

LABO

**Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft
Bodenschutz**

**Vollzugshilfe zur Bewertung von
PAK-Kontaminationen beim
Wirkungspfad Boden-Grundwasser
in der bodenschutzrechtlichen Nachsorge**

Ständiger Ausschuss „Altlasten“ (ALA)

beschlossen auf der 69. LABO-Sitzung am 19./20. März 2026 in Bremen

Impressum

Herausgeber:

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)
unter dem Vorsitz der Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft der Freien Hansestadt Bremen
An der Reeperbahn 2
28217 Bremen
Tel.: +49 421 361 10707
E-Mail: labo-gs@umwelt.bremen.de
Homepage: www.labo-deutschland.de

Bearbeitung und Redaktion:

Gesprächskreis Schadstoffbewertung des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA)
bestehend aus folgenden Personen (erweiterter Personenkreis, z. T. zeitweise):

- Dr. Martin Biersack (BY, LfU)
- Dr. Cilia Derese (RP, LfU)
- Dr. Stefan Feisthauer (bis 2021, HE, HLNUG)
- Dr. Andrea Hädicke (bis 2025, NW, LANUV)
- Cosima Hillmert (BW, LUBW)
- Anja Nebelsiek (HH, BUKEA)
- Dr. Philipp Roth (NW, LANUK)
- Margit Salzmann (NI, GAA-HI)
- Dr. Gerhard Schmiedel (bis 2019, RP, LfU)
- Antje Sohr (SN, LfULG)
- Dr. Claudia Strobel (UBA)
- Ireen Werner (BB, LfU)
- Dr. Andreas Zeddel (SH, LfU)
- Volker Zeisberger (HE, HLNUG)

Obschaft:

Cosima Hillmert, Dr. Cilia Derese

Federführung:

Dr. Andreas Zeddel (SH, LfU)

Stand:

Juni 2026

Das Papier wurde durch die 69. LABO-Sitzung am 19./20. März 2026 in Bremen beschlossen.
Die UMK hat der Veröffentlichung des Papieres im Umlaufbeschluss 19/2026 vom 14.07.2026 zugestimmt.

Die Bearbeitung erfolgte auf Basis des Produktdatenblatt PDB ALA-11.

Lizensierung:

Der Text dieses Werkes wird, wenn nicht anders vermerkt unter, der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International zur Verfügung gestellt.

CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>)

Quellenangaben siehe jeweilige Abbildung, Abbildungen von der LABO haben keine Angaben

Zitiervorschlag:

LABO (2026): Vollzugshilfe zur Bewertung von PAK-Kontaminationen beim Wirkungspfad Boden-Grundwasser in der bodenschutzrechtlichen Nachsorge. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Boden (LABO). Online: <https://www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen-Altlasten.html>

Inhalt

1	Einführung	2
1.1	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK).....	3
1.2	Bewertungsgrundlagen.....	3
2	Entwicklung praxisgerechter Schwellenwerte.....	6
2.1	Vorbemerkung	6
2.2	Wahl der Schwellenwerte	6
2.3	Festlegung der Summenwerte für 3- und 4-Ring-PAK	6
3	Bewertungsempfehlung.....	8
3.1	Übersicht der Schwellenwerte	8
3.2	Schema zur Anwendung der Schwellenwerte	9
4	Fazit	11
5	Literatur.....	12
	Anlagen	13
Anlage 1	Beispiele von PAK-Konzentrationen im Grundwasser	13
Anlage 2	Ergänzende Begründungen des Vorgehens	14
E1	Zusammenhang zwischen LAWA GFS-Ableitung und Prüfwerteableitung	14
E2	Begründung der Geringfügigkeitsschwelle für „PAK, gesamt“	15
E3	Warum es keine Prüfwerte für Benzo[a]pyren (BaP) für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser in Anlage 2, Tabelle 3 der BBodSchV gibt.....	16
E4	Warum die Begründung der GFS für „PAK, gesamt“ nicht für die bodenschutzrechtliche Nachsorge geeignet ist	16
E5	Begründung der neuen Summenwerte für ‚PAK 2-8‘ und ‚PAK 9-10‘	17
E6	Plausibilitätsprüfung: Sind die Werteempfehlungen hinreichend konservativ?	19
E7	Analytische Hinweise für die Erstellung von Eluaten am Ort der Probennahme	20

Tabellen

Tabelle 1:	Empfehlungen für Schwellenwerte für PAK-Einzelsubstanzen und -Summen zur Beurteilung einer schädlichen Grundwasserveränderung mit PAK in der bodenschutzrechtlichen Nachsorge (n: Anzahl der aromatischen Ringe, WL: Wasserlöslichkeit in µg/l).....	8
Tabelle 2:	Beispiele von PAK-Konzentrationen im Grundwasser mit Zuweisung der Begrifflichkeit ‚Schädliche Grundwasserveränderung bezüglich der bodenschutzrechtlichen Nachsorge‘ gemäß den Schwellenwerten der Tabelle 1. Die Zuweisung auslösenden Parameter oder Summen sind eingefärbt.	13
Tabelle 3:	Humantoxikologisch und ästhetisch begründete Schwellenwerte für PAK-Einzelsubstanzen und -Summen zur Beurteilung einer schädlichen Grundwasserveränderung in der bodenschutzrechtlichen Nachsorge in Anlehnung an die GFS-Anwendungsgrundsätze.....	18

Abbildungen

Abbildung 1:	Schema zur Anwendung der Schwellenwerte der Tabelle 1 im Rahmen der Gefährdungsabschätzung	10
--------------	--	----

1 Einführung

1.1 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind eine Substanzklasse von mehreren hundert Einzelverbindungen, die aus miteinander verbundenen aromatischen Benzolringsystemen bestehen. Analytisch erfasst und aufsummiert werden in der Regel die 16 sogenannten ‚EPA-PAK‘ (PAK₁₆), die das Spektrum von Naphthalin mit zwei Ringen bis zu den höher molekularen PAK mit 5 und 6 Ringen umfassen.

PAK sind typische altlastenrelevante Schadstoffe und liegen in Boden und Grundwasser als Stoffgemische vor. Die Zusammensetzung der PAK bei Kontaminationen im Bereich von Kokereien, Gaswerken oder Teermischwerken/Teeröllagern schwankt; in der Regel dominieren die PAK mit 2-4 Ringen mit relativ hohen Wasserlöslichkeiten gegenüber den höher molekularen und gering wasserlöslichen PAK (siehe Tabelle 1). Gemäß ihrer Wasserlöslichkeit verändern sich die Verhältnisse der PAK untereinander bei einer Bodenpassage; dies verstärkt die Dominanz der 2-4 Ring-PAK bei Verunreinigungen des Grundwassers.

PAK sind unterschiedlich toxisch. Besonders gefährdend für den Menschen sind PAK mit kanzerogenem Potential. Auf Grund seiner besonderen toxikologischen Bedeutung wird das aus fünf Ringen gebildete Molekül Benzo(a)pyren (BaP) häufig als Bezugssubstanz für die Toxizität der anderen PAK oder eines ganzen Stoffgemisches herangezogen. Grundsätzlich gilt: die höher molekularen PAK₁₆ sind toxikologisch deutlich kritischer zu bewerten als die mit 2-4 Ringen.

Die gegenläufigen Unterschiede in den Wasserlöslichkeiten und in der Toxizität führen dazu, dass PAK im Grundwasser meist von toxikologisch weniger kritischen Einzelsubstanzen dominiert werden.

1.2 Bewertungsgrundlagen

Die folgenden Ausführungen ermöglichen eine differenzierte Bewertung von PAK gemäß diesen Stoffeigenschaften. Die Bewertung kann vorgenommen werden, wenn bezüglich des Wirkungspfades Boden-Grundwasser eine Überschreitung des PAK₁₅-Prüfwertes der BBodSchV festgestellt wurde. Für diese Bewertung werden die mit der Novellierung der BBodSchV vom 16.07.2021 vorgelegten Vorgehensweisen zu Grunde gelegt [1]. Diese stützen sich auf die LAWA-Veröffentlichung „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser“ [2] und den dort aufgeführten **Anwendungsgrundsätzen für die Gefahrenbeurteilung und -abwehr in der Nachsorge** (siehe auch **E1** der Ergänzenden Ausführungen in der **Anlage 2**).

Diese Anwendungsgrundsätze stellen eine wichtige Orientierung für Bewertungen beim Wirkungspfad Boden-Grundwasser dar. Danach soll die Anwendung der Prüfwerte am Ort der Beurteilung in erster Linie sicherstellen, dass die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleiteter Werte erfüllt werden. Die Anforderungen aus humantoxikologischer Sicht sind den Datenblättern zu den GFS-Werten zu entnehmen.

Sind **im Rahmen der Nachsorge** Stoffe relevant, deren GFS-Wert ökotoxikologisch begründet ist, dann ist im Einzelfall zu prüfen, ob die Schutzgüter Oberflächengewässer oder grundwasserabhängige Landökosysteme betroffen sein können ([2] siehe Kapitel 3.3 Punkt 5, sowie Verweis auf Kapitel 3.3 in Kapitel 3.1.2). Beeinflusstes Grundwasser unterhalb der Schwelle gesundheitlicher (oder sensorischer) Wirkungen löst trotz Überschreitung von Geringfügigkeitsschwellen (GFS) keinen weiteren Untersuchungs- oder Sanierungsbedarf aus, es sei denn, die Schutzgüter Oberflächenwasser bzw. grundwasserabhängige Landökosysteme wären betroffen.

Zur Nachvollziehbarkeit des hier vorgelegten Bewertungsansatzes ist zu beachten, dass die Regelungen zum Parameterspektrum PAK sich zwischen der BBodSchV und der LAWA-Veröffentlichung [2] unterscheiden.

Nach der BBodSchV von 2021 gelten für PAK folgende Prüfwerte:

- Naphthalin und Methylnaphthaline: 2 µg/l
- PAK₁₅ (PAK₁₆ ohne Naphthalin und Methylnaphthaline): 0,2 µg/l

Die LAWA-GFS-Veröffentlichung führt zusätzlich zu „PAK, gesamt“ von 0,2 µg/l weitere GFS zu ausgewählten PAK-Einzelstoffen auf¹ und schränkt die Bewertung des Parameters „PAK, gesamt“ insoweit ein: *„Die Geringfügigkeitsschwellen von Einzelstoffen bleiben hiervon unberührt“*.

Einzelheiten zur Begründung der Geringfügigkeitsschwelle für „PAK, gesamt“ finden sich in der Anlage 2 unter **E2**; zum Fehlen eines Prüfwertes für Benzo[a]pyren (BaP), siehe **E3**. Warum die Begründung der GFS für „PAK, gesamt“ nicht für die bodenschutzrechtliche Nachsorge geeignet ist, wird unter **E4** ausgeführt.

Der Ausgangspunkt dieser Vollzugshilfe ist, dass die BBodSchV neben dem Parameter PAK₁₅ keine weiteren (redundanten) Einzelparame-ter oder Parametersummen nennt. Für einige PAK-Einzelsubstanzen wie Fluoranthen ergibt sich daraus folgende Situation: Gemäß der LAWA-GFS-Veröffentlichung ist dessen Humantoxizität vergleichsweise gering (humantoxikologisch begründeter GFS-Wert 140 µg/l, siehe **E2** und **Tabelle 2** in der Anlage 2). Selbst bei einer deutlichen Unterschreitung von 140 µg/l würde eine Überschreitung des Prüfwertes „PAK, gesamt“ resultieren.

Daraus ergibt sich:

Eine Überschreitung des Prüfwertes von 0,2 µg/l für PAK₁₅ verbindet sich somit mit dem Prüfbedarf einer weitergehenden Betrachtung der humantoxikologischen Wirkung der einzelnen Parameter.

Der Prüfbedarf ergibt sich in den verschiedenen Fallgestaltungen, in denen auf den PAK-Prüfwert zugegriffen wird, also sowohl in der orientierenden Untersuchung wie in der Detailuntersuchung. Da der Prüfwert die Verrechtlichung der GFS für die wasser- wie bodenschutzrechtliche Nachsorge darstellt, ist ein solcher Prüfbedarf bzw. der hier beschriebene Bewertungsansatz auch zur Abgrenzung von Grundwasserfahnen bzw.

¹ Neben der GFS für „PAK, gesamt“ werden GFS für die Einzelstoffe Anthracen, Benzo[a]pyren, Dibenz[a,h]anthracen, Benzo[b]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Fluoranthen und die Summe Benzo[g,h,i]perylene + Indeno[1,2,3-cd]pyren ausgewiesen (siehe Anlage 2, Tabelle 2).

zur Bewertung von Grundwasserkontamination mit PAK im Bereich der Nachsorge geeignet.

Der Altlastenausschuss der LABO (ALA) bat auf seiner 60. Sitzung den Gesprächskreis Schadstoffbewertung, *„bezüglich PAK-Kontaminationen des Grundwassers im Rahmen bodenschutzrechtlicher Nachsorge eine Vorgehensempfehlung zur Schadensfeststellung im Sinne der Anwendungsgrundsätze des LAWA-GFS-Papiers von 2016 als Hilfestellung für den Vollzug auszuarbeiten.“*

2 Entwicklung praxisgerechter Schwellenwerte

2.1 Vorbemerkung

Die Entwicklungsüberlegungen beziehen sich auf die Auswahl und die Gruppierung von PAK aus der Gruppe der 16 EPA-PAK, die in die Werte der Tabelle 1 münden. Um diese nachzuvollziehen, werden im Folgenden die **Nummerierung der PAK verwendet, wie sie in der Tabelle 1** aufgelistet sind. Dabei gilt: Zur Bezeichnung eines **Einzel-PAK oder einer Summe aus Einzel-PAK wird die Nummer oder der Nummernbereich nicht tiefgestellt**. So ist ‚PAK.9-10‘ die Summe aus Benzo[a]anthracen und Chrysen. Tiefgestellte Nummern bezeichnen dagegen die PAK-Summen der BBodSchV. ‚PAK 16‘ ist nach Tabelle 1 Dibenzo[ah]anthracen und nicht die Summe PAK₁₆ aufgeführt in der Fußnote zu PAK₁₅ der BBodSchV.

2.2 Wahl der Schwellenwerte

Entsprechend der vorangegangenen Ausführungen sind aus der Gruppe der PAK 1 bis 16 möglichst wenige, jedoch aussagekräftige humantoxikologisch/sensorisch begründete Schwellenwerte in Form von Einzel- und Summenwerten abzuleiten (Tabelle 1). Ausgangspunkt ist der in der Begründung der GFS für „PAK, gesamt“ hinterlegte Bezug auf die Werte der TrinkwV. Diese werden hier als Schwellenwerte direkt übernommen. Damit ist der Summenwert **PAK 12-15** der vier gering wasserlöslichen 5- und 6-Ring-PAK mit 0,1 µg/l (TrinkwV) als Schwellenwert gesetzt. Daneben weist die TrinkwV für BaP (**PAK 11**) den Grenzwert von 0,01 µg/l aus. Dibenzo[ah]anthracen (**PAK 16**) weist eine vergleichbaren Kanzerogenität wie BaP auf; für diesen PAK wurde daher auch eine GFS von 0,01 µg/l ausgewiesen, die als Schwellenwert übernommen wird.

Mit diesen drei Schwellenwerten wird die Gruppe der gering wasserlöslichen PAK 11 bis 16 abschließend bewertet – die Berücksichtigung weiterer Einzelsubstanzen oder Summen, wie sie als GFS noch vorliegen, ist nicht praxisgerecht. Da die entsprechenden Werte der TrinkwV und bei PAK 16 dem GFS-Datenblatt entnommen sind, stellen sie den ersten Bewertungsschritt dar. Es ist zu erwarten, dass auf Grund der geringen Wasserlöslichkeiten im Grundwasser diese PAK nicht oder nur geringfügig bestimmt werden. Als Bestimmungsgrenze der Einzelsubstanzen ist < 0,01 µg/l dabei hinreichend und in der Regel erreichbar.

Der Schwellenwert zur Bewertung von Naphthalin und Methylnaphthalinen (**PAK 1**) entspricht dem Prüfwert der BBodSchV von 2 µg/l.

2.3 Festlegung der Summenwerte für 3- und 4-Ring-PAK

Für viele der häufig im Grundwasser anzutreffenden und in der Regel die PAK-Summe bestimmenden mobilen 3- und 4-Ring-PAK (PAK 2-10) liegen keine Datenblätter vor (siehe Tabelle 2). Ein Bezug nur auf die beiden GFS-Werte für Anthracen und Fluoranthen wäre nicht hinreichend und würde dem Risiko, das die mobilen PAK darstellen,

nicht gerecht. **Es bedarf daher einer ergänzenden Konvention**, um diese vergleichsweise mobilen und im Grundwasser fahnenbestimmenden PAK in ihrer humantoxikologischen Bedeutung einzuschätzen. Dazu werden zwei weitere Summenbildungen (**PAK 2-8 und PAK 9-10**) vorgenommen. Zur Begründung dieser Werte auf Grund angenommener kanzerogener Wirkungen siehe **E5**. Zur Plausibilitätsprüfung im Rahmen eines LFP-Projektes siehe **E6**.

Diese Werte sind nicht aus den GFS-Datenblättern ableitbar und werden daher im folgenden Schema (Abbildung 1) als nachgeordneter Prüfschritt dargestellt.

3 Bewertungsempfehlung

3.1 Übersicht der Schwellenwerte

Mit Hilfe der in der **Tabelle 1** aufgeführten humantoxikologisch/sensorisch begründeten Schwellenwerte können erhöhte PAK-Konzentrationen im Grundwasser im Rahmen der Gefahrenabwehr weitergehend beurteilt werden.

Tabelle 1: Empfehlungen für Schwellenwerte für PAK-Einzelsubstanzen und -Summen zur Beurteilung einer schädlichen Grundwasserveränderung mit PAK in der bodenschutzrechtlichen Nachsorge (n: Anzahl der aromatischen Ringe, WL: Wasserlöslichkeit in µg/l)

PAK-Nr.	Parameter	PAK-Schwellenwerte für die bodenschutzrechtliche Nachsorge	n	WL (siehe [5])
1	Naphthalin und Methylnaphthaline	2 µg/l	2	31700
2	Acenaphthylen	Summe* PAK 2-8 10 µg/l	3	3930
3	Acenaphthen		3	1930
4	Fluoren		3	1700
5	Phenanthren		3	1200
6	Anthracen		3	76
7	Fluoranthen		4	260
8	Pyren		4	77
9	Benzo[a]anthracen	Summe* PAK 9-10 0,5 µg/l	4	13
10	Chrysen		4	3
11 ^H	Benzo[a]pyren	0,01 µg/l	5	2,3
12	Benzo[b]fluoranthen	Summe* PAK 12-15 0,1 µg/l	5	1,2
13	Benzo[k]fluoranthen		5	0,8
14	Benzo[ghi]perylene		6	0,3
15	Indeno[1,2,3-cd]pyren		6	62
16	Dibenzo[ah]anthracen	0,01 µg/l	5	0,5
* Ergebnisse < Bestimmungsgrenze bleiben bei der Summenbildung unberücksichtigt, siehe § 24 (3) BBodSchV ^H Hinweis: Die Reihenfolge wurde gewählt, um die 4 TrinkwV-PAK als Block darzustellen; üblich ist in Prüfberichten die analytisch bedingte Reihenfolge, bei der BaP an 13. Stelle geführt wird				

Der Abgleich der drei Summenbildungen und der zwei Einzelstoffkonzentrationen mit den o. g. Schwellenwerten ist eine **Empfehlung für eine differenzierte Bewertung bei Überschreitung des PAK-Prüfwertes von 0,2 µg/l** für Einzelfälle, in denen keine relevanten Einträge in Oberflächengewässer oder grundwasserabhängige Landökosysteme anzunehmen sind.

Die Schwellenwerte können bei der Sickerwasserprognose nach BBodSchV angewendet werden (z. B. Eluatuntersuchungen am Ort der Probennahme, Prognosen der Stoffkonzentration am Ort der Beurteilung, Rückrechnungen aus Grundwasseruntersuchungen auf den Ort der Beurteilung; Darstellung der Vorgehensweisen siehe [3]).

Die Bewertung folgt in der Einzelfallbetrachtung dem Vergleich mit den Prüfwerten. Das heißt: **Der PAK-Prüfwert wird durch die Schwellenwerte nicht ersetzt;** eine (ggf. abgeschätzte) Unterschreitung des Prüfwertes der BBodSchV am Ort der Beurteilung (ggf. unter Berücksichtigung von § 12 Abs. 3, Satz 2 der BBodSchV, der Einmischungsprognose) gilt weiter als Verdachtsentkräftung, siehe Schema in Abbildung 1.

3.2 Schema zur Anwendung der Schwellenwerte

Aus dem nachfolgenden Schema (Abbildung 1) ergibt sich:

Liegt der Parameter ‚Naphthalin und Methylnaphthaline‘, eine der PAK-Summen oder die Einzelparameter PAK 11 oder PAK 16 **über dem entsprechenden Schwellenwert** der Tabelle 1, **so liegt im betrachteten Grundwasserkompartiment eine schädliche Grundwasserveränderung bezüglich PAK vor.**

Werden die o.g. Schwellenwerte derzeit und prognostisch (im Rahmen einer Sickerwasserprognose) **unterschritten** und sind gleichzeitig keine relevanten Einträge in Oberflächengewässer oder grundwasserabhängige Landökosystemen anzunehmen, **liegt im betrachteten Grundwasserkompartiment auch bei einer Überschreitung des PAK-Prüfwertes von 0,2 µg/l keine schädliche Grundwasserveränderung, und in der assoziierten ungesättigten Bodenzone damit auch keine schädliche Bodenveränderung, vor.**

Liegt im Grundwasser eine schädliche Gewässerveränderung durch PAK vor, können die Werte der Tabelle 1 weiter dazu verwendet werden, die Bereiche mit schädlichen Grundwasserveränderungen ein- und abzugrenzen.

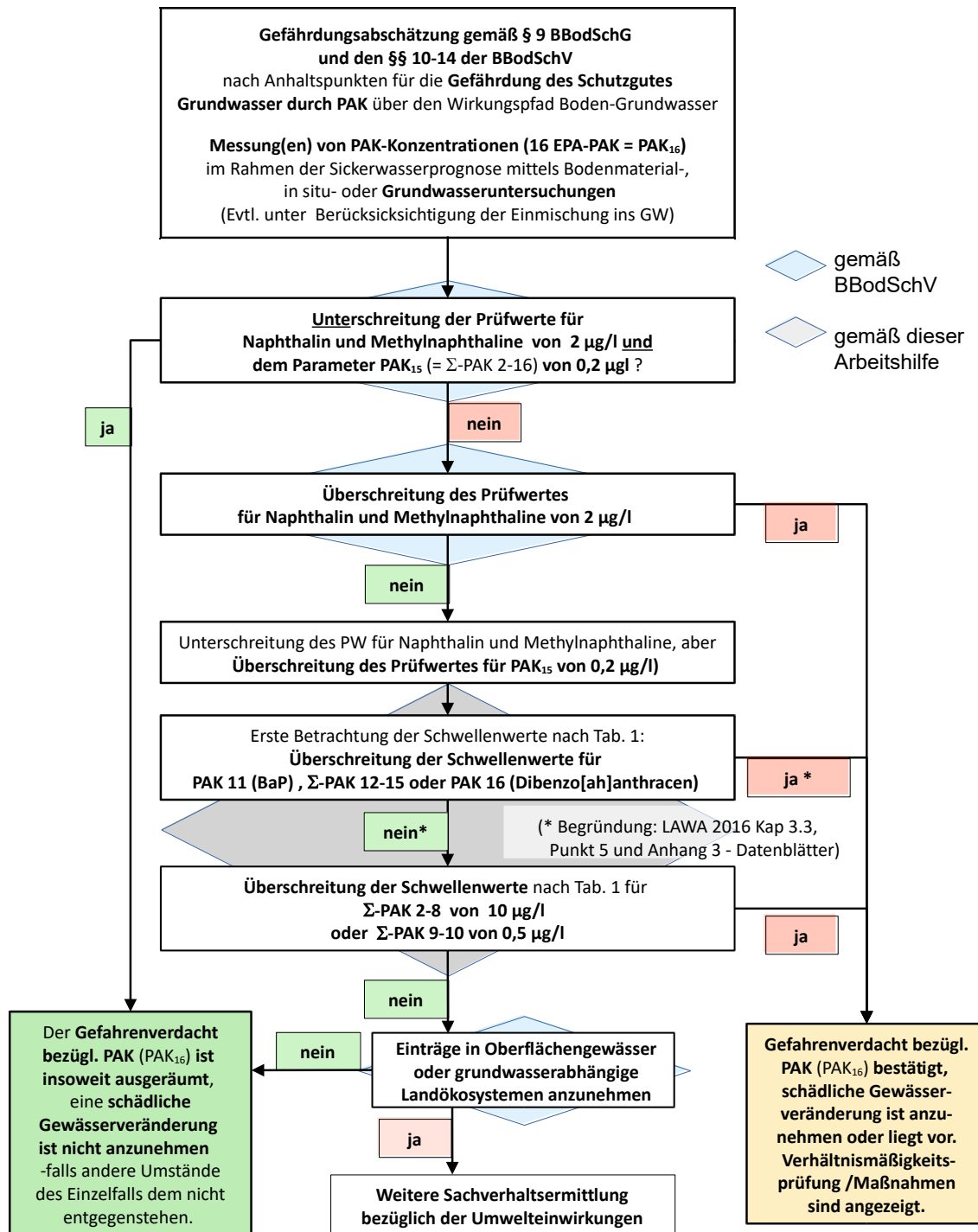


Abbildung 1: Schema zur Anwendung der Schwellenwerte der Tabelle 1 im Rahmen der Gefährdungsabschätzung

4 Fazit

Der PAK-Prüfwert von 0,2 µg/l (PAK₁₅), übernommen von der Geringfügigkeitschwelle für PAK gesamt, ist bezüglich kanzerogener PAK-Einzelsubstanzen in Anlehnung an die TrinkwV abgeleitet und für die Bewertung der kanzerogenen PAK hinreichend konservativ. Eine stoffdifferenzierte Betrachtung unter Verwendung der o. g. humantoxikologisch begründeten Schwellenwerte der Tabelle 1 ermöglicht eine vergleichbare konservative Bewertung von PAK-Gemischen im Grundwasser und kann für eine abschließende Bewertung herangezogen werden.

Bezüglich der bekannten kanzerogenen PAK 11 bis 16 ergeben sich dabei strengere Maßstäbe. Bezüglich der dominierenden mobilen PAK mit geringeren humantoxikologischen Wirkungen ergibt sich jedoch eine deutliche Anpassung an realistischere humantoxikologische Wirkgrößen.

Die Vollzugstauglichkeit dieser Differenzierung bei **Untersuchungen des Grundwassers auf PAK** ist gegeben, da die gegenüber dem Prüfwert niedrigeren Schwellenwerte für PAK 12-15 von 0,1 µg/l sowie für PAK 11 und PAK 16 von 0,01 µg/l in der Regel erst dann überschritten werden, wenn mobile PAK im Grundwasser in sehr hohen Konzentrationen vorkommen (PAK 1-8 > 50 µg/l).

Werden die o. g. Schwellenwerte auf **PAK-Konzentrationen im Eluat am Ort der Probennahme** bezogen, ist zu beachten, dass bei Eluatuntersuchungen die Abtrennung partikulärer von gelösten PAK ein kritischer bewertungsrelevanter Schritt ist. Hier können die gegenüber dem Prüfwert für PAK₁₅ ‚strengerer‘ Maßstäbe bezüglich der PAK 11 und 16 ggf. auch bei nur geringer Überschreitung dieses Prüfwertes weiter auf eine Gefährdung des Grundwassers hindeuten. Hinweise zur Analytik für diese Fallgestaltung finden sich bei **E7**.

Die Verwendung der genannten Schwellenwerte für weitere Abschätzungen zur Konkretisierung des § 15 Absatz 8 der BBodSchV (Berücksichtigung geringer Schadstofffrachten) ist möglich.

5 Literatur

- [1] Deutscher Bundestag, 2021: Verordnung der Bundesregierung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung (mit Begründung), Drucksache 19/29636, 12.05.2021 (<https://dserver.bundestag.de/btd/19/296/1929636.pdf>)
- [2] LAWa (2016): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser (<https://www.lawa.de/Publikationen-363-Grundwasser.html>; Direktlink zum Herunterladen des Dokuments bitte in Browser kopieren: https://www.lawa.de/documents/geringfueigigkeits_bericht_seite_001-028_1552302313.pdf). Hinweis: die Datenblätter können nicht online eingesehen werden.
- [3] LABO (2024): Arbeitshilfe zur Sickerwasserprognose (<https://www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen-Altlasten.html>; Direktlink zum Herunterladen des Dokuments bitte in Browser kopieren: https://www.labo-deutschland.de/documents/AH_Sickerwasserprognose_LABO.pdf)
- [4] Nisbet I.C.T. & LaGoy P.K. (1992): Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), Regulatory Toxicology and Pharmacology, Vol.6 (3), S. 290-300 (Link zum Herunterladen des Dokuments bitte in Browser kopieren: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/027323009290009X>)
- [5] UBA (2018): Ubiquitäre Schadstoffe – Eintragsinventare, Umweltverhalten und Eintragsmodellierung, Anhang 8 Stoffsteckbriefe, Forschungskennzahl 3714 21 200 0 (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ubiquitaere-schadstoffe-ein-tragsinventare>; Direktlink zum Herunterladen des Dokuments bitte in Browser kopieren: https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/1410/publikationen/2018-07-02_texte_52-2018_ubiquitaere-stoffe.pdf)
- [6] LFP-B 5.20 (2023): Analytik eines erweiterten PAK-Spektrums in Grundwasser kontaminierter Standorte zur Verifizierung eines Bewertungsansatzes entsprechender Grundwasserkontaminationen (<https://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/projektberichte/lab0/>; Direktlink zum Herunterladen des Dokumentes bitte in Browser kopieren: https://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/static/LFP/Da-teien/LABO/B_5.20_20230504%20GK_LFP%20B%205.20%20PAK%20Abschlussbericht.pdf)
- [7] Forschungsverbund „Bewertung von Schadstoffen im Flächenrecycling und nachhaltigen Flächenmanagement auf der Basis der Verfügbarkeit / Bioverfügbarkeit (BioRefine): Wissenschaftlicher Abschlussbericht Teilvorhaben 1 „Verfügbarkeit von Schadstoffen, innovative Flächennutzung und Verbundkoordination“ (Direktlink zum Herunterladen des Dokumentes bitte in Browser kopieren: <https://e-docs.tib.eu/files/e01fb11/659466996.pdf>)

Anlagen

Anlage 1 Beispiele von PAK-Konzentrationen im Grundwasser

Tabelle 2: Beispiele von PAK-Konzentrationen im Grundwasser mit Zuweisung der Begrifflichkeit 'Schädliche Grundwasserveränderung bezüglich der bodenschutzrechtlichen Nachsorge' gemäß den Schwellenwerten der Tabelle 1. Die Zuweisung auslösenden Parameter oder Summen sind eingefärbt.

			(reale Grundwasserkonzentrationen)			
PAK-Nr.	Stoff (Konz. in µg/l)	Schwellenwerte nach Tab. 1	Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3	Beispiel 4
1.	Naphthalin und Methylnaphthaline	2 µg/l	0,98	0,04	21	3,6
2.	Acenaphthylen	s. PAK 2-8	0,58	< 0,01	< 0,5	1,2
3.	Acenaphthen	s. PAK 2-8	4,7	4,2	1,8	29
4.	Fluoren	s. PAK 2-8	0,05	0,17	0,63	2,1
5.	Phenanthren	s. PAK 2-8	0,05	0,02	0,24	0,28
6.	Anthracen	s. PAK 2-8	0,007	0,015	0,015	0,08
7.	Fluoranthren	s. PAK 2-8	0,07	< 0,01	< 0,01	0,3
8.	Pyren	s. PAK 2-8	0,04	< 0,01	< 0,01	0,1
9.	Benzo[a]anthracen	s. PAK 9-10	0,008	< 0,01	< 0,01	0,025
10.	Chrysen	s. PAK 9-10	0,013	< 0,01	0,018	0,02
11.	Benzo[a]pyren	0,01 µg/l	<0,005	< 0,01	< 0,01	0,02
12.	Benzo[b]fluoranthren	s. PAK 12-15	0,004	< 0,01	< 0,01	0,04
13.	Benzo[k]fluoranthren	s. PAK 12-15	0,004	< 0,01	< 0,01	0,01
14.	Benzo[ghi]perylene	s. PAK 12-15	<0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
15.	Indeno[1,2,3-cd]pyren	s. PAK 12-15	<0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01
16.	Dibenzo[ah]anthracen	0,01 µg/l	<0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	PAK₁₅		5,53	4,4	2,72	33,2
Summen:	PAK 2-8	10 µg/l	5,5	4,4	2,7	33,1
	PAK 9-10	0,5 µg/l	0,021	0	0,018	0,05
	PAK 12-15	0,1 µg/l	0,008	0	0	0,05
	Schädliche Grundwasserveränderung bezüglich der bodenschutzrechtlichen Nachsorge:		-	-	+	+

Hinweis: Bei der Beispielrechnung wurde die Reihenfolge der PAK nach Tabelle 1 belassen (siehe dort Hinweis ^H). Die Reihenfolge der PAK aus Prüfberichten muss bei ähnlichen Zusammenstellungen und automatisierten Summenbildungen in einer Tabellenkalkulation ggf. angepasst werden.

Anlage 2 Ergänzende Begründungen des Vorgehens

E1 Zusammenhang zwischen LAWA GFS-Ableitung und Prüfwerteableitung

In der Begründung der Kabinettsfassung der BBodSchV wird auf die Wertesetzungen der Prüfwerte am Ort der Beurteilung näher eingegangen [1]. Danach stellen die Gefährdungsschwellen (GFS) der LAWA von 2016 [2] *„gemäß den zwischen den Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaften Bodenschutz (LABO), Wasser (LAWA) und Abfall (LAGA) konsentierten Anwendungsgrundsätzen zu den GFS (Kapitel 3.3) in den jeweils betroffenen Rechtsbereichen eine geeignete fachliche Grundlage für die Ableitung von Prüfwerten im Wirkungspfad Boden-Grundwasser dar.“*

Die in Kapitel 3.3 der LAWA GFS-Ableitung aufgeführten Grundsätze werden in der Begründung der BBodSchV bei [1] wie folgt hervorgehoben: *„Mit Blick auf die Anforderungen des BBodSchG für Prüfwerte (§ 8 Absatz 1 Nummer 1 BBodSchG) müssen diese geeignet sein, schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten im Sinne des § 2 Absatz 2 Nummer 3 bzw. 5 BBodSchG zu identifizieren. Zu deren Definition gehört es, dass Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeigeführt werden können. Gefahren oder erhebliche Nachteile für die Allgemeinheit liegen vor, wenn Grundwasser nicht mehr als Trinkwasser nutzbar ist, auch für den Fall, dass das Grundwasser aktuell einer solchen Nutzung nicht unterliegt. **Durch die Anwendung der Prüfwerte am Ort der Beurteilung muss daher in erster Linie sichergestellt werden, dass die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleiteter Werte erfüllt werden. Die Anforderungen aus humantoxikologischer Sicht können den Datenblättern zu den GFS-Werten (LAWA, 2016) entnommen werden. Die humantoxikologisch begründeten GFS-Werte werden daher unverändert als Prüfwerte übernommen. Im Hinblick auf die ökotoxikologischen Kriterien wird im Rahmen der bodenschutzrechtlichen Nachsorge die Gefahrenschwelle erst dann überschritten, wenn Grundwasser als Basisabfluss von Oberflächenwasser oder durch die Beeinflussung von grundwasserabhängigen Landökosystemen zu einer Schädigung oder erheblichen Belästigung dieser Schutzgüter führt, siehe Kapitel 3.3 Nummer 5 der GFS-Anwendungsgrundsätze.“***

In der bodenschutzrechtlichen Nachsorge ist somit eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit, deren nachteilige Wirkung insbesondere für Grundwasserorganismen zu besorgen ist, nicht als schädliche Grundwasseränderung anzusehen.

E2 Begründung der Geringfügigkeitsschwelle für „PAK, gesamt“

Die Geringfügigkeitsschwelle für „PAK, gesamt“ von 0,2 µg/l wird zuerst mit humantoxikologisch Daten als auch mit umwelthygienischen Argumenten begründet; bei der Höhe der GFS sind möglicherweise auch die aufgeführten ökotoxikologischen Kriterien eingeflossen [2]. Die Spanne der humantoxikologischen Wirkungen ist sehr groß, da einige PAK kanzerogene Wirkungen aufweisen (allen voran das stark kanzerogene **Benzo[a]pyren (BaP)**), während andere PAK geringere, teilweise auch höhere kanzerogene Wirkungen zeigen als BaP und wieder andere keine solchen Wirkungen aufweisen.

Gemäß der Erläuterung im Datenblatt des Anhang 3 der LAWA-Veröffentlichung zu „PAK, gesamt“ wird *„bei der Festlegung des Summenwertes für PAK der Grenzwert der TrinkwV für von 0,1 µg/l für die Summe von 4 Einzelstoffen zugrunde gelegt“*. Es handelt sich um die beiden 5-Ring-PAK Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren und die beiden 6-Ring-PAK Benzo[ghi]perylen und Indeno[1,2,3-cd]pyren. Dieser von der LAWA zitierte Grenzwert ist identisch mit dem der TrinkwV vom 20.6.2023². Alle anderen 11 PAK-Einzelstoffe werden nach der Ausführung des Datenblatts ebenfalls mit einem Wert von in Summe 0,1 µg/l berücksichtigt, woraus sich die GFS von 0,2 µg/l ergibt.

Der maßgebliche Vorschlag für die Höhe der GFS ergibt sich somit nicht direkt aus der TrinkwV – insbesondere mit Blick auf die analog zur TrinkwV abgeleiteten humantoxikologisch begründeten Werte weiterer PAK-Einzelsubstanzen. So wird im Datenblatt zu Fluoranthren z. B. ein humantoxikologisch abgeleiteter Wert von 140 µg/l angegeben. Eine deutliche Unterschreitung dieser Konzentration kann immer noch den o. g. Wert von 0,2 µg/l erheblich überschreiten, ohne dass damit ein Risiko für den Menschen beim Konsum des Wassers verbunden wäre.

In der Erläuterung der GFS von „PAK, gesamt“ wird der Hinweis gegeben: *„Die Geringfügigkeitsschwellen von Einzelstoffen bleiben hiervon unberührt“*, d. h. sie gelten ebenfalls. Nur mit Blick auf die ökotoxikologische Begründung des GFS-Wertes für Fluoranthren von 0,1 µg/l führt dies nicht zu einem direkten Widerspruch; in der bodenschutzrechtlichen Nachsorge folgt aus diesem Hinweis jedoch, dass Fluoranthren als Teil des PAK-Summenwertes „PAK, gesamt“ humantoxikologisch um Größenordnungen zu streng bewertet wird.

Mit der Übernahme der GFS von 0,2 µg/l als Prüfwert der BBodSchV für PAK₁₅ ist auf sich überschneidende Parameter verzichtet worden. Auch wurde keine Erweiterung auf andere Stoffgruppen vorgenommen³.

² Bemerkung zum Parameter „PAK“ der TrinkwV: „Summe der folgenden nachgewiesenen und mengenmäßig bestimmten Stoffe: Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren, Benzo[ghi]perylen und Indeno[1,2,3-cd]pyren. Messwerte für die Einzelsubstanz, die unterhalb der Bestimmungsgrenze des jeweiligen Untersuchungsverfahrens liegen, werden bei der Summenbildung nicht berücksichtigt.“

³ In der Fußnote zur GFS für „PAK, gesamt“ wird zwar auf die Regelanalytik der PAK₁₆ nach EPA verwiesen, jedoch mit dem Zusatz „ggf. unter Berücksichtigung weiterer relevanter PAK (z. B. aromatische Heterozyklen wie Chinoline)“ eine weitere unüberschaubare Stoffgruppe mit tausenden von Einzelverbindungen mit adressiert.

E3 Warum es keine Prüfwerte für Benzo[a]pyren (BaP) für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser in Anlage 2, Tabelle 3 der BBodSchV gibt

Bei Benzo[a]pyren könnte theoretisch bei Unterschreitung des PAK-Prüfwertes von 0,2 µg/l die GFS für BaP von 0,01 µg/l ggf. überschritten sein. Auf Grund der typischen Dominanz von mobilen PAK im Grundwasser von altlastverdächtigen Flächen und Verdachtsflächen (Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen) tritt diese Fallkonstellation real nicht auf. Daher ist der Prüfwert der BBodSchV für PAK₁₅ auch mit Blick auf die üblicherweise vorliegende typische Dominanz mobiler gegenüber gering mobilen (kanzerogenen) PAK hinreichend konservativ.

E4 Warum die Begründung der GFS für „PAK, gesamt“ nicht für die bodenschutzrechtliche Nachsorge geeignet ist

Das Datenblatt zu „PAK, gesamt“ verweist bei der erläuternden Betrachtung der ‚Humantoxikologischen Bewertung‘ auf ein Schreiben des Bundesgesundheitsamtes, nachdem unter Verweis auf die TrinkwV auch andere PAK in den Summengrenzwert von 0,1 µg/l für die 4 PAK der TrinkwV aufgenommen werden können. Der Verweis auf den vorsorgeorientierten Anspruch der TrinkwV (§ 6, Abs. 3), wonach grundsätzlich die Konzentration chemischer Stoffe im Trinkwasser so niedrig gehalten werden sollte, wie dies nach den Regeln der Technik mit vertretbarem Aufwand möglich ist, ist als Maßstab der Gefahrenabwehr nicht ausreichend. Damit ist die GFS für „PAK, gesamt“ nicht im gleichen Sinne humantoxikologisch begründet, wie andere Parameter und führt im Bereich der bodenschutzrechtlichen Nachsorge zur Möglichkeit der weiteren Betrachtung der Zusammensetzung der PAK im konkreten Einzelfall.

E5 Begründung der neuen Summenwerte für ‚PAK 2-8‘ und ‚PAK 9-10‘

Grundlage der Schwellenwerte für diese beiden PAK-Summen sind insbesondere mögliche krebserregende Wirkungen auf Basis von Toxizitätsäquivalentfaktoren bezogen auf Benzo[a]pyren (BaP = 1), wie sie in der letzten Spalte der Tabelle 3 aufgeführt sind (TEF, Abschätzung nach Nisbet und LaGoy [4]). Ein Wert von 0,1 entspricht der Annahme, dass Benzo[a]pyren 10-fach krebserregender als dieser Stoff sei (bei einem Langzeit-Zusatzrisiko für Krebs von 10^{-6}).

Nicht krebserregenden PAK wird nach dem Konzept von Nisbet und LaGoy ein **TEF von 0,001** zugeordnet, auch wenn hier die humantoxikologischen Daten eine krebserregende Wirkung der Einzelstoffe nicht belegen. Der Worst-Case-Annahme von einem tausendstel der Wirkung von BaP entspricht einem tausendfach höheren Schwellenwert, also $0,01 \mu\text{g/l} \cdot 1000 = 10 \mu\text{g/l}$.

Durch die Summenbildung der PAK 2-8 mit einer Schwelle im Grundwasser von 10 $\mu\text{g/l}$ werden die Unsicherheiten der gesundheitlichen Bewertung dieses Stoffgemisches abgebildet; rechnerisch wäre dies der Schwellenwert für jeden Einzelstoff mit einem TEF von 0,001. Das Vorgehen ähnelt dem der TrinkwV und reduziert die zu betrachtenden Stoffe und Stoffgemische.

Eine Überschreitung des rechnerischen Anthracen-Wertes nach Nisbet und LaGoy von 1 $\mu\text{g/l}$ (100-facher Schwellenwert von BaP wegen TEF 0,01) ist auf Grund der üblichen Zusammensetzung der PAK im Grundwasserabstrom einer Altlast typischerweise mit einer Überschreitung des Summenwertes PAK 2-8 verbunden. Das Datenblatt zur GFS von Anthracen weist zudem eine gesundheitliche Wirkungsschwelle von 2000 $\mu\text{g/l}$ aus, im Textteil des Datenblattes wird der Wert von 1 $\mu\text{g/l}$ auf Grundlage der Abschätzung nach Nisbet und LaGoy diskutiert, jedoch nicht herangezogen. Dies stützt einerseits die hier dargestellte Vorgehensweise der Verwendung der genannten Toxizitätsäquivalentfaktoren und verdeutlicht andererseits, dass durch **die hier vorgenommene zusätzliche Summenbildung insgesamt eine Wertesetzung ‚auf der sicheren Seite‘ vorgenommen** wurde.

Die PAK-Summe PAK 9-10 bewertet zwei Stoffe mit verminderter Wasserlöslichkeit und ist entsprechend der TEF und den weiteren Schwellenwerten gestuft.

Die gewählten TEF und daraus errechneten Konzentrationen sind der folgenden Tabelle 3 zu entnehmen. Zum Vergleich sind die jeweiligen GFS-Grunddaten aus den GFS-Datenblättern aufgeführt.

Tabelle 3: Humantoxikologisch und ästhetisch⁴ begründete Schwellenwerte für PAK-Einzelsubstanzen und -Summen zur Beurteilung einer schädlichen Grundwasserveränderung in der bodenschutzrechtlichen Nachsorge in Anlehnung an die GFS-Anwendungsgrundsätze

PAK-Nr.	Stoff	Humantoxisch/Ästhetisch begründete Schwellenwerte		TEF x GFS BaP	TEF
		GFS-Datenblätter	Empfehlung für den Vollzug (gemäß Tabelle 1)	[µg/l]	
1	Naphthalin und Methylnaphthaline	2 µg/l	2 µg/l	10	0,001
2	Acenaphthylen	-	Summe PAK2-8: 10 µg/l	10	0,001
3	Acenaphthen	-		10	0,001
4	Fluoren	-		10	0,001
5	Phenanthren	-		10	0,001
6	Anthracen	2000 µg/l		1	0,01
7	Fluoranthren	140 µg/l		10	0,001
8	Pyren	-		10	0,001
9	Benzo(a)anthracen	-	Summe PAK9-10: 0,5 µg/l	0,1	0,1
10	Chrysen	-		1	0,01
11	Benzo(a)pyren	0,01 µg/l	0,01 µg/l	0,01	1
12	Benzo(b)fluoranthren	Summe: 0,1 µg/l	Summe: 0,1 µg/l	0,01	1
13	Benzo(k)fluoranthren			0,1	0,1
14	Benzo(ghi)perylen			1	0,01
15	Indeno(1,2,3-cd)pyren			0,1	0,1
16	Dibenzo(ah)anthracen	0,01 µg/l	0,01 µg/l	0,01	1 (5)
Grau: Empfehlung entspricht GFS-Datenblatt (LAWA 2016) Dunkelgrau: Empfehlung entspricht GFS-Datenblatt (LAWA 2016) und der TrinkwV 2023, TEF: Toxizitätsäquivalentfaktoren nach [4])					

⁴ Die GFS für Naphthalin und Methylnaphthaline ist („ausschlaggebend“) ästhetisch begründet.

E6 Plausibilitätsprüfung: Sind die Werteempfehlungen hinreichend konservativ?

Bei der Ableitung dieser den Prüfwert für PAK₁₅ ergänzenden Summenwerte für eine Teilfraktion der PAK₁₅ war zu berücksichtigen, dass bei typischen Altlastenfällen nur ein Ausschnitt einer Kontamination verschiedener polyzyklischer aromatischer Verbindungen bewertet wird. Da es eine Reihe kanzerogener PAK gibt, die nicht Teil der PAK₁₆ sind, wurde im Rahmen eines LFP-Projektes Informationen über weitere PAK-Einzelsubstanzen, die nicht zu den 16 EPA-PAK zählen, im Grundwasserabstrom von Altlasten gesammelt und ausgewertet. 68 PAK-Substanzen konnten über entsprechende Standards quantifiziert werden. Es wurden 22 Grundwasserproben von 8 unterschiedlichen Standorten mit verschiedener PAK-Eintragsgenese in das Grundwasser untersucht.

Die Grundwässer wiesen PAK₁₅-Kontaminationen im Bereich von 20 – 500 µg/l auf; die Einzelsubstanzen sollten so weit möglich unter 0,05 µg/l quantifiziert werden. Die Universität Münster analysierte diese 68 PAK-Verbindungen mittels GC-APLI-MS⁵ und GC-MS mit 3-fach-Messung und 7-Punkt-Kalibrierung [6]. Neben der Quantifizierung dieser Einzelverbindungen wurde eine non-Target-Analytik insbesondere mit Blick auf die alkylierten Naphthaline, Fluorene, Phenanthrene und Pyrene durchgeführt und die Alkyliertenverteilung der PAK-Profile untersucht. Die Spezialanalytik zeigte, dass in PAK-Grundwasserfahnen in erster Linie die bereits bekannten 2-, 3- und 4-Ring-PAK (PAK 1-10) auftreten. Zusätzlich konnten alkylierte Derivate dieser PAK ermittelt werden. PAK mit bekanntermaßen hoher humantoxischer Wirkung, vergleichbar mit der von Benzo[a]pyren, wurden nicht nachgewiesen, einzelne PAK mit bekannten TEF (≤ 0,1) nur in Spuren (z.B. 1-Methylpyren).

Die Versuchsergebnisse belegen, dass der in der Altlastenbearbeitung etablierte Analysenumfang von PAK₁₆ bezüglich der untersuchten Grundwasserproben aus typischen PAK-Fahnen von Altlasten das humantoxikologisch relevante Spektrum hinreichend umfänglich darstellt.

Die Ergebnisse geben keinen Hinweis darauf, dass die Einführung humantoxikologisch begründeter zusätzlicher Summenwerte für die Bewertung von PAK₁₆-Grundwasserverunreinigungen gemäß Tabelle 1 zu einer Unterschätzung der humantoxikologischen Relevanz weiterer PAK-Einzelsubstanzen führen könnte.

Trotz der im LFP-Projekt verwendeten Spezialanalytik konnten auch in belasteten Grundwässern in nur sehr wenigen Fällen überhaupt PAK der Stoffsumme PAK 11-16 bestimmt werden. In 11 der 22 Grundwasserproben war BaP nachweisbar, fast ausschließlich in Kombination mit hohen Naphthalinkonzentrationen von über 100 µg/l. Die mit PAK belasteten Grundwässer belegten eindrücklich die Diskriminierung der gering mobilen PAK nach der Bodenpassage und die Dominanz von mobilen PAK bei Grundwasserschäden mit dieser Stoffklasse.

⁵ atmospheric pressure laser ionization-mass spectrometry

E7 Analytische Hinweise für die Erstellung von Eluaten am Ort der Probennahme

Um eine möglichst realitätsnahe Sickerwasserkonzentration bei PAK-Kontaminationen des Bodens abzubilden, wird bei Schüttelversuchen empfohlen, die in der DIN 19529 hinterlegten Angaben zur Zentrifugationskraft in Abhängigkeit der Zentrifugationsdauer heranzuziehen, um grundsätzlich den bestmöglichen Abscheidegrad zu erhalten (maximal 30 min. bei 20.000 g oder vergleichbar gemäß Abbildung A.1 der DIN 19529).

Der starke Zusammenhang zwischen Trübung und der im Eluat gemessenen PAK-Konzentration führt zu der Empfehlung, den normativ erlaubten maximalen Abscheidegrad auszuschöpfen, selbst wenn die Trübung nach kürzerer Zentrifugationsdauer schon < 20 FNU betragen sollte, was gemäß Norm ausreichend wäre. Ein Eluat mit einer Trübung < 10 FNU wird regelmäßig zu geringeren PAK-Konzentrationen führen als die gleiche Elutionslösung zentrifugiert auf ‚nur‘ $10 < \text{FNU}_{\text{Probe}} < 20$. Normativ verbindlich ist der maximale Abscheidegrad.

Gemäß der aktuellen Fassung der DIN 19529:2023-07 kann als Elutionsmittel eine 0,001 molare Calciumchlorid-Lösung verwendet werden: dies empfiehlt sich, da damit nachweislich geringere Trübungen auftreten.

Wird bei Schüttelversuchen die Trübung von 20 FNU nach der o. g. Zentrifugation nicht unterschritten, sind die Ergebnisse aus Eluatanalysen ggf. nicht hinreichend interpretierbar; ein Säulenversuch kann dann ggf. besser interpretierbare Ergebnisse liefern.

Säulenversuche nach DIN 19528 liefern in der Regel realitätsnahe mobilisierbare PAK-Konzentrationen. Das Perkolat nach Säulenversuch führt bei gleichem Bodenmaterial ggf. zu geringerer Trübung als das entsprechende Schüttelamat, und die PAK-Konzentrationen der Perkolate können somit entsprechend niedriger sein als die aus den Schüttelamaten.

Beispielhaftes Ergebnis aus dem BMBF-Forschungsverbund BioRefine, Teilvorhaben 1 [7]: Boden eines ehemaligen Gaswerkstandortes mit 99 mg PAK₁₆/kg;

- Konzentration nach 2:1 Schüttelamat: 36 µg PAK₁₆/l (FNU 14)
- Konzentration nach Säulentest: 2,7 µg PAK₁₆/l (FNU 1,9)

Die **Analytik von PAK** aus Eluaten und Perkolaten sollte nach DIN 38407-39:2011-09 (GC-MS-Verfahren) erfolgen. Sie stellt das für diese Matrix geeignete Verfahren zum Erreichen von Bestimmungsgrenzen von ca. 0,01 µg/l für die PAK-Einzelverbindungen dar.