Teilbearbeitungsgebiete

Bei der anschließenden Sanierungsuntersuchung wird die Sanierungskonzeption mit den Ergebnissen der Detailuntersuchung ergänzt. Ansonsten erfolgt die Sanierungsuntersuchung gemäß den Vorgaben der BBodSchV. Gegebenenfalls zu berücksichtigen und zu bearbeiten sind:

- ▶ Empfehlungen zu Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen,
- ▶ Empfehlungen zu Monitoringkonzepten,
- ▶ Empfehlungen zum Umgang mit belastetem Aushubmaterial bei Baumaßnahmen, sofern eine Aushubmaßnahme als Sanierung geplant ist und
- ▶ modellgestützte Betrachtung und abgestufte Darstellung, mit welchem Sanierungsumfang welche Entfrachtung erreicht werden könnte. Die Bezugsebene kann, zusätzlich zu dem üblichen Vorgehen, auf die hauptsächlichen Betroffenen (Wasserwerk, etc.) erweitert werden.
- ▶ Wenn eine Gesamtsanierung aufgrund der Größe der Belastung nach den Vorgaben des BBodSchG unverhältnismäßig wäre, soll geprüft werden, ob nicht Teilmaßnahmen eine Verringerung der Schadstofffrachten ermöglichen können.
- ▶ Berücksichtigung der Schadstofffrachten im Hinblick auf die Nutzung des Grundwassers zu Bewässerungszwecken (siehe auch Kapitel 4.4).

Die Sanierungsuntersuchung soll soweit ausgearbeitet sein, dass diese die Grundlage für eine Verhältnismäßigkeitsprüfung bilden kann, in dessen Ergebnis möglicherweise Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen erlassen werden. Die Verhältnismäßigkeitsprüfung muss einzelfallbezogen durchgeführt werden.

4.2.5 Integraler Sanierungsplan für Teilbearbeitungsgebiete

Wenn eine gesamtheitliche Sanierung oder Teilmaßnahmen durchgeführt werden sollen, ist ein Sanierungsplan aufzustellen. Ein Sanierungsplan kann neben der gesamtheitlichen Sanierung auch Maßnahmen beschreiben, die zukünftig zu einer Verbesserung des Gesamtzustandes innerhalb eines Teilbearbeitungsgebietes führen. Innerhalb des Sanierungsplans können auch Rahmenbedingungen für den Umgang mit Böden bei zukünftigen Aushub- oder Verfüllungsmaßnahmen definiert werden, mit denen der Gesamtzustand innerhalb des Teilbearbeitungsgebietes verbessert werden soll.

Zu der praktischen Umsetzung von Sanierungsplänen von sehr großflächigen schädlichen Bodenveränderungen gibt es derzeit keine praktischen Erfahrungen. Problematisch wird die Vielzahl von Zustandsstörern sein, sodass die Behörde wahrscheinlich den Sanierungsplan und auch die Sanierung übernehmen muss. Obwohl dies nach BBodSchG prinzipiell möglich ist, hat der Gesetzgeber bei der Ausgestaltung des Gesetzes nicht das Ausmaß der flächigen PFAS-Kontaminationen mit den diskutierten Konsequenzen kennen können. Bei zukünftigen Novellierungen des BBodSchG oder der BBodSchV sind aus Sicht der Verfasser zusätzliche Regelungen zu integralen Ansätzen bei der Bearbeitung der schädlichen Bodenveränderungen sinnvoll.

Integraler Sanierungsplan für Teilbearbeitungsgebiete

Zu der praktischen Umsetzung von Sanierungsplänen von sehr großflächigen schädlichen Bodenveränderungen gibt es derzeit keine praktischen Erfahrungen. Bei zukünftigen Novellierungen des BBodSchG oder der BBodSchV sind aus Sicht der Verfasser zusätzliche Regelungen zu integralen Ansätzen bei der Bearbeitung der schädlichen Bodenveränderungen sinnvoll.

4.2.6 Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen (als Sofortmaßnahmen)

Unter Berücksichtigung der Persistenz der PFAS kann z. B. eine Bewässerung mit PFAS-belastetem Grundwasser zu einer Verunreinigung von Boden führen. Zudem können Viehtränken oder Bewässerung mit verunreinigtem Wasser zu einer Schadstoffbelastung von Nutztieren oder Feldfrüchten führen. Für diesen Fall wären auch Belange der Landwirtschaft und des Gesundheitsschutzes betroffen, die berücksichtigt werden müssen. Die Verwertung von PFAS-belastetem Mahdgut oder Pflanzenresten aus der Landwirtschaft und Hausgärten sowie Auffüllungen mit belastetem Bodenmaterial können zu Verunreinigungen von Boden führen und ebenfalls den vorsorgenden Bodenschutz nach §10 BBodSchG betreffen.

Dies bedeutet, dass schon während der Untersuchungen des Standortes, teilweise schon in frühen Untersuchungsphasen es erforderlich werden kann, Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen als Sofortmaßnahmen zu treffen oder diese auf freiwilliger Basis mit den jeweils Verantwortlichen zu vereinbaren. Die Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen können auch temporär sein und die Zeitdauer bis zur Sanierung überbrücken. Sie können zum Beispiel

- ▶ die Nutzung von verunreinigtem Grundwasser,
- ▶ die Verwertung von Mahdgut oder Pflanzenresten aus der Landwirtschaft,
- ▶ den Umgang mit Bodenmaterial aus großflächigen Verdachtsbereichen und die
- ▶ Beschränkung des landwirtschaftlichen Anbaus auf bestimmte, nicht PFAS-anreichernde Feldfrüchte (so genanntes Vorerntemonitoring)

regeln. Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen zielen entweder auf die Gefahrenabwehr ab oder setzen den vorsorgenden Bodenschutz um. Materielle Vorsorgeanforderungen in Form von Vorsorgewerten sind für PFAS in der BBodSchV nicht enthalten. Nach § 10 Abs. 2 BBodSchV sind Einträge von Schadstoffen im Sinne des § 9 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2, für die keine Vorsorgewerte festgesetzt sind, zu begrenzen. Die Voraussetzung des § 9 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 ist dann gegeben, wenn eine erhebliche Anreicherung von Schadstoffen erfolgt, die auf Grund ihrer krebserzeugenden, erbgutverändernden, fortpflanzungsgefährdenden oder toxischen Eigenschaften in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Bodenveränderungen herbeizuführen. Diese Voraussetzungen treffen auf PFAS zu. Besonders langkettige PFAS haben die Eigenschaft, sich in Böden anzureichern. Daher ist eine Allgemeinverfügung zur Untersagung der Grundwasserförderung und -nutzung zu Bewässerungszwecken mit der Durchsetzung des vorsorgenden Bodenschutzes auch ohne Vorliegen von PFAS-Vorsorgewerten begründbar.

Gemäß § 10 Abs. 1 BBodSchG kann die zuständige Behörde zur Erfüllung der sich aus § 4 Abs. 2 BBodSchG und § 7 BBodSchG ergebenden Pflichten die notwendigen Maßnahmen treffen. Ob demnach im konkreten Fall eine Allgemeinverfügung erlassen wird, unterliegt dem Entschließungsermessen der zuständigen Behörden und wird vor allem auch von dem Grad der Grundbelastung abhängig sein.

Die Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen können formal auch durch präventive Nutzungseinschränkungen durch die für die Fläche Zuständigen, wie beispielsweise bei Bundesliegenschaften (z.B. Kapitel 8 im PFC-Leitfaden für Liegenschaften des Bundes 2018) umgesetzt werden.

Eine freiwillige und kooperative Vereinbarung mit den jeweiligen Verantwortlichen ist anzustreben. Dies verlangt von den Behörden ein stärkeres Engagement und wird wahrscheinlich personelle Ressourcen binden, hilft aber andererseits beim Vollzug. Sollten keine freiwilligen Vereinbarungen getroffen werden, kann sich die Schwierigkeit ergeben, dass derzeit für viele Beurteilungsfälle rechtlich fixierte Vorsorgewerte fehlen. Diese sind dann für den Einzelfall abzuleiten.

Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen (als Sofortmaßnahmen)

Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen können zu einem frühen Zeitpunkt schon während der Untersuchungen oder Planungen festgelegt werden. Ziel ist es, zeitnah zu reagieren und den Zeitraum bis zur Sanierung zu überbrücken. Die Sofortmaßnahmen können auf eine Gefahrenabwehr abzielen oder im Einzelfall zudem den vorsorgenden Bodenschutz umsetzen (z.B. Verbot der Nutzung von PFAS-belastetem Grundwasser zu Bewässerungszwecken, um Vorsorge gegen das Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung zu betreiben). Es sind freiwillige und kooperative Vereinbarung mit den jeweiligen Verantwortlichen anzustreben.

4.3 Management bei PFAS-Einwirkung auf Grund- und Oberflächenwassernutzungen (Wirkungspfad Boden → Gewässer)

Bei flächenhaften PFAS-Kontaminationen haben sich in den meisten Fällen schon größere Schadstofffahnen ausgebildet. Zu Beginn der Standortbearbeitung werden zu der Belastungssituation allerdings erst wenige Daten vorliegen. Es empfiehlt sich deshalb, schon zu einem frühen Zeitpunkt ein hydraulisches Grundwassermodell einzurichten, mit dem die möglichen Ausbreitungswege simuliert werden können. Auf Basis des Modells werden dann gezielt Grundwassermessstellen zur Erkundung geplant und das Modell entsprechend des Erkenntniszuwachses fortgeschrieben (vgl. Kapitel 4.2).

Mit Hilfe des hydraulischen Modells sind auch zu einem frühen Zeitpunkt mögliche betroffene Grundwasserbereiche und damit verbunden, die mögliche Betroffenheit von Grundwassernutzungen, z. B. Trinkwassergewinnungen, Fischzuchten, Brauchwassernutzungen, Bewässerungsbrunnen, etc. zu identifizieren. Die zuständigen Behörden (Kapitel 2.4) und Nutzer sind zu informieren. Es ist sicherzustellen, dass bei den Nutzungen regelmäßige Messungen zur Belastungssituation stattfinden.

Gegebenenfalls können Nutzungsbeschränkungen oder -verbote als Sofortmaßnahmen angeordnet werden (Kapitel 4.2.6).

Betroffene Gewässer mit Vorflutfunktion sind zu berücksichtigen und mit in die Untersuchungen aufzunehmen. Über belastete Gewässer können an anderer Stelle lateral oder auch vertikal andere Grundwasserbereiche betroffen sein. Auch ist es möglich, dass über den belasteten Vorfluter an anderer Stelle weitere Nutzungen (z.B. bachgespeiste Fischzuchten, Fischereigewässer, Trinkwassergewinnungen) betroffen sein können.

Eine Betroffenheit bei der Trinkwassergewinnung durch PFAS-Kontaminationen führt in der Regel zu einer hohen Priorität der Bearbeitung der schädlichen Bodenveränderung. Gleichzeitig aber ist der Betreiber der Grundwassernutzung (hier der Betreiber des Wasserwerkes) für die ordnungsgemäße Qualität seines Produktes verantwortlich und muss dazu die erforderlichen Maßnahmen treffen. Der betroffene Betreiber hat gegebenenfalls die Möglichkeit, Forderungen hinsichtlich des erlittenen Schadens gegenüber dem Verursacher (Störer) zivilrechtlich geltend zu machen.

Die für die Bearbeitung der schädlichen Bodenveränderung zuständige Behörde bearbeitet den Fall nach den Vorgaben des nachsorgenden Bodenschutzes gemäß den Vorgaben des BBodSchG, der BBodSchV und des WHG. Dies betrifft entsprechend auch betroffene Oberflächenwassernutzungen, wie Fischzuchten, oder gewerbliche Nutzungen als Prozess- oder Kühlwasser, etc. als betroffene Schutzgüter.

Die Bodenschutzbehörde hat, ungeachtet ihrer Aufgaben und Handlungsverpflichtungen, den Informationsfluss zu den betroffenen Nutzern und auch zu den zuständigen Behörden sicherzustellen (Kapitel 2.4). Wenn viele Behörden zuständig sind, hat sich die Einrichtung einer Koordinationsstelle bewährt. Diese Aufgabe kann auch bei der übergeordneten Behörde angesiedelt werden.

Management bei PFAS-Einwirkung auf Grund- und Oberflächenwassernutzungen

Schon in einer frühen Phase der Bearbeitung sind potenziell betroffene Nutzungen zu identifizieren und diese zu untersuchen.

Die Bodenschutzbehörde hat den Informationsfluss zu den Nutzern und auch zu den zuständigen Behörden sicherzustellen. Wenn viele Behörden betroffen sind, hat sich die Einrichtung einer Koordinationsstelle bewährt.

4.4 Management bei PFAS-Einwirkung auf Nutzpflanzen (Wirkungspfad Boden → Pflanze)

Es ist bekannt, dass PFAS in verschiedenen Pflanzenteilen angereichert werden. Dies betrifft auch die Feldfrüchte, die in Verkehr gebracht werden sollen. Derzeit erfolgen intensive Anstrengungen in der Forschung¹⁰, um die Prozesse zu verstehen und für die PFAS-Aufnahme unempfindliche Nutzpflanzen zu identifizieren. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten werden in der Zukunft mit verbindlichen Vorgaben ergänzt werden müssen. Die fortlaufende Entwicklung ist beim Sanierungsmanagement zu berücksichtigen.

Nach bisherigen Ergebnissen der Gefäß- und Freilandversuche des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums Augustenberg (LTZ) (RP KA, 2018a) haben die ersten Versuchsergebnisse gezeigt, dass es bei der Aufnahme von PFAS insbesondere in generative Pflanzenteile, also z.B. Blüte, Samen, Früchte zwischen den verschiedenen Pflanzenarten große Unterschiede gibt. Dies haben auch die Ergebnisse der zeitlich vorgelagerten Untersuchung des Ernteguts, dem so genannten Vorernte-Monitoring (VEM) bestätigt. Ein geringer Transfer von PFAS in generative Pflanzenteile erfolgt bei Körnermais, Wintergerste, Winterroggen, Körnerraps, Erdbeeren und Spargel. Ein deutlich stärkerer Transfer von PFAS in das Erntegut ist bei Weizen, Triticale und Soja zu beobachten, sowie bei Kulturen, bei denen die vegetativen Pflanzenteile, also Blätter, Triebe und Wurzeln genutzt werden, wie etwa Silomais, Ackerfutter oder Gras.

Vom LTZ wurde zudem die Aufnahme von PFAS in typische Energiepflanzen wie *Miscanthus* und Durchwachsene Silphie geprüft, um herauszufinden, ob solche Kulturen eine Nutzungsmöglichkeit für mäßig belastete Anbauflächen sein könnten. Die Ergebnisse waren zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht veröffentlicht.

Bei den flächenhaften PFAS-Kontaminationen in Baden-Württemberg sind vorwiegend landwirtschaftliche Nutzflächen betroffen. Die Behörden haben daraufhin veranlasst, zeitlich vorgelagert das Erntegut vor der Ernte zu untersuchen (so genanntes Vorerntemonitoring). Die Landwirte wissen dann vor der Ernte sicher, ob sie die Feldfrüchte in Verkehr bringen dürfen. So wird das Kostenrisiko minimiert und die Lebensmittelsicherheit erhöht. Zusätzlich steigt das Vertrauen der Käufer, die quasi „qualitäts-gesicherten“ Feldfrüchte aus einem PFAS – belastetem Gebiet konsumieren zu können.

Für kurzkettinge PFAS in Lebensmitteln, die im Vergleich zu langkettigen PFAS bevorzugt in Pflanzen eingelagert werden, gibt es bis dato weltweit keine toxikologisch abgeleiteten Grenzwerte. Daher hatte das Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg für diese Verbindungen übergangs- und hilfsweise lebensmittelrechtliche Beurteilungswerte unter Berücksichtigung der Erkenntnisse des Umweltbundesamtes zum Trinkwasser festgelegt.

¹⁰ Unter anderem wird hierzu seit 2019 ein durch das Umweltbundesamt gefördertes Forschungsvorhaben durchgeführt.

Lebensmittel, deren Gehalte an kurzkettigen PFAS analytisch gesichert über den Beurteilungswerten liegen, sind nicht verkehrsfähig. Solche Erzeugnisse dürfen zum Schutz des Verbrauchers nicht vermarktet werden (RP KA, 2017).

Beobachtungen aus dem Vorerntemonitoring zufolge haben die Behörden Empfehlungen für den Anbau abgeleitet und den Landwirten mitgeteilt (RP KA, 2018b).

Es wird nach (RP KA, 2018a) angestrebt, gemeinsam mit jedem Betrieb ein spezifisches Bewirtschaftungs- und Minimierungskonzept (BeMiKo) zu erarbeiten. Dieses beinhaltet im Wesentlichen, dass auf der Basis der Anbauempfehlungen, bis auf die einzelnen landwirtschaftlichen Schläge heruntergebrochen, Fruchtfolgen geplant werden, welche den Anbau PFAS-anreicherender Kulturen auf Böden mit PFAS-Gehalten vermeiden. Grundlage des BeMiKo ist also die Anbauempfehlung, welche aus der Kombination der PFAS-Gehalte im Boden und dem Aufnahmeverhalten der jeweiligen Kultur eine Minimierung der PFAS-Gehalte in der Nutzpflanze bezweckt.

Unabhängig davon, dass das Grundwasser nicht eigentumsfähig ist, kann eine PFAS-Grundwasserverunreinigung unterhalb von unbelasteten oder auch belasteten Ackerflächen ein großes Problem für Landwirte darstellen. Übliche landwirtschaftliche Praxis in einigen Regionen ist die ortsnahe Entnahme von Beregnungswasser aus dem Grundwasserleiter. Durch die Bewässerung mit kontaminiertem Grundwasser kann zum einen der unbelastete Boden kontaminiert werden. Zum anderen hat sich in vielen Fällen gezeigt, dass die PFAS aus Beregnungswasser bevorzugt von den Pflanzen aufgenommen werden. Besonders betrifft dies Gewächshauskulturen. Bei den PFAS-Kontaminationen können die Behörden Vorgaben für solche Beregnung machen (RP KA, 2018c). Diese Regelung *„muss sowohl dem Schutzzweck dienen als auch den Wasseransprüchen der Pflanzen hinreichend genügen und so flexibel sein, dass neue Erkenntnisse zu PFAS in den kommenden Jahren Berücksichtigung finden können. Je nach Kultur können auch geringste PFAS-Gehalte im Boden oder im Beregnungswasser in die Erzeugnisse eingelagert werden und zu Überschreitungen der Beurteilungswerte führen (Wirkungspfad Boden → Pflanze). Zusätzlich sind die Auswirkungen auf den Boden und das Grundwasser zu minimieren (Wirkungspfad Boden → Grundwasser).“*

Nach den Vorgaben der Behörden (RP KA, 2018c) sind vorhandene Erkenntnisse, insbesondere über den Transfer kurzkettiger PFAS über das Bewässerungswasser oder aus belasteten Böden in die Pflanzen, zu beachten. So hat sich beispielsweise in einem Vorerntemonitoring gezeigt, dass sehr wasser- und eiweißhaltige Kulturen, wie z.B. Tomaten, Zucchini, Melonen und Bohnen vor allem die im Bewässerungswasser enthaltenen PFAS sehr gut aufnehmen und aufkonzentrieren. Dennoch gibt es hier noch einen erheblichen Forschungsbedarf um offene Fragen abschließend beantworten zu können.

In Zweifelsfällen soll von einer Beregnung mit PFAS-haltigem Wasser abgesehen werden. Die Bewässerung ist auf den Bedarf der Pflanzen abzustimmen. Eine Versickerung von Bewässerungswasser ist unter Beachtung der guten fachlichen Praxis zu vermeiden. Die Bewässerungswassermenge ist durch die Wahl geeigneter Bewässerungsverfahren zu minimieren.

PFAS-haltige Pflanzenteile, die die Bewirtschaftungsfläche verlassen, müssen als Abfall entsorgt werden. Deshalb werden diese oft auf den Äckern belassen. Prinzipiell könnte die Anreicherung der PFAS in Pflanzen und deren Entsorgung auch zum Abreichern der PFAS in Böden dienen. Dazu müssten allerdings die Anreicherungsraten in den Pflanzen entsprechend groß sein. Dies ist nach derzeitigem Kenntnisstand jedoch nicht der Fall (vgl. Anhang A und C).

Wenn das Grundwasser nicht zur Bewässerung verwendet werden kann, muss entweder eine andere Kultur angebaut oder die Wasserversorgung umgestellt werden. Letzteres führt häufig zu weiteren Schwierigkeiten. Eine Grundwasserreinigung ist in der Regel unwirtschaftlich, eine Versorgung mit Trinkwasser scheitert meist an hygienischen Vorgaben an das Leitungsnetz, auch wenn es nur zur Bewässerung dient.

Versorgungsverbände (Ringleitungen etc.) sind nur möglich, wenn in der weiteren Umgebung überhaupt unbelastetes Grundwasser vorhanden ist. Deshalb ist es sinnvoll, diese Auswirkung der Schadstoffahne bei der Sanierungsuntersuchung zu berücksichtigen.

Management bei PFAS-Einwirkung auf Nutzpflanzen

Für kurzkettenige PFAS wurden in Baden-Württemberg Übergangs- und hilfsweise lebensmittelrechtliche Beurteilungswerte festgelegt. Überschreiten Lebensmittel diese Werte, sind sie nicht verkehrsfähig. Werden PFAS-belastete Böden landwirtschaftlich genutzt, ist eine zeitlich vorgelagerte Untersuchung des Erntegutes vor der Ernte erforderlich (so genanntes Vorerntemonitoring). Die Landwirte wissen dann vor der Ernte sicher, ob sie die Feldfrüchte in Verkehr bringen dürfen. Das Kostenrisiko wird so minimiert und die Lebensmittelsicherheit erhöht.

Zusätzlich steigt das Vertrauen der Käufer, dass unbedenklich Feldfrüchte aus einem Gebiet mit PFAS-Belastungen konsumiert werden können.

Zuverlässige Transferfaktoren, mit denen die Belastung der Pflanzen anhand der Belastung des Bodens berechnet werden kann, werden voraussichtlich in nächster Zukunft nicht zur Verfügung stehen.

Durch die Bewässerung mit kontaminiertem Grundwasser können PFAS aus dem Beregnungswasser in Pflanzen aufgenommen werden. Die Behörden sollten hier Vorgaben für die Beregnung bereitstellen.

4.5 Management bei PFAS-Einwirkung auf von Menschen genutzten Flächen (Wirkungspfad Boden → Mensch)

Derzeit gibt es noch keine Berechnungen für vorläufige Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden → Mensch (direkter Kontakt). An dieser Stelle besteht daher dringender weiterer Handlungsbedarf. Es existieren lediglich Abschätzungen, die bei Fachvorträgen präsentiert wurden. Demnach lägen die Werte im mg/kg-Bereich. Ob diese jedoch belastbar sind, muss, auch mit Blick auf die sich möglicherweise ändernden TDI-Werte, geprüft werden.

Prinzipiell könnten vorläufige Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden → Mensch (direkter Kontakt) abgeleitet werden, wenn die zur Herleitung der TDI-Werte (bzw. TWI-Werte) zu Grunde gelegten Sicherheitsfaktoren und Herleitungen offengelegt würden. Warum dies nicht der Fall ist, ist unklar. Selbst vorläufige Werte könnten im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen im Einzelfall helfen.

Der Kenntnisstand über die Toxikologie der einzelnen PFAS-Verbindungen differiert. Hier gibt es weiteren Forschungsbedarf. Für das Sanierungsmanagement bedeutet dies, dass die Entwicklung des Kenntnisstandes fortlaufend verfolgt werden muss.

Bei der Beurteilung des Wirkungspfades Boden → Mensch sind auch möglicherweise vorkommende Precursor zu beachten. Nach derzeitigem Stand ist es noch unklar, ob Precursor im menschlichen Körper resorbiert und zu toxischen PFAS umgesetzt werden können. Deshalb empfiehlt es sich, bei substanziellen Precursor-Gehalten die Resorptionsverfügbarkeit nach DIN 19738 zu prüfen. Mit dieser Norm ist ein Prüfsystem zur Mobilisierung von Schadstoffen aus kontaminierten Böden mit Hilfe synthetischer Verdauungssäfte standardisiert. Die nach der Oxidation der Precursor im TOP-Assay entstehenden perfluorierten Substanzen können für die toxikologische Sensitivitätsanalyse bzw. Sensitivitätsabschätzung verwendet werden.

Management bei PFAS-Einwirkung auf von Menschen genutzten Flächen (Wirkungspfad Boden → Mensch)

Für den Wirkungspfad Boden → Mensch existieren derzeit noch keine bodenschutzrechtlichen Prüf-werte. Hier gibt es dringend weiteren Handlungsbedarf. Beim Sanierungsmanagement ist die weitere Entwicklung zu verfolgen. Bei Beurteilungen dieses Wirkungspfades sind auch Precursor zu berücksichtigen.

4.6 Management bei PFAS-Einwirkung auf Hausgärten (Wirkungspfad Boden → Mensch)

Der Verzehr von selbst angebauten kontaminierten Gartenfrüchten oder Gemüse aus Hausgärten muss bei der Bewertung des Wirkungspfades Boden → Mensch mitberücksichtigt werden. Bei Unterschreitung der Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden → Pflanze wäre der Verzehr bedenkenlos möglich, derzeit gibt es jedoch keine Prüfwerte und diese sind auch zeitnah nicht zu erwarten (Kapitel 4.4).

Bei der Berücksichtigung des Gemüse- oder Fruchtanbaus in Hausgärten sind die tatsächliche und mögliche Bepflanzung zu berücksichtigen. Die Anreicherungsraten der einzelnen Gemüsearten und Früchte für die PFAS-Einzelsubstanzen sind jedoch sehr unterschiedlich.

Bei flächenhaften PFAS-Kontaminationen können jedoch Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, um zu prüfen, ob der Aufnahmepfad für ein flächenhaft kontaminiertes Gebiet relevant sein kann. Bei diesen Analysen kann auf vorliegende Daten bzw. Daten aus vergleichbaren Fällen zu den PFAS-Anreicherungen in den verzehrbaren Teilen der Gemüse oder Früchte zurückgegriffen werden. Bei der Auswahl der Daten ist weniger die Höhe der Bodenverunreinigung als die vergleichbare Zusammensetzung der PFAS wesentlich.

Eine Möglichkeit einer solchen Sensitivitätsanalyse ist zum Beispiel die Simulation eines Worst-Case-Szenarios, bei dem angenommen wird, dass ausschließlich die Gemüse und Früchte mit den höchsten Aufnahmeraten auf einer definierten, sehr großen Fläche angebaut und von den Bewohnern verzehrt werden. Die Verzehrraten können der jeweils aktuellen nationalen, im Internet veröffentlichten Verzehrstudie entnommen werden. Ernteerträge je Fläche und Vorgehensweisen sind vom LANUV (2014) beschrieben. Über eine solche Sensitivitätsanalyse kann ermittelt werden, ob und ggf. ab welcher Flächengröße eines Hausgartens der Aufnahmepfad über selbst angebautes Gemüse und Früchte im Einzelfall berücksichtigt werden muss. Die Bewertung selbst muss zwangsläufig über TDI- bzw. TWI-Werte erfolgen. Hier ergibt sich die gleiche Schwierigkeit, wie beim Wirkungspfad Boden → Mensch (direkter Kontakt) (Kapitel 4.6). Über die zur Herleitung der TDI-Werte (bzw. TWI-Werte) zu Grunde gelegten Sicherheitsfaktoren und Herleitungen könnte man die entsprechenden Werte ableiten.

Es gibt einen dringenden weiteren Handlungsbedarf, Werte für den Wirkungspfad Boden → Mensch abzuleiten. Über diese Werte könnten auch Hausgärten im Wirkungspfad Boden → Mensch beurteilt werden.

Bei Hausgärten ist zu berücksichtigen, dass eine hohe Aufnahmerate in Pflanzen durch das Bewässern mit PFAS-verunreinigtem Grundwasser erzeugt werden kann. Durch einen Verzicht oder ein Untersagen der Nutzung von Gartenbrunnen kann in diesem Fall eine wesentliche Verbesserung der Gesamtsituation im Wirkungspfad erzielt werden.

Management bei PFAS-Einwirkung auf Hausgärten

Es gibt einen dringenden weiteren Handlungsbedarf, Werte für den Wirkungspfad Boden → Mensch abzuleiten. Über diese Werte könnten auch Hausgärten im Wirkungspfad Boden → Mensch beurteilt werden.

Bei flächenhaften PFAS-Kontaminationen können Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, um zu prüfen, ob der Aufnahmepfad für ein flächenhaft kontaminiertes Gebiet relevant sein kann.

4.7 Management im Umgang mit PFAS-kontaminierten Böden

Die derzeit stark eingeschränkten und kostenintensiven Dekontaminations- oder Entsorgungsmöglichkeiten für PFAS-verunreinigte Böden erschweren sowohl Sanierungs- wie auch Entwicklungsmaßnahmen. Bei sehr großen, flächenhaften PFAS-Kontaminationen kann es zu einer Hemmung kommunaler Entwicklungen bei Erschließungsgebieten oder bei der Erweiterung gewerblicher Flächen kommen. Diese Hemmung kann in Abhängigkeit der Gebietsverhältnisse gegebenenfalls durch innergebietliche Regelungen zum Umgang mit verunreinigtem Erdaushub bzw. durch Bodenmanagementkonzepte aufgelöst werden. Unabhängig davon wird empfohlen, sich bei flächenhaften PFAS-Kontaminationen mittelfristig über die Schaffung von regionalen Entsorgungsmöglichkeiten Gedanken zu machen. Derzeit stehen Behandlungsmöglichkeiten oder ortsnahe Deponien in der Regel nicht zur Verfügung.

In einigen Fällen können Regelungen zum Umgang mit verunreinigtem Erdaushub auch eine positive Wirkung auf Sickerwasserfrachten entfalten. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn durch Versiegelungen oder Umlagerungen von Böden die Schadstofffracht in das Grundwasser gemindert werden kann. Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten, Bodenmanagementkonzepte einzuführen, beschrieben. Grundsätzlich muss für jeden Einzelfall geprüft werden, ob die beschriebene Option anwendbar ist.

Gebiete nach § 21 Abs. 3 BBodSchG. Die Ausweisung von so genannten Bodenschutzgebieten oder Bodenplanungsgebieten nach § 21 Abs. 3 BBodSchG zielt darauf ab, flächenhaft auftretenden oder zu erwartenden schädlichen Bodenveränderungen gebietsbezogen zu begegnen (Hipp et al., 2000). Detaillierte Regelungen sind von den jeweiligen Bundesländern zu treffen.

Die Option zur Ausweisung von Gebieten, um Regelungen zum Umgang mit belastetem Boden innerhalb flächenhafter PFAS-Kontaminationen einzuführen, wird in den derzeitigen Diskussionen eher zurückhaltend beurteilt. Dies hängt auch damit zusammen, dass es im BBodSchG keine Präzisierung zum Geltungsbereich dieser Regelung gibt. Länderspezifische Regelungen können Bundesgesetze oder -verordnungen nicht ersetzen, sie können nur ergänzend wirken. Deshalb zielt aus gegenwärtiger Sichtweise der § 21 entweder auf den vorsorgenden Bodenschutz oder auf die Umsetzung von Maßnahmen zum Verbot, zur Sanierung oder zu Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen im Umgang mit schädlichen Bodenveränderungen.

Zum Beispiel können, je nach landesspezifischer Regelung, in solchen Gebieten Bodennutzungen eingeschränkt oder definiert werden. Auch sind Einschränkungen im Umgang mit Aushubmaterial möglich, ebenso wie Duldungsverfügungen oder Handlungsanweisungen an die Eigentümer bzw. Grundstücksnutzer.

Unzumutbare Nutzungseinschränkungen sind in den Länderregelungen teilweise mit dem Anspruch auf einen Ausgleich in Geld durch die Gebietskörperschaft verbunden. Dies ist im Hinblick auf die Ausweisung von Bodenschutz- oder Bodenplanungsgebieten nachteilig. Hier besteht das Risiko der rechtlichen Auseinandersetzung über Ausgleichsansprüche.

Außerdem wird die Umsetzung schwierig, wenn es Handlungsstörer gibt. Bei den flächenhaften PFAS-Verunreinigungen sind solche Störer tatsächlich vorhanden, weshalb es zu Konflikten hinsichtlich der Verantwortlichkeiten bzw. der Kostentragung kommen kann. Durch die übergreifenden Regelungen und den dadurch möglicherweise entstehenden Makel des Gesamtgebietes besteht zudem das Risiko, dass Eigentümer unbelasteter Grundstücke innerhalb von flächenhaften Anhäufungen von Einzelflächen den Grundstückswert gemindert sehen und es zu rechtlichen Auseinandersetzungen kommen kann.

Prinzipiell möglich wäre aber die Ausweisung von Bodenschutz- oder Bodenplanungsgebieten bei vollständig zusammenhängenden Großflächen dann, wenn ein Handlungsstörer nicht mehr in Anspruch genommen werden kann und zum Beispiel Nutzungs- und Beschränkungsmaßnahmen ausgesprochen werden sollen. Ob das Instrument der Rechtsverordnung zur Ausweisung solcher Gebiete nicht zu komplex ist, ist im Einzelfall zu prüfen.

Allgemeinverfügung mit Vorgaben zu einem Bodenmanagement nach § 12 Abs. 10 BBodSchV.

Eine Möglichkeit, den Umgang mit verunreinigtem Bodenmaterial innerhalb von flächenhaften PFAS-Kontaminationen regeln zu können, bietet § 12 Abs. 10 BBodSchV:

„In Gebieten mit erhöhten Schadstoffgehalten in Böden ist eine Verlagerung von Bodenmaterial innerhalb des Gebietes zulässig, wenn die in § 2 Abs. 2 Nr. 1 und 3 Buchstabe b und c des Bundesbodenschutzgesetzes genannten Bodenfunktionen nicht zusätzlich beeinträchtigt werden und insbesondere die Schadstoffsituation am Ort des Aufbringens nicht nachteilig verändert wird. Die Gebiete erhöhter Schadstoffgehalte können von der zuständigen Behörde festgelegt werden. Dabei kann die zuständige Behörde auch Abweichungen von den Absätzen 3 und 4 zulassen.“

Die Regelung in der BBodSchV ermöglicht die Ausweisung von Gebieten, in denen Bodenmaterial umgelagert werden kann. Eine Bedingung dafür ist, dass der Zustand am Ort des Aufbringens nicht verschlechtert wird (*Verschlechterungsverbot*). Diese Anforderung erfüllt auch die Bedingung des KrWG einer schadlosen Verwertung. In vielen Bundesländern gibt es Vorgaben zu Einstufungswerten zur Verwertung von PFAS-verunreinigtem Aushubmaterial. Innerhalb des ausgewiesenen Gebietes müssen deshalb zu diesen Regelungen Ausnahmen definiert werden. Die einzelfallbezogene Abweichung von den allgemeinen Regelungen ist zu begründen.

Zusammen mit der Ausweisung der Gebiete ist ein Bodenmanagement festzulegen, in dem die Regelungen für den Wiedereinbau von verunreinigtem Boden, behördliche Erlaubnisverfahren, Dokumentationspflichten, etc. festgelegt werden. Außerdem sind die Bodenverlagerungen in einem gesonderten Kataster zu führen, um die sich ständig verändernden Belastungssituationen im Gesamtgebiet dokumentieren zu können. Dies kann von der Behörde im Rahmen der Allgemeinverfügung festgelegt werden.

Das beschriebene Vorgehen kann sich für durch Emissionen verursachte zusammenhängende Großflächen eignen. Bei Einzelflächenanhäufungen wird die Vorgehensweise von der praktischen Umsetzbarkeit her derzeit kritisch diskutiert, da für eingestreute unbelastete Flächen eine Benachteiligung entstehen könnte. Unbelastete Flächen müssten freigemessen und aus der Verfügung herausgelöst werden.

In der Praxis wird die Allgemeinverfügung in vielen Fällen erst dann möglich sein, wenn der Gesamtvorgang der bodenschutzrechtlichen Untersuchung und Bewertung (Störerauswahl, Sanierungsuntersuchung, etc.) abgeschlossen ist und mit der Umsetzung geplanter Sanierungsmaßnahmen begonnen wurde. Ist dies nicht der Fall und Boden wird schon vorher umgelagert, kann dies dazu führen, dass z. B. während der Sanierungsuntersuchung mögliche Sanierungsoptionen durch die bereits realisierte Bodenumlagerung erschwert oder unmöglich gemacht werden.

Integraler Sanierungsplan. Bei Flächen mit einer definierten Quelle und bekannten Pflichtigen gilt der nachsorgende Bodenschutz gemäß § 13(5) mit den aus dem BBodSchG und BBodSchV bekannten Regeln. Danach ist zur Genehmigung grundsätzlich ein Sanierungsplan aufzustellen und für verbindlich zu erklären. Der Sanierungsplan wird einzelfallbezogen aufgestellt und kann hinsichtlich der darin enthaltenen Regelungen auch umfassender gestaltet sein. Die Regelungen nach § 28 Abs. 1 Satz 1 KrWG gelten explizit nicht, wenn sichergestellt ist, dass durch Bodenumlagerungen innerhalb des Sanierungsgebietes das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. Eine Ausweisung eines Sanierungsplans über einen größeren Bereich, in dem sich zahlreiche punktuelle Quellen befinden, entspricht den Grundsätzen des Bodenschutzes und wird als „Integraler Sanierungsplan“ bezeichnet (Grimski u. König, 2010). Integrale Sanierungspläne sind in der Regel anwendbar, wenn Einigkeit bei den Sanierungspflichtigen vorhanden ist. Grundsätzlich gibt es zwei Anwendungsmöglichkeiten.

Fall 1: Sanierung ist ganz oder teilweise verhältnismäßig. Wenn im Rahmen der Sanierungsuntersuchung die Sanierung als verhältnismäßig beurteilt wird, ist der integrale Sanierungsplan entsprechend BBodSchV zu erstellen. Wenn es verschiedene Pflichtige gibt, hat die Behörde ein Auswahlmessen oder kann in Anlehnung an § 14 BBodSchG den Sanierungsplan selbst erstellen.

In dem genannten Paragraphen ist zwar von Altlasten die Rede, die Anwendung auf schädliche Bodenveränderungen ist rechtlich zu prüfen.

Fall 2: Sanierung ist nicht verhältnismäßig. Wenn im Rahmen der Sanierungsuntersuchung die Sanierung von Einzelflächen oder Teilbereichen grundsätzlich als nicht verhältnismäßig beurteilt wird, kann dennoch eine Teil-Sanierung in bestimmten Fällen zielführend und effizient sein. Dies ist dann der Fall, wenn auf den Einzelflächen oder Teilbereichen Sowieso-Maßnahmen stattfinden, die eine verhältnismäßige Sanierung ermöglichen. Auch hinsichtlich der Betroffenen oder Pflichtigen erledigen sich Interessenkonflikte dann, wenn eine gemeinsame Interessenlage vorhanden ist, z.B. bei Erschließungsgebieten oder ähnlichem.

Hinsichtlich der Berücksichtigung von PFAS-belasteten Einzelflächen innerhalb von flächenhaften Bodenbelastungen gibt es verschiedene Fallkonstellationen. Eine Fallkonstellation aus der Praxis liegt beispielweise vor, wenn ein Erschließungsgebiet innerhalb einer flächenhaften Bodenbelastung liegt und nach der Sanierungskonzeption festgestellt wurde, dass eine Bearbeitung von einzelnen Flächen nicht verhältnismäßig oder fachlich nicht sinnvoll ist.

Beispiel „Kombination von Sanierungs- mit Erschließungsmaßnahmen“. Bei diesem Beispiel kann ein gezieltes Bodenmanagement im Rahmen einer Erschließung durch Synergien eine verhältnismäßige Sanierung ermöglichen. Das heißt, eine Abwehr oder Beseitigung der Gefahren (Sanierung) wäre dann mit einfachen Mitteln (im Sinne von BBodSchV § 3 (5) und § 7) oder zumindest mit verhältnismäßigen Mitteln möglich. Dieses ist jedoch in der Regel nur dann durchführbar, wenn das gesamte Erschließungsgebiet als Untersuchungsgebiet berücksichtigt und eine Sanierungsuntersuchung für das gesamte Gebiet durchgeführt wird. Dies wird im Folgenden näher ausgeführt.

Im Rahmen eines Sanierungsplans nach BBodSchG § 13 (5) ist eine Umlagerung von belasteten Böden möglich, wenn das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz ist nicht betroffen. Flächen, die innerhalb des Sanierungsgebiets liegen und bei denen keine maßgebenden PFAS-Einträge in das Grundwasser stattfinden, müssen dabei in den Geltungsbereich des Sanierungsplans integriert werden. Ansonsten würde das Kreislaufwirtschaftsrecht gelten und es wäre kein, auf die Sanierung bezogenes zielgerichtetes Bodenmanagement mit entsprechenden Quertransporten über nicht sanierungsbedürftige Fläche hinweg möglich. Die Sanierungs- und Erschließungsmaßnahmen wären dann z. B. nur sehr gehemmt kombinierbar.

Die von der Sanierung betroffene Fläche definiert sich als betroffene Fläche des Bodenmanagementplans. Im übertragenen Sinne erweitert sich somit die von der Sanierung betroffene Fläche auch auf die (Teil-)Flächen, die im strengen Sinne nicht sanierungsbedürftig wären. Dies ist allerdings auch oft bei „normalen“ größeren Sanierungen der Fall.

Beim Bodenmanagement muss der Grundsatz des Verschlechterungsverbot für unbelastete Flächen berücksichtigt werden. Auch die Eigentumsverhältnisse müssen bei der Sanierungsuntersuchung und dem weiteren Vorgehen Berücksichtigung finden.

Management im Umgang mit PFAS-kontaminierten Böden

Die derzeit stark eingeschränkten Entsorgungsmöglichkeiten für PFAS-verunreinigte Böden erschweren sowohl Sanierungs- als auch Entwicklungsmaßnahmen (Hemmung von kommunalen Entwicklungen und der Erweiterung gewerblicher Flächen), welche gegebenenfalls durch innergebietliche Regelungen (Bodenmanagementkonzepte) aufgelöst werden können.

Instrumente sind u.a. die Ausweisung von Bodenschutz- oder Bodenplanungsgebieten, um flächenhaften Belastungen gebietsbezogen zu begegnen. Problematisch ist, dass es dabei zu Konflikten hinsichtlich der Verantwortlichkeiten und Kostenübernahme unter betroffenen Störern kommen kann.

Eine Alternative ist die Allgemeinverfügung mit Vorgaben zu einem Bodenmanagement nach § 12 Abs. 10 BBodSchV, wonach innerhalb von ausgewiesenen Gebieten mit erhöhten Schadstoffgehalten eine Verlagerung von Bodenmaterial zulässig ist, wenn die Schadstoffsituation am Ort des Aufbringens nicht nachteilig verändert wird (Verschlechterungsverbot). Parallel dazu sind die Bodenverlagerungen in einem gesonderten Kataster zu führen.

Auch in einem integralen Sanierungsplan können Bodenumlagerungen innerhalb des Sanierungsgebietes, in dem sich zahlreiche punktuelle Quellen befinden, vorgesehen werden. Integrale Sanierungspläne sind in der Regel anwendbar, wenn Einigkeit bei den Sanierungspflichtigen vorhanden ist. Flächen ohne PFAS-Einträge in das Grundwasser, müssen in den Sanierungsbereich integriert werden, um ein auf die Sanierung bezogenes Bodenmanagement zu ermöglichen.

5 Kreislaufwirtschaft

Kreislaufwirtschaft. Die deutsche Kreislaufwirtschaft ist konsequent auf das Ziel ausgerichtet, Abfälle zu vermeiden und zu recyceln. Eine Beseitigung in Deponien ist als letzte Möglichkeit vorgesehen, wenn alle vorrangigen Vermeidungs-, Recycling- oder Verwertungsoptionen nicht möglich sind. Aus diesem Grund wird die Schaffung neuer Deponiekapazitäten konsequent nachrangig verfolgt, da die strategische Planung grundsätzlich von verwertbaren Materialien im Wirtschaftskreislauf ausgeht.

Derzeit gibt es für die sehr großen Bodenvolumen bei flächenhaften PFAS-Kontaminationen, aber auch für viele lokale Kontaminationen keine verhältnismäßigen Dekontaminierungsmöglichkeiten. Gleichzeitig gibt es aktuell kaum Beseitigungsmöglichkeiten in Deponien.

Aus diesen Gründen müssten entweder weitere Deponiekapazitäten geschaffen oder im Sinne der Kreislaufwirtschaft versucht werden, die Verwertungsmöglichkeit der PFAS-kontaminierten Böden zu stärken. Dies kann durchaus auch im Rahmen der in Kapitel 4.7 aufgezeigten Möglichkeiten erfolgen.

Bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen im Einzelfall oder der Prüfung von Ausnahmeregelungen wird empfohlen, die kreislaufwirtschaftliche Vorrangstellungen der Vermeidung von Abfällen und der Verwertung bei PFAS-kontaminierten Böden in besonderem Maße zu berücksichtigen. Die Verwertung erfolgt konsequenterweise und nach den rechtlichen Vorgaben in den kontaminierten Regionen (Verschlechterungsverbot).

Ausschleusung PFAS aus der Umwelt. Im Sinn des Umweltschutzes ist es sinnvoll, Konzepte und neue Lösungen zur gezielten und systematischen Ausschleusung der PFAS aus der Umwelt bzw. menschlichen Lebensumgebung zu entwickeln. Dieses ist, langfristig betrachtet, insbesondere wegen der sehr hohen Persistenz der Stoffe erforderlich. Hierzu wird empfohlen, auf Länder- oder Bundesebene Konzepte und Herangehensweisen zu entwickeln. Denkbar sind verschiedene Szenarien, wie zum Beispiel die systematische Dekontaminierung oder die Deponierung von besonders hohen Verunreinigungen. Entsprechende Instrumente und technische Möglichkeiten sind hier noch zu schaffen.

Vermeidung von Abfällen. Die Entstehung von Abfällen ist vorrangig zu vermeiden. Im Einzelfall ist daher zu prüfen, ob tatsächlich eine Entsorgungspflicht besteht oder ob nicht PFAS-kontaminierte Böden an Ort und Stelle wieder eingebaut bzw. belassen werden können. Dies sollte, sofern möglich, sinnvollerweise in einem gesicherten Zustand, also in einem besseren Zustand als vorher erfolgen. Eine Entledigungsverpflichtung (als Grundlage des Abfallbegriffs) existiert nach § 3(4) KrWG für Materialien,

„...wenn diese nicht mehr entsprechend ihrer ursprünglichen Zweckbestimmung verwendet werden, auf Grund ihres konkreten Zustandes geeignet sind, gegenwärtig oder künftig das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die Umwelt, zu gefährden und deren Gefährdungspotenzial nur durch eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung oder gemeinwohlverträgliche Beseitigung nach den Vorschriften dieses Gesetzes und der auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnungen ausgeschlossen werden kann.“

Wenn sich eine Fläche in der bodenschutzrechtlichen Bearbeitung befindet, kann davon ausgegangen werden, dass entweder eine Sanierung zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt oder keine Sanierung erforderlich ist, weil keine Gefahr vorliegt. Wenn also während der bodenschutzrechtlichen Bearbeitung Baumaßnahmen mit Aushub von belastetem Bodenaushub stattfinden, würden im Regelfall die blau markierten Satzteile des oberen Zitats nicht zutreffen und es läge als einzelfallbezogene, mit der Behörde abzustimmende Ausnahme, keine Entsorgungspflicht vor. Das Material könnte dann gegebenenfalls an Ort und Stelle wieder eingebaut werden.

Verwertung. Derzeit werden von einer Arbeitsgruppe im Auftrag der Umweltministerkonferenz bundeseinheitliche Leitlinien erarbeitet. Auf dieses vermutlich 2020 erscheinende Papier wird hingewiesen.

Ergänzend wird nachfolgend auf einige zusätzliche, praxisrelevante Aspekte bei der Verwertung eingegangen. Werden Böden mit höheren PFAS-Gehalten in technischen Bauwerken verwertet und liegen diese über einen längeren Zeitraum offen, wird empfohlen bis zur Herstellung der Oberflächenabdichtung sicherzustellen, dass kein belastetes Sickerwasser Boden- oder Grundwasserverunreinigungen verursachen kann (z.B. temporäre Abdeckung des zwischengelagerten Materials, Immobilisierung, Sorptionssperre etc.).

Technische Bauwerke, in denen Material mit höheren PFAS-Gehalten verwertet wird, werden in der Regel nicht systematisch erfasst. Die Verwertungsinformationen sind in diesen Fällen nicht dauerhaft und generationenübergreifend sicher verfügbar. Deshalb wird empfohlen, diese Bauwerke im jeweiligen Bodenschutzkataster zu erfassen.

Die Verwertung von Böden mit sehr geringen PFAS-Gehalten wird gegenwärtig häufig wegen der Unsicherheit vieler Beteiligter in Bezug auf die Stoffgruppe der PFAS abgelehnt. Um zu verhindern, dass aus dieser Unsicherheit heraus anthropogen verursachte Hintergrundbelastungen beseitigt werden, ist die Kenntnis über diese von wesentlicher Bedeutung. Eindeutige Hinweise auf das Vorhandensein von Hintergrundgehalten an PFAS, vor allem Carbonsäuren mit bis zu 8 C-Atomen, gibt es aus exemplarischen Untersuchungen in mehreren Bundesländern (Anhang A) und aus der Umweltprobenbank. Insgesamt fehlen hierzu noch weitere Daten und Grundlagen, die zukünftig noch zu ermitteln sind.

Beseitigung. Die Kriterien für eine Beseitigung von PFAS-kontaminierten Bodenmaterialien waren bislang bundesweit uneinheitlich. Nur in wenigen Bundesländern gab es Regelungen. Auf die bisherigen länderspezifischen Regelungen wird im Folgenden jedoch nicht eingegangen. Im Rahmen einer Recherche 2018 konnten nur sehr wenige Deponien identifiziert werden, die PFAS-belasteten Boden angenommen haben. Diese sind zudem nicht flächendeckend in Deutschland verteilt, so dass der mit einer Entsorgung verbundene Transportweg auf diese Deponien mit erheblichen Zusatzbelastungen (u.a. Schadstoffemissionen, CO₂-Emission) verbunden ist.

Die Deponierfähigkeit von PFAS-belastetem Boden hängt für den Parameter PFAS neben den Annahmekriterien der Deponien vor allem von der Eignung der jeweils deponiespezifisch vorhandenen Sickerwasserbehandlung ab. Hier muss in jedem Einzelfall die Sickerwasserreinigung hinsichtlich der notwendigen Schadstoffrückhaltung betrachtet werden. Dies betrifft alle Deponieklassen. In den bundeseinheitlichen Bewertungsleitlinien, die derzeit von einer Arbeitsgruppe der Umweltministerkonferenz aufgestellt werden, sind nach dem Diskussionsstand Ende 2019 folgende Ausführungen vorgesehen:

Nach der EU-Verordnung Nr. 1342/2014 ist eine oberirdische Deponierung von PFOS-belastetem Bodenmaterial bis zu einem Gehalt von 50 mg/kg zulässig. Überschreitet der PFOS-Gehalt diesen Wert, ist es gemäß Anhang V Teil 1 der Verordnung (EG) Nr. 850/2004 (EG POP-VO) zu behandeln oder untertägig zu entsorgen. Es wird empfohlen, den bislang ausschließlich für PFOS geltenden Grenzwert von 50 mg/kg auf die Summe der ermittelten PFAS anzuwenden. Die oberirdische Deponierung von PFAS-haltigem Bodenaushub kann bis zu einem PFAS-Gehalt (in Summe) von 50 mg/kg erfolgen, wenn die Deponie die nachfolgenden technischen Voraussetzungen erfüllt:

- *Die Ablagerung von PFAS-haltigem Bodenaushub auf Deponien muss bei größeren Mengen in speziellen Monobereichen erfolgen, um, sofern morphologisch machbar, eine gesonderte Sickerwasserfassung und bei Vorliegen geeigneter Reinigungsverfahren ggf. eine Rückholung des Materials zu ermöglichen. Zudem muss bei Deponien sichergestellt sein, dass eine geeignete Basisabdichtungskomponente z.B. in Form einer mineralischen Dichtung oder einer Konvektionssperre (Kunststoffdichtungsbahn oder Deponieasphaltabdichtungskomponente) vorhanden ist.*
- *Es ist sicherzustellen, dass bei einer Deponierung von PFAS-haltigem Bodenaushub eine geeignete, spezifisch auf die jeweiligen PFAS ausgerichtete Sickerwasserbehandlung erfolgt, mit der die PFAS nachhaltig aus dem Stoffkreislauf ausgeschleust werden können.*
- *Das Untersuchungsprogramm für Sicker- und Grundwasser ist um die einzelfallrelevanten PFAS zu erweitern. Von der zuständigen Behörde sind entsprechende Auslöseschwellen gemäß Deponieverordnung für das Grundwasser festzulegen.*

Für Deponien der Klasse DK 0, die über keine Basisabdichtungskomponente verfügen und zum Teil auch keine Sickerwasserfassung aufweisen, wäre die Ablagerung von PFAS-haltigem Bodenmaterial folglich nicht geeignet.

Enthalten die PFAS-belasteten Böden größere Mengen an Precursor, könnte nach Sauerstoffeinmischung in den belasteten Boden im Rahmen des Aushubs und der Deponierung die mikrobielle Transformation der Precursor forciert ablaufen und in Folge dessen im Eluat und im Boden höhere Konzentrationen der bewertungsrelevanten Verbindungen auftreten. Dieses Risiko wäre jedoch durch die vorgesehene Sickerwasserbehandlung abgedeckt.

Immobilisierung als temporäre technische Hilfsmaßnahme in der Kreislaufwirtschaft. Die Immobilisierung kann, auch wenn eine „quasi unendliche“ Langzeitbeständigkeit noch nicht belegt werden kann, als temporäre Interimsmaßnahme durchgeführt werden. Mit dieser kann die Verfrachtung in tiefere Bodenbereiche temporär verhindert werden. Die Immobilisierung eignet sich prinzipiell als technisches Hilfsmittel, zum Beispiel bei Verwertungen oder Beseitigungen auf Deponien, die erst nach einem längeren Zeitraum abgedichtet werden und belastetes Sickerwasser Boden- oder Grundwasserverunreinigungen verursachen könnte.

Derzeit gibt es verschiedene Bestrebungen, Verfahren zur Immobilisierung mit hoher Langzeitbeständigkeit zu entwickeln. Wenn dieses gelingt, könnte perspektivisch gesehen, eine Kombination aus Immobilisierung und Deponierung in Betracht gezogen werden. Durch die Immobilisierung werden gegebenenfalls die Eigenschaften des Abfalls (PFAS-belasteter Boden) soweit „verbessert“, dass eine einfachere Deponierung mit einem geringeren Anspruch an die Sickerwasseraufbereitung möglich erscheint. Davon unbenommen bliebe das Erfordernis einer Kontrolle auf PFAS in der Überwachungsphase bestehen.

Es sind bei dem Verfahren der Immobilisierung noch eine Reihe rechtlicher und technischer Fragen offen (Anhang E).

Kreislaufwirtschaft

Bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen im Einzelfall oder der Prüfung von Ausnahmeregelungen wird empfohlen, die kreislaufwirtschaftliche Vorrangstellungen der Vermeidung von Abfällen und der Verwertung bei PFAS-kontaminierten Böden in besonderem Maße zu berücksichtigen.

Im Sinn des Umweltschutzes ist es sinnvoll, Konzepte und neue Lösungen zur gezielten und systematischen Ausschleusung der PFAS aus der Umwelt bzw. menschlichen Lebensumgebung zu entwickeln. Hierzu wird empfohlen, auf Länder- oder Bundesebene Konzepte und Herangehensweisen auszuarbeiten.

Die Entstehung von Abfällen ist vorrangig zu vermeiden. Im Einzelfall ist daher zu prüfen, ob tatsächlich eine Entsorgungspflicht besteht oder ob nicht PFAS-kontaminierte Böden an Ort und Stelle wieder eingebaut bzw. belassen werden können.

Derzeit werden von einer Arbeitsgruppe im Auftrag der Umweltministerkonferenz bundeseinheitliche Leitlinien zur Verwertung und Beseitigung erarbeitet. Auf dieses voraussichtlich Anfang 2020 erscheinende Papier wird hingewiesen.

6 Öffentlichkeitsbeteiligung

6.1 Erfordernis der Öffentlichkeitbeteiligung und grundlegende Vorgehensweise

Insbesondere bei flächenhaften PFAS-Verunreinigungen mit vielen Betroffenen besteht ein großes Interesse der Öffentlichkeit, die Hintergründe der Kontamination und die weitere geplante Vorgehensweise zu verstehen. In Deutschland besteht zwar keine rechtliche Pflicht, es wird jedoch dringend empfohlen, vor allem bei größeren Projekten die Öffentlichkeit proaktiv zu beteiligen. Dies dient zur Versachlichung des Themas PFAS, welche auch Betroffenen, wie zum Beispiel Landwirten hilft, die auf die örtliche Vermarktung ihrer Produkte angewiesen sind.

Es hat sich bewährt, einen behördlichen Ansprechpartner für die Öffentlichkeitsarbeit zu benennen. Die Öffentlichkeitsarbeit besteht hauptsächlich aus Presseinformationen, einer Bürgerinformation im Internet mit „häufig gestellten Fragen und Antworten“ sowie Bürgerinformationsveranstaltungen und der Beantwortung von Anfragen aus dem politischen Raum. Eine interessante Veranstaltungsform findet bei den Bürgern erfahrungsgemäß große Anerkennung. Dabei werden zunächst die aktuellen Themen in Kurzvorträgen eingeführt. Zu jedem Themenblock können beispielsweise Infostände aufgebaut werden, an denen Behördenvertreter und externe Fachleute für Fragen zur Verfügung stehen. Diese Form ist wesentlich aufwändiger als die übliche Podiumsform, ermöglicht aber eine größere und individuellere Bürgernähe. Zudem wird vermieden, dass Gruppen die Bürgerinformation für politische Agitation nutzen. Vielmehr steht der einzelne Bürger mit seinen Fragen im Vordergrund, die auf „Augenhöhe“ beantwortet werden.

Im Vordergrund einer Öffentlichkeitsbeteiligung steht somit die klare Risikokommunikation mit dem Ziel, den Betroffenen die vorgenommenen Risikobewertungen und das Management der Risiken in verständlicher Weise zu erläutern, vor allem vor dem Hintergrund, dass die vom Schadensfall Betroffenen in der Regel die Risiken zunächst sehr emotional wahrnehmen (NGWA, 2017; Slovic, 1987, 2003; UN-ISDR, 2002).

Eine effektive Risikokommunikation bindet alle Interessengruppen in den Prozess der Risikobewertung und -steuerung ein, kommuniziert das tatsächliche Risiko und erleichtert bei Betroffenen die Teilnahme an den Risikomanagement-Entscheidungsprozessen. Unterstützende Materialien zur Vorbereitung der Risikokommunikation werden von einer breiten Palette von Einrichtungen der öffentlichen Hand frei zugänglich gemacht. Die Durchführung einer erfolgreichen Risikokommunikation während des gesamten Lebenszyklus eines Projekts erhöht das Bewusstsein der Gemeinschaft für Umweltgefahren, führt zu einer Stärkung der Gemeinschaft durch die Teilnahme an Risikominderungsmaßnahmen und trägt zur Verbesserung der Lebensqualität für die betroffenen Interessensgruppen bei (Harclerode et al., 2016a,b).

Erfordernis der Öffentlichkeitsbeteiligung

Insbesondere bei flächenhaften PFAS-Verunreinigungen besteht ein großes Interesse der Öffentlichkeit, die Hintergründe der Kontamination und die weitere geplante Vorgehensweise zu verstehen.

In Deutschland besteht zwar keine rechtliche Pflicht, es wird jedoch dringend empfohlen, vor allem bei größeren Projekten, von Beginn an kontinuierlich die Öffentlichkeit proaktiv zu beteiligen.

6.2 Beteiligte Interessengruppen (Stakeholder)

Beteiligte Interessengruppen (Stakeholder) können aus beliebigen Organisationen, Gruppen oder Einzelpersonen bestehen, die sich für ein Projekt interessieren und die die Projektergebnisse beeinflussen können (Cundy et al. 2013, Reed, 2008). Im Zusammenhang mit PFAS-kontaminierten Standorten sind Beteiligte vor allem:

- ▶ Potenzielle Sanierungspflichtige,
- ▶ Zuständige Behörden,
- ▶ Betroffene Wassernutzer,
- ▶ Anwohner,
- ▶ Landwirte,
- ▶ Konsumenten,
- ▶ Kommunen und
- ▶ Eigentümer.

Die Berücksichtigung des „Kontextes“ der Beteiligten kann den Fachleuten helfen, Risikowahrnehmungsfaktoren zu identifizieren, die zur Skepsis der Gemeinschaft beitragen. Erhöhte Sorge und Skepsis gegenüber den kommunizierten Ergebnissen beruhen mitunter auf Misstrauen aufgrund eines anfänglichen Mangels an Kommunikation (Emmett et al., 2009, 2010). Der „Kontext“ der Beteiligten wird durch die Demographie der Gemeinschaft definiert:

- ▶ Soziokulturelle Faktoren (z. B. Ansichten zur Umweltverantwortung und Sanierungsaktivitäten)
- ▶ Psychosoziale Faktoren (z. B. Vielfalt der Überzeugungen, Einstellungen, Werte und Hemmungen von Einzelpersonen, einschließlich des Vertrauens zu den Behörden)
- ▶ Wissensgrundlage (z. B. Verständnis der PFAS-Exposition und sicherer Konzentrationswerte)
- ▶ Das Vorhandensein von Mobilitätsbeschränkungen, die eine angemessene Beteiligung an öffentlichen Veranstaltungen verhindern können.

Risikowahrnehmungsfaktoren können durch Befragungen und Interviews identifiziert werden (Chappells et al., 2014).

6.3 Risikokommunikation

Risikokommunikation ist der Prozess der Information der Interessengruppen über Gesundheits- oder Umweltrisiken, Risikobewertungsergebnisse und die vorgeschlagenen Risikomanagement-Strategien. Die Kommunikation der Risiken sollte in einem wechselseitigen Gespräch durchgeführt werden, bei dem alle Interessengruppen über die Bedürfnisse des jeweils anderen informiert werden und die Ziele identifiziert werden, um den geäußerten Bedenken Rechnung zu tragen (Cundy et al., 2013, US EPA, 2007).

Mitunter kann sich die Gefahrenabwehr, wenn keine Dekontamination mit verhältnismäßigen Mitteln zu erzielen ist, auch auf Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen beschränken. Bei der Risikokommunikation ist es wichtig, dies transparent und wahrheitsgetreu dazustellen, um eine Erosion der Glaubwürdigkeit zu vermeiden und die Entscheidungen, wie das Risiko gemanagt werden soll, nachvollziehbar zu machen (US EPA, 2007).

Die Einbeziehung aller Interessengruppen kann, wenn sie erfolgreich durchgeführt wird, ein komplexer Prozess sein. Andererseits kann eine effektive Risikokommunikation die anstehenden Projekte

vereinfachen bzw. deren Durchführung beschleunigen, die Transparenz erhöhen und den Bedenken der Interessengruppen Rechnung tragen.

Es empfiehlt sich, bereits im Vorfeld häufig gestellte Fragen zu identifizieren und empfohlene Antworten darauf zu entwickeln. Beispiele sind:

1. Frage: Warum stehen keine Labormethoden zur Verfügung, um festzustellen, ob PFAS vorliegen (d. h. die Nachweisgrenze ist Null)?

Antwort: Es gibt kein Verfahren, das empfindlich genug ist, um eine Null-Konzentration (d.h. kein einzelnes Molekül ist vorhanden) für irgendeine Chemikalie zu bestimmen. Es gibt jedoch genormte Methoden, die empfindlich genug sind, um PFAS in Konzentrationen zu detektieren, die niedriger sind als die derzeitigen Grenzwerte. Daher kann die öffentliche Gesundheit geschützt werden.

2. Frage: Verstärkt das Vorhandensein anderer Schadstoffe und/oder Nebenprodukte die Auswirkungen der Exposition gegenüber PFAS auf die Gesundheit von Menschen und die Einwirkung auf die Umwelt?

Antwort: Die Behörden haben einen Ansatz entwickelt, um die möglichen Auswirkungen einer Exposition gegenüber mehreren PFAS-Verbindungen zu bewerten. Jede Situation ist jedoch unterschiedlich und hängt von der Menge und der Art der Verbindungen ab, die vorhanden sein können und auch davon, ob die Verbindung mit dem Menschen oder der Umwelt in Kontakt kommen. Darüber hinaus gibt es keine bekannten Kombinationen von PFAS mit anderen Chemikalien, die die mit der Exposition verbundenen Risiken verschärfen.

Hilfreich kann auch sein,

- ▶ Informationsblätter (*Fact Sheets*) zu erstellen,
- ▶ eine Website zu entwickeln, die vorgestellte Präsentationen, Untersuchungsergebnissen und häufig gestellte Fragen enthält,
- ▶ eine gebührenfreie Telefonnummer einzurichten, unter der Fachleute für offene Fragen erreichbar sind,
- ▶ klare Lagepläne zu erstellen, so dass die Anwohner ihr Eigentum in Bezug auf die Untersuchungsergebnisse einordnen können,
- ▶ einen Kommunikationsplan zu entwickeln, der die Einbindung und Verbreitung von Informationen an die Interessengruppen beschreibt.

Es hat sich gezeigt, dass die Entwicklung eines Kommunikationsplans und der richtigen Strategie das Misstrauen zwischen den Beteiligten und den Entscheidungsträgern (beispielsweise Behörden und verantwortlichen Parteien) deutlich vermindert. Ein solcher Kommunikationsplan könnte folgende chronologische Elemente enthalten (Emmett et al., 2009):

- ▶ Benachrichtigungen von Teilnehmern und Behörden.
- ▶ Kurz darauf das Versenden von Untersuchungsergebnissen per Post
- ▶ Versenden von Informationsmaterial an Entscheidungsträger, um sicherzustellen, dass angemessen auf Anfragen der Öffentlichkeit reagiert werden kann.
- ▶ Pressemitteilung und Briefings. Wichtige lokale und regionale Medien werden identifiziert und so frühzeitig informiert, dass die Projektsteuerung die primäre Informationsquelle für die

Presse ist. Identifizierte Medienvertreter und nationale Nachrichtenagenturen werden zu einer Pressemitteilung eingeladen.

Im Vorfeld von öffentlichen Terminen sollte intern die Tagesordnung, Verständlichkeit der Folien, Wahl der Formulierungen, Struktur der Präsentation und Umgang mit wahrscheinlichen Fragen geklärt werden. Es hat sich bei verschiedenen Veranstaltungen bewährt, externe professionelle Moderatoren zu beauftragen, die durch die Veranstaltung führen und durch eine neutrale Moderation eine Versachlichung der Diskussion bewirken. Die Durchführung einer wirksamen Risikokommunikation ist nicht unproblematisch, insbesondere in strittigen Situationen, in denen Expositionswege und Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit festgestellt wurden. Zu diesen potenziellen Herausforderungen gehören:

- ▶ **Anpassungen von Bewertungsgrundlagen und sanierungsstrategischen Ansätzen.** Eine der Aufgaben der Risikokommunikation besteht darin, die betroffenen Gruppen dabei zu unterstützen, den Prozess der Risikobewertung und des Risikomanagements zu verstehen. Aufgrund der Natur von neuen Kontaminanten wie PFAS und der Anzahl und Komplexität von PFAS-Verbindungen können die aktuellen Bewertungskriterien in Konflikt zueinanderstehen oder sich ändern. Richtlinien und Kriterien unterliegen ebenfalls Änderungen, basierend auf der Entwicklung von Analyseverfahren und Risikobewertungen. Im Rahmen der Risikokommunikation ist es wichtig, diese Unsicherheiten und Variabilitäten zu kommunizieren und gleichzeitig das Vertrauen der betroffenen Gruppen zu wahren und ihre Bedürfnisse zu erfüllen (US EPA, 2005, 2007; RESCUE Consortium, 2005).
- ▶ **Fehleinschätzung im Rahmen der vorgeschlagenen Risikomanagementstrategien.** Eine effektive Risikokommunikation ist abhängig von der Fähigkeit der Entscheidungsträger, betroffenen Gruppen bei der Bildung einer wissenschaftlich fundierten Wahrnehmung ihres PFAS-Risikos zu helfen. Die Risikowahrnehmung unterscheidet sich zwischen der Wahrnehmung von Experten und Laien (Pidgeon et al., 1992). Da die Öffentlichkeit Gefahren ausgesetzt ist, reagieren die Gemeinschaft und die Gesellschaft im Allgemeinen und beeinflussen direkt das wahrgenommene Risiko dieser Gefahren. Ein Phänomen, das als "Risikodämpfung" bezeichnet wird, tritt auf, wenn Experten Gefahren als relativ ernst einstufen. Betroffene Parteien nehmen dann das Risiko oft weniger ernst (Risikowahrnehmung). Im Gegensatz dazu tritt eine wahrgenommene "Risikoverstärkung" auf, wenn Experten eine Gefährdung als niedrig oder moderat bewerten. Dieses Szenario führt häufig zu einer verminderten Akzeptanz der vorgeschlagenen Risikomanagementstrategien und zu Konflikten zwischen den Interessengruppen (z. B. der Genehmigungsbehörde und der betroffenen Gemeinschaft). Der Grad der Risikoabschwächung oder Risikoverstärkung wird auch durch die Bewertung der Vertrauenswürdigkeit und Expertise der Experten sowie die Einhaltung von Richtlinien und Schutzmaßnahmen beeinflusst (Botzen et al., 2009; Lewis u. Tyshenko, 2009; Kasperson u. Kasperson, 1996).
- ▶ **Fehlen einer wirksamen Risikokommunikation für alle betroffenen Gruppen.** Einer der Hauptzwecke der Risikokommunikation besteht darin, alle betroffenen Interessengruppen in den Entscheidungsprozess zum Risikomanagement einzubeziehen. Das Verständnis auch der Perspektive betroffener Gruppen, die keine ausgeprägte politische Unterstützung erfahren, ist wesentlich für die Durchführung einer effektiven Risikokommunikation. Es ist daher wichtig, sich die Sorgen der Öffentlichkeit anzuhören. Menschen interessieren sich oft mehr für Vertrauen, Glaubwürdigkeit, Kompetenz, Fairness und Empathie als für Statistiken und Details. Es ist auch wichtig, den Bedürfnissen der Medien gerecht zu werden und entsprechend verständlich zu kommunizieren.

- ▶ **Unterschiedliche Erwartungen der betroffenen Gruppen.** Es ist nicht ungewöhnlich, bei der Risikokommunikation Interessensgruppen mit gegensätzlichen Sichtweisen zu involvieren. Die Interessengruppen können in die Arbeit einbezogen werden (Stakeholder-Engagement-Methoden), um mehrere widersprüchliche Bedürfnisse zu evaluieren, zu priorisieren und Entscheidungen zu kommunizieren (Multikriterien-Entscheidungsanalyse und Bewertungssystem) (Harclerode et al., 2015). Auch interaktive Workshops bieten Möglichkeiten, Vertrauen aufzubauen und ein gemeinsames Verständnis für das Problem zu entwickeln, aus dem heraus Lösungen formuliert werden können.

Risikokommunikation

Risikokommunikation ist der Prozess der transparenten und wahrheitsgetreuen Information der Interessengruppen über Gesundheits- oder Umweltrisiken, die Ergebnisse von Risikobewertungen und über vorgeschlagene Risikomanagement-Strategien. Alle Interessengruppen sollten über die Bedürfnisse des jeweils anderen und über Maßnahmen, den geäußerten Bedenken Rechnung zu tragen, informiert werden. Die Risikokommunikation ist wichtig, um eine Erosion der Glaubwürdigkeit zu vermeiden und um anstehende Maßnahmen zu vereinfachen und zu beschleunigen. Für die Risikokommunikation stehen zahlreiche Tools zur Verfügung.

Es hat sich bei Informationsveranstaltungen bewährt, externe professionelle Moderatoren zu beauftragen, um durch eine neutrale Moderation eine Versachlichung der Diskussion zu bewirken. Die Durchführung einer wirksamen Risikokommunikation ist in strittigen Situationen herausfordernd. Die Aufgaben der Risikokommunikation ist es, die betroffenen Gruppen zu unterstützen, den Prozess der Risikobewertung und des Risikomanagements vor dem Hintergrund sich ändernder Rahmenbedingungen und unterschiedlicher Wahrnehmungen zu verstehen und in Entscheidungsprozesse zum Risikomanagement einzubeziehen. Das Phänomen der "Risikodämpfung" tritt vor allem dann auf, wenn Experten Gefahren als relativ ernst einstufen. Menschen interessieren sich oft mehr für Vertrauen, Glaubwürdigkeit, Kompetenz, Fairness und Empathie als für Statistiken und Details.

7 Quellenverzeichnis

- Ahrens, L., Bundschuh, M. (2014): Fate and effects of poly- and perfluoroalkyl substances in the aquatic environment: a review. *Environ Toxicol Chem.* 33(9), 1921-1929.
- Arcadis Germany GmbH (2019): eigene Daten / eigene Abbildung
- Armbruster, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. *Freiburger Schriften zur Hydrogeologie*, Bd. 17. Inst. F. Hydrogeologie, Universität Freiburg.
- Bantz, I. (2018): Bewertungsmaßstäbe und Sanierungsziele/Zielwerte. PFC-Fachgespräch: Sanierungsmanagement für lokale PFC-Kontaminationen, Umweltbundesamt Berlin, 28./29. November 2018 (Vortrag).
- Barton, C.A., Kaiser, M.A., Russell, M.H. (2007): Partitioning and removal of perfluorooctanoate during rain events: the importance of physical-chemical properties. *J Environ Monit.* 9(8), 839-846.
- Barton, C.A., Zarzecki, C.J., Russell, M.H. (2010): A site-specific screening comparison of modeled and monitored air dispersion and deposition for perfluorooctanoate. *Journal of the Air & Waste Management Association* 60, 402-411.
- Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H., and Van Den Bergh, J.C.J. M. (2009): Dependence of flood risk perceptions on socioeconomic and objective risk factors. *Water Resour. Res.*
- Chappells, H., Parker, L., Fernandez, C.V., Conrad, C., Drage, J., O'Toole, G., Campbell, N., Dummer, T.J.B. (2014): Arsenic in private drinking water wells: An assessment of jurisdictional regulations and guidelines for risk remediation in North America. *Journal of Water and Health* 3, 372-392.
- Cundy, A.B., Bardos, R.P., Church, A., Puschenreiter, M., Friesl-Hanl, W., Müller, I., Neu, S., Mench, M., Witters, N., Vangronsveld, J. (2013): Developing principles of sustainability and stakeholder engagement for 'gentle' remediation approaches: The European context. *Journal of Environmental Management*, 129, 283-291.
- DIN 19528:2009-01: Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 19529:2015-12: Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 19738:2017-06: Bodenbeschaffenheit - Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 38414-14:2011-08: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Teil 14: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Schlamm, Kompost und Boden - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) (S 14), Beuth-Verlag, Berlin.
- Dreyer, A., Matthias, V., Weinberg, I., Ebinghaus, R. (2010): Wet deposition of poly- and perfluorinated compounds in Northern Germany. *Environmental Pollution* 158, 1221-1227.
- ECHA (2018): European Chemical Agency - Committee for Risk Assessment (RAC), Committee for Socio-economic Analysis (SEAC): Background document to the opinion on the Annex XV dossier proposing restrictions on Perfluorooctanoic acid (PFOA), PFOA salts and PFOA-related substances. <https://echa.europa.eu/documents/10162/636bc688-82a2-bf43-2119-b01f72264ea7> (06.02.2020).
- Emmett, E.A., Zhang, H., Shofer, F.S., Rodway, N., Desai, C., Freeman, D., Hufford, M. (2009): Development and successful application of a "Community-First" communication model for community-based environmental health research. *Journal of occupational and environmental medicine/American College of Occupational and Environmental Medicine*, 51(2), 146.
- Emmett, E.A., Chintan, D. (2010): Community first communication: Reversing information disparities to achieve environmental justice. *Environmental Justice* 3.3, 79-84.
- Gellrich, V. (2014): Sorption und Verbreitung per- und polyfluorierter Chemikalien (PFAS) in Wasser und Boden. Dissertation. http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2014/10753/pdf/GellrichVanessa_2014_02_06.pdf
- Grimski, D., König M. (2010): Sanierungspläne im Flächenrecycling, Integration, Vorteile, Beispiele. <http://edoc.difu.de/edoc.php?id=PHX3IO45> (06.02.2020)
- Guelfo, J.L., Higgins, C.P. (2013). Subsurface transport potential of perfluoroalkyl acids at aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted sites. *Environmental Science & Technology* 47, 4164-4171. <https://refina-info.de/de/projekte/anzeigeab49.html?id=3132>

- Harclerode, M., Ridsdale, D.R., Darmendrail, D., Bardos, P., Alexandrescu, F., Nathanail, P., Pizzol, L., Rizzo, E. (2015): Integrating the Social Dimension in Remediation Decision-Making: State of the Practice and Way Forward. *Remediation Journal* 26(1), 11-42.
- Harclerode, M.A., Lal, P., Vedwan, N., Wolde, B., Miller, M.E. (2016b): Evaluation of the role of risk perception in stakeholder engagement to prevent lead exposure in an urban setting. *J. Environ. Management* 184, 132-142.
- Harclerode, M.A., Macbeth, T.W., Miller, M.E., Gurr, C.J., Myers, T.S. (2016a): Early decision framework for integrating sustainable risk management for complex remediation sites: Drivers, barriers, and performance metrics. *J. Environ. Management* 184, 57-66.
- Harding-Marjanovic, K. C., Houtz, E. F., Yi, S., Field, J. A., Sedlak, D. L., Alvarez-Cohen, L. (2015). Aerobic biotransformation of fluorotelomer thioether amido sulfonate (Lodyne) in AFFF-amended microcosms. *Environ. Sci. Technol.* 49, 7666-7674.
- Held, T. (2014): In-situ-Verfahren zur Boden- und Grundwassersanierung - Verfahren, Planung und Sanierungskontrolle. Wiley-VCH, Weinheim.
- 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, Länderfinanzierungsprogramm „Wasser, Boden und Abfall“ 2014. http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_4.14/index.jsp (03.04.2019).
- Held, T. (2017): PFAS – A New Global Challenge. *Water Solutions* 4/2017, 50 – 53.
- Held, T. Reinhard, M. (2016): Analyisierte PFAS – die Spitze des Eisbergs? *altlasten spektrum* 25 (05/16), 169 – 208.
- Hipp, L., Rech, B., Turian, G. (2000): Das Bundes-Bodenschutzgesetz mit Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Leitfaden. Verlag: Jehle Rehm.
- HLNUG (2018): Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie: Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen. Handbuch Altlasten. Band 3, Teil 7, 3. überarbeitete und ergänzte Auflage. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/altlasten/handbuch/Handbuch_Altlasten_B3_T7_2018_Internet_.pdf (06.02.2020).
- Hurst, J., Ross, I., Miles, J., Burdick, J., Houtz, E., Pancras, T. (2017): Remediation of poly- and perfluoro alkyl substances: New remediation technologies for emerging challenges. 14th International Conference on Sustainable Use and Management of Soil, Sediment and Water Resources, 26–30 June 2017, Lyon, France. Presentation.
- ITVA (2018): Verhältnismäßigkeitsprüfung bei der Sanierungsuntersuchung. ITVA-Arbeitshilfe H1-16. https://www.itv-altlasten.de/fileadmin/user_upload/AH_H1-16_Verh%C3%A4ltnism%C3%A4%C3%9Figkeitsspr%C3%BCfung_bei_der_Sanierungsuntersuchung_web.pdf (18.02.2019).
- Kasperson, R.E., Kasperson, J.X. (1996): The social amplification and attenuation of risk. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science* 545, 95–105.
- Kopf, L. (2017): Nachweis und Bewertung leichtflüchtiger Fluortelomeralkohole in der Bodenluft eines PFC-belasteten Standortes. Duale Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe, Bachelorarbeit.
- LABO (2015): Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz Ständiger Ausschuss Altlasten – ALA. Ad-hoc Unterausschuss „Natürliche Schadstoffminderung. Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung. Positionspapier. Stand 15.09.2015. https://www.labo-deutschland.de/documents/2015_09_15-Endf_LABO-Pos-papier_Natuerl-Schadst.pdf (18.02.2019).
- LANUV (2017): Weitere Sachverhaltsermittlung bei Überschreitung von Prüfwerten nach der BBodSchV für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze. LANUV-Arbeitsblatt 22, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40022.pdf (14.03.2019)
- Lewis, R.E., Tyshenko, M.G. (2009): The impact of social amplification and attenuation of risk and the public reaction to Mad Cow Disease in Canada. *Risk Anal.* 5, 714–28.
- LfU Bayern (2018): Bodenbelastungen im Bereich Gendorf. https://www.lfu.bayern.de/altlasten/pfoa_gendorf/bodenbelastungen/index.htm (18.02.2018).
- Lipson, D., Raine, B., Webb, M. (2013): Transport of perfluorooctane sulfonate (PFOS) fractured bedrock at a well-characterized site. *Proceedings of SETAC-EU Conference, 2013 Glasgow, UK, May 12-16, 2013.*

- Liu, Z., Lu, Y., Wang, T., Wang, P., Li, Q., Johnson, A.C., Sarvajayakesavalu, S., Sweetman, A.J. (2016): Risk assessment and source identification of perfluoroalkyl acids in surface and ground water: Spatial distribution around a mega-fluorochemical industrial park, China. *Environment International* 91, 69–77.
- LUBW (2012): Ermittlung fachtechnischer Grundlagen zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung von langlaufenden Pump-and-Treat-Maßnahmen Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. <https://pudi.lubw.de/> (06.02.2020).
- LUBW (2016): PFC – Hintergrundgehalte in Böden - Untersuchungen an Standorten des Bodendauerbeobachtungs-Programms Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. <https://pudi.lubw.de/> (06.02.2020).
- LUBW (2017): PFC - Einträge in Böden durch Kompost und Klärschlamm - Bericht über die Probenahme- und Analysenkampagnen 2015/2016. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. <https://pudi.lubw.de/> (06.02.2020).
- McGuire, M.E., Schaefer, C., Richards, T., Backe, W.J., Field, J.A., Houtz, E., Higgins, C.P. (2014). Evidence of remediation-induced alteration of subsurface poly- and perfluoroalkyl substance distribution at a former firefighter training area. *Environ. Sci. Technol.* 48, 6644-6652.
- McKenzie, E. R., Siegrist, R. L., McCray, J. E., Higgins, C. P. (2015): Effects of chemical oxidants on perfluoroalkyl acid transport in one-dimensional porous media columns. *Environ. Sci. Technol.* 49, 1681-1689.
- NGWA (National Ground Water Association) (2017): Groundwater and PFAS: State of knowledge and practice: Field sampling and analyses. Section 5. <http://comments.ngwa.org/wp-content/uploads/2017/06/pfas-doc-section-5-field-draft.pdf> (10.04.2018).
- OECD (2018): Toward a new comprehensive global database of Per- and Polyfluoroalkyl substances (PFASs): Summary report on updating the OECD 2007 list of Per- and Polyfluoroalkyl substances (PFASs). Series on Risk Management No. 39. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO\(2018\)7&doclanguage=en](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO(2018)7&doclanguage=en) (06.02.2020).
- Oliaei, F., Kriens, D., Weber, R., Watson, A. (2013): PFOS and PFAS releases and associated pollution from a PFAS production plant in Minnesota (USA). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20, 1977-1992.
- Pidgeon, N.F., Hood, C., Jones, D., Turner, B.A., Gibson, R. (1992): Risk perception. In: Royal Society Study Group, editors.
- Reed, M. (2008): Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biol. Conserv.* 10, 2417-2431.
- RESCUE Consortium (2005): Best practice guidance for sustainable brownfield regeneration. Land Quality Press, a Division of Land Quality Management Ltd. www.missionbassinminier.org/typo3conf/ext/in_docs/dl.php?id=55.
- RP KA (2017): Pressemitteilung Regierungspräsidium Karlsruhe vom 15. März 2017. https://www.landkreis-rastatt.de/site/kreis-rastatt/get/documents_E1646865689/kreis-ras-tatt/Objekte/03_Aktuelles/PFC/PM%20RP_%20PFC_Anpassung%20Beurteilungswerte_15032017.pdf (12.03.2019).
- RP KA (2018a): Homepage Regierungspräsidium Karlsruhe <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpk/Abt5/Ref541/PFC/Seiten/Landwirtschaft.aspx> (12.03.2019).
- RP KA (2018b): Regierungspräsidium Karlsruhe (10.10.2018): Empfehlungen für die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen mit PFC Belastung. https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpk/Abt5/Ref541/PFC/Documents/pfc_landwirtschaft_empfehlung_2018.pdf (12.03.2019).
- RP KA (2018c): Regierungspräsidium Karlsruhe (05.10.2018): Vorgaben für die Beregnung in PFC-belasteten Gebieten für das Jahr 2019 aus wasser- und bodenschutzrechtlicher Sicht sowie aus landwirtschaftlicher und lebensmittelrechtlicher Sicht. https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpk/Abt5/Ref541/PFC/Documents/pfc_landwirtschaft_beregnungskonzept.pdf (14.03.2019).
- Slovic, P. (1987): Perceptions of Risk. *Science* 4798, 280–285.
- Slovic, P. (2003): Going beyond the redbook: The sociopolitics of risk. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 5, 1181–1190.
- Taniyasu, S., Yamashita, N., Yamazaki, E., Petrick, G., Kannan, K. (2013): The environmental photolysis of perfluorooctanesulfonate, perfluorooctanoate, and related fluorochemicals. *Chemosphere* 90, 1686–1692.
- TRGS 524 (2011): Technische Regeln für Gefahrstoffe: Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen. Ausgabe: Februar 2010, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2011 S. 1018-1019 [Nr. 49-51]

TrinkwV (2018): Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 3. Januar 2018 (BGBl. I S. 99).

UN-ISDR (United Nations–International Strategy for Disaster Reduction) (2002): Living with risk. A global review of disaster reduction initiatives. United Nations report, pp. 382.

US EPA (2005): Superfund community involvement handbook. Washington, D.C.: Office of Emergency and Remedial Response. EPA 540-K-05-003, April.

US EPA (2007): Risk communication in action: The risk communication workbook. Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, EPA/625/R-05/003. August.

Wattelle-Laslandes, G. (2018): Management of extended Per- and Polyfluoralkyl polluted site – Case study of Baden-Baden. ISA Yncrea, Lille, France. Master-Thesis.

Young, C.J., Mabury, S.A. (2010): Atmospheric perfluorinated acid precursors: Chemistry, occurrence, and impacts. In: de Voogt, P. (Ed.): Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 208, 1-109.