



Bewertung von Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bezüglich des Wirkungspfad Boden-Mensch

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Veranlassung	4
3.	Erläuterung zu den Prüfwerten für PAK	5
4.	Anwendungshinweise der Prüfwerte für PAK	6
4.1.	Orientierende Untersuchung	6
4.1.1.	Prüfung der PAK-Muster	7
4.1.2.	Prüfung der Summe der Toxizitätsäquivalente	8
4.1.3.	Bewertung der ermittelten Prüfungsergebnisse	8
4.1.4.	Anwendungsbeispiel auf Stufe OU	9
4.2.	Detailuntersuchung	11
4.2.1.	Untersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit.....	11
4.2.2.	Bestimmung der mittleren RV aus den RV-Daten der höhermolekularen PAK	12
4.2.3.	Anwendung der gemittelten RV auf die BaP-Messwerte und Bewertung anhand der Prüfwerte.....	12
4.2.4.	Anwendungsbeispiel auf Stufe DU	12
5.	Quellen	14

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Rechnerische Ableitung der Prüfwerte für PAK
Anlage 2:	Tabelle 7: 16 EPA-PAK mit ihren Abkürzungen, Formeln, Wasserlöslichkeiten [mg/L] und Hinweisen auf das kanzerogene Potential (Toxizitätsäquivalentfaktor, TEF) im Verhältnis zu BaP. Die Reihenfolge entspricht der typischen Elutionsfolge nach einer Gaschromatographie-(GC) Trennung und damit der Reihenfolge der Stoffe in den PAK-Mustern ([2], [6])
Anlage 3:	Abbildung 1: PAK-Muster an typischen Standorten: Kokerei (a und b), Gaswerk (c und d) und Teermischwerk (e und f). Gezeigt sind die PAK-Muster der 16 EPA-PAK und die der höhermolekularen PAK an einem Standort.
Anlage 4:	Tabelle 8: Vorkommen von PAK in Bodenproben typischer Standorte relativ zu BaP (nach [2] und [3]; höhermolekulare PAK sind grau hinterlegt)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	PAK-Muster an typischen Standorten: Kokerei (a und b), Gaswerk (c und d) und Teermischwerk (e und f). Gezeigt sind die PAK-Muster der 16 EPA-PAK und die der höhermolekularen PAK an einem Standort. Die Werte sind auf BaP normiert (BaP=1) (nach [2])	20
--------------	---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	PAK-Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch (Anlage 2, Tabelle 4 BBodSchV (2021) ³ , [4])	5
Tabelle 2:	Anteils-Obergrenzen für PAK-Einzelsubstanzen im Boden bezogen auf den BaP-Gehalt im Boden als Charakterisierung einer (noch) typischen PAK-Zusammensetzung, [6], [1].....	8
Tabelle 3:	Beispiel zur Prüfung der PAK-Muster mit Normierung der PAK-Messwerte auf BaP und deren Vergleich mit den Anteils-Obergrenzen im Boden bezogen auf den BaP-Gehalt	10
Tabelle 4:	Beispiel zur Ermittlung der Toxizitätsäquivalente zur Prüfung des Anteils von BaP an der Summe der Toxizitätsäquivalente nach [8].....	10
Tabelle 5:	Ergebnisse einer beispielhaften RV-Prüfung einer Kinderspielfläche [nach [8] und [9]]	13
Tabelle 6:	Prüfwertvorschläge für Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	17
Tabelle 7:	16 EPA-PAK mit ihren Abkürzungen, Formeln, Wasserlöslichkeiten [mg/L] und Hinweisen auf das kanzerogene Potential (Toxizitätsäquivalentfaktor, TEF) im Verhältnis zu BaP. Die Reihenfolge entspricht der typischen Elutionsfolge nach einer Gaschromatographie-(GC) Trennung und damit der Reihenfolge der Stoffe in den PAK-Mustern ([2], [8])	19
Tabelle 8:	Vorkommen von PAK in Bodenproben typischer Standorte relativ zu BaP (nach [2] und [5]; höhermolekulare PAK sind grau hinterlegt)	21

1. Einleitung

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind eine Substanzklasse von mehreren 100 Einzelverbindungen. Die Verbindungen bestehen aus miteinander verbundenen aromatischen Benzolringsystemen. Analytisch erfasst und aufsummiert werden, stellvertretend für die ganze Stoffgruppe, die 16 so genannten ‚EPA-PAK‘ (PAK₁₆)¹, die das Spektrum von Naphthalin mit nur zwei Ringen bis zu den höher molekularen PAK mit 5 und 6 Ringen umfassen (siehe Tabelle 7 in Anlage 2).

PAK entstehen bei der Erhitzung bzw. Verbrennung von organischen Materialien unter Sauerstoffmangel (unvollständige Verbrennung). Nur wenige PAK-Verbindungen, z. B. Pyren und Anthracen werden als Einzelverbindungen großtechnisch hergestellt bzw. aus Rohölfractionen und in der Kokerei gewonnen und wirtschaftlich genutzt.

Aufgenommen werden PAK vom Menschen insbesondere inhalativ (bspw. Einatmen von belastetem Staub, Tabakrauch oder Kraftfahrzeugabgasen), dermal (Hautkontakt mit bspw. verunreinigten Werkzeug- und Fahrradgriffen oder mit belastetem Boden) und oral (Verzehr bestimmter belasteter Lebensmittel wie bspw. Räucherwaren oder Verschlucken von verunreinigtem Boden durch Kleinkinder).

Die Toxizität der PAK-Einzelkomponenten ist unterschiedlich hoch (siehe Tabelle 2). Besonders gefährdend für den Menschen sind PAK mit kanzerogenem (krebserzeugendem oder -förderndem) Potential. Benzo(a)pyren wird aufgrund seiner stark kanzerogenen Wirkung und der im Vergleich guten Kenntnislage häufig parallel zu den PAK₁₆ gelistet und als Einzelsubstanz bewertet.

2. Veranlassung

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) liegen in der Umwelt immer als PAK-Gemische vor. Bisher enthielt die BBodSchV (1999)² lediglich Prüfwerte für Benzo(a)pyren als Einzelsubstanz. Im Gegensatz dazu sind in der novellierten BBodSchV (2021)³ Prüfwerte für die Gruppe der PAK mit Benzo(a)pyren (BaP) als stellvertretende Bezugssubstanz für die toxische Wirkung von PAK-Gemischen festgelegt.

¹ Bereits in den 1980er Jahren hat die amerikanische Bundesumweltbehörde (US EPA) aus den mehrere hundert zählenden PAK-Einzelverbindungen 16 Substanzen in die Liste der „Priority Pollutants“ aufgenommen. Diese 16 „EPA-PAK“ werden seitdem weltweit hauptsächlich und stellvertretend für die ganze Stoffgruppe analysiert.

² Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.

³ Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (Artikel 2 V. v. 9. Juli 2021 BGBl. I S. 2598, 2716 (Nr. 43))

Tabelle 1: PAK-Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch (Anlage 2, Tabelle 4 BBodSchV (2021)³, [4])

	Kinderspiel- flächen	Wohn- gebiete	Park- und Freizeitanlagen	Industrie- und Gewerbegrundstücke
	[mg BaP/kg TM]			
PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren (BaP)	0,5	1	1	5

Für die Ableitung der PAK-Prüfwerte wurden Daten konkreter PAK-Gemische von typischen Standorten/Branchen wie ehemaligen Kokereien, ehemaligen Gaswerksgeländen und ehemaligen Teermischwerken/ -öllagern verwendet, mit dafür typischen PAK-Mustern. Bei der Anwendung der PAK-Prüfwerte muss daher geprüft werden, ob das PAK-Muster der untersuchten Bodenprobe sowie der Anteil von Benzo(a)pyren an der Summe der Toxizitätsäquivalente mit dem PAK-Muster des für die Ableitung zugrundeliegenden PAK-Gemisches der jeweilig relevanten Branche vergleichbar ist.

3. Erläuterung zu den Prüfwerten für PAK

In der BBodSchV (1999)² war für den Wirkungspfad Boden-Mensch (direkter Kontakt) aus der Stoffgruppe der PAK je Nutzungsszenario lediglich ein Prüfwert für BaP als Einzelsubstanz festgelegt worden (in Höhe von 2 mg BaP/kg für Kinderspielflächen und den üblichen Abstufungen zu den anderen Nutzungsarten). Auf die Ableitung von Werten für andere PAK-Einzelsubstanzen und/oder eines Summenwertes wurde 1999 wegen der unzureichenden Datengrundlage verzichtet.

Für die BBodSchV (2021)³ wurde die Festlegung eines Prüfwertes angestrebt, der die toxische Wirkung aller PAK bei Gemischen mit branchentypischen PAK-Mustern abdeckt.

Grundlage für die PAK-Prüfwerte der BBodSchV (2021)³ ist die 1999 von der FoBiG GmbH im Auftrag des UBA erstellte Studie „Grundlagen für die Bewertung von Kontaminationen des Bodens mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, Teile A und B“ [2]. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass die toxische Wirkung üblicher PAK-Gemische im Boden am aussagekräftigsten dadurch bewertet werden kann, dass BaP als Bezugssubstanz für die kancerogenen PAK betrachtet und bewertet wird. Dieses Konzept setzte sich gegen Alternativkonzepte, u. a. der Gewichtung des Gefährdungspotentials anderer Einzelsubstanzen mittels Toxizitätsäquivalent-Faktoren (TEF, wie bei PCDD/PCDF) durch (siehe Anlage 2), da dieses ggf. zu einer Unterschätzung der Gemischwirkung führt. Nach [2] ist in der Regel davon auszugehen, dass – sofern erhöhte BaP-Gehalte im Boden angetroffen werden – auch andere (toxikologisch relevante) PAK in einem bestimmten Mischungsverhältnis vorliegen. Auf dieser Grundlage wurden neue Prüfwerte vorgeschlagen, anhand derer eine Bewertung der PAK-Gemische durchgeführt werden kann.

Die Verwendung von BaP als Bezugssubstanz für PAK-Gemische in der BBodSchV (2021)³ unterscheidet sich damit grundlegend von dem für die BBodSchV (1999)² abgeleiteten BaP-Prüfwert. Die Höhe der Prüfwerte kann nicht miteinander verglichen werden, da in der BBodSchV (1999)² ein Einzelstoff und bei der BBodSchV (2021)³ eine Stoffgruppe bewertet wird.

4. Anwendungshinweise der Prüfwerte für PAK

4.1. Orientierende Untersuchung

Je nach Emissionsquelle und Alter des Schadens sowie Umweltbedingungen differiert die Zusammensetzung von PAK-Gemischen in Böden.

Es ist dennoch davon auszugehen, dass die Zusammensetzung in Bezug auf die für die Kanzerogenität wichtigen Inhaltsstoffe bei den PAK-typischen altlastverdächtigen Standorten ehemaliger Kokereien, Gaswerksgeländen und Teermischwerken/-öllagern relativ homogen ist [2]. Der Ableitung der Prüfwerte liegen die typischen PAK-Muster zu Grunde.

Vergleicht man die PAK-Muster bei Kontaminationen des Bodens im Bereich von typischen PAK-belasteten Standorten (Kokereien, Gaswerken oder Teermischwerken/Teeröllagern), schwankt insbesondere die Zusammensetzung der PAK hinsichtlich der höher molekularen PAK in der Regel nur in bestimmten Grenzen [7]. PAK aus Hausbrand, Abgasen etc. weisen eine vergleichbare Zusammensetzung auf und führen in den Böden urbaner Bereiche zu einer erhöhten Grundbelastung gegenüber den Böden in ländlichen Bereichen, welche dort auch zu schädlichen Bodenveränderungen führen kann. Das belegen die Hintergrundwerte für die BaP- und PAK-Konzentrationen in sächsischen Böden [13]. Während landwirtschaftlich genutzte Grünlandböden im ländlichen Raum einen Hintergrundwert für BaP (PAK) von 0,05 (0,52) mg/kg aufweisen, liegen diese im Verdichtungsraum bei 0,1 (1,2) mg/kg. Grünflächen (z. B. in Parkanlagen, Abstandsgrün) direkt in den Siedlungsbereichen weisen weit höhere Hintergrundwerte für BaP (PAK) auf: selbst im ländlichen Raum liegt hier die Hintergrundbelastung bei 0,49 (6,7) mg/kg; in den städtischen Gebieten bei 0,75 (9,5) mg/kg und damit bereits im Bereich der Prüfwerte.

Die Prüfwerte dürfen nur dann zur Beurteilung herangezogen werden, wenn im Ergebnis der nachfolgend beschriebenen beiden Prüfschritte sichergestellt ist, dass das im Einzelfall zu bewertende PAK-Gemisch die typische, der Ableitung der Prüfwerte zugrunde liegende, PAK-Zusammensetzung aufweist.

Grundlage dafür ist eine Analytik auf alle 16 EPA-PAK gemäß DIN ISO 18287 (05/2006) oder einer anderen vom Fachbeirat Bodenuntersuchungen (FBU) als gleichwertig festgestellten und empfohlenen Methodik [14].

Analytisch ist daher nicht nur der Wert für BaP auszuweisen, sondern das gesamte Spektrum der PAK₁₆ zu bestimmen (gemäß § 24 Abs. 3 BBodSchV (2021)³) und für die nachfolgenden Prüfschritte heranzuziehen.

Bei Untersuchungsergebnissen mit sehr geringen BaP- und PAK₁₆-Konzentrationen deutlich unterhalb des Prüfwertes für Kinderspielflächen ist der Verdacht auch ohne intensive Einzelprüfung insofern ausgeräumt.

Prüfschritte bei der orientierenden Untersuchung

1. Prüfung der PAK-Muster
 - Normieren der PAK-Messwerte auf BaP
 - Vergleich der Ergebnisse mit den Anteils-Obergrenzen für typische PAK-Zusammensetzungen
2. Prüfung der Summe der Toxizitätsäquivalente

4.1.1. Prüfung der PAK-Muster

Normieren der PAK-Messwerte auf BaP

Um das Verhältnis der PAK untereinander unabhängig von der Konzentrationshöhe bewerten zu können, werden die Messergebnisse auf BaP normiert. Dazu wird der Analysewert einer PAK-Einzelsubstanz durch den BaP-Analysewert der gleichen Bodenprobe dividiert:

$$\text{Relativer Anteil } PAK_{\text{Einzelsubstanz}} = \frac{\text{Konzentration } PAK_{\text{Einzelsubstanz}}}{\text{Konzentration BaP}}$$

Weist ein Analysenergebnis einer PAK-Einzelsubstanz einen Wert unterhalb der Bestimmungsgrenze auf, ist für die obige Berechnung der Zahlenwert Null in die Gleichung einzusetzen.

Der Quotient stellt den relativen (normierten) Anteil der PAK-Einzelsubstanz zu BaP dar. Bei der Untersuchung mehrerer Proben eines Standortes, werden die verschiedenen Quotienten einer PAK-Einzelsubstanz gemittelt, da es um die Vergleichbarkeit der Standortkontamination und nicht der einer Einzelprobe geht.

Es empfiehlt sich, die (gemittelten) Quotienten auch graphisch darzustellen und den PAK-Mustern typischer PAK-Gemische gegenüberzustellen (siehe Anlage 3).

Vergleich der Ergebnisse mit den Anteils-Obergrenzen für typische PAK-Zusammensetzungen

Nach der Normierung der Messergebnisse auf BaP werden diese relativen Anteile der Einzel-PAK mit den Anteils-Obergrenzen für typische PAK-Zusammensetzungen (PAK-Muster) aus der Tabelle 2 verglichen.

Tabelle 2: Anteils-Obergrenzen für PAK-Einzelsubstanzen im Boden **bezogen auf den BaP-Gehalt** im Boden als Charakterisierung einer (noch) typischen PAK-Zusammensetzung, [6], [1]

Niedermolekulare PAK-Verbindungen (hohe Mobilität)			Höhermolekulare PAK-Verbindungen (geringe Mobilität, kanzerogenes Potential)		
Naphthalin	Naph	160	Benzo(a)anthracen	BaA	6
Acenaphthylen	Acy	5	Chrysen	Chry	5
Acenaphthen	Ace	95	Benzo(b)fluoranthen	BbF	3
Fluoren	Flu	110	Benzo(k)fluoranthen	BkF	3
Phenanthren	Phen	140	Benzo(a)pyren	BaP	1
Anthracen	Anth	240	Benzo(ghi)perylen	BghiP	3
Fluoranthen	FluA	55	Indeno(1,2,3-cd)pyren	I123P	3
Pyren	Pyr	30	Dibenzo(ah)anthracen	DBahA	1,5

Aufgrund der höheren Toxizität/Kanzerogenität sollte insbesondere überprüft werden, ob die gemessenen Werte der höhermolekularen PAK (grau hinterlegt), insbesondere Dibenzo(ah)anthracen (DBahA) und Benzo(b)fluoranthen (BbF), die Obergrenzen einhalten.

Die in Tabelle 2 zusammengestellten Werte für PAK-Anteils-Obergrenzen sind die gerundeten, maximalen, relativen Anteile der jeweiligen PAK-Einzelsubstanzen bezogen auf BaP der drei typischen PAK-belasteten Standorte (Kokereien, Gaswerke, Teeröllager) aus Tabelle 8 in Anlage 4. Diese Vorgehensweise berücksichtigt die der Ableitung des Prüfwertes zugrunde gelegten PAK-Muster.

4.1.2. Prüfung der Summe der Toxizitätsäquivalente

Neben der Prüfung auf Abweichungen von typischen PAK-Mustern, soll unter Verwendung der Toxizitätsäquivalentenfaktoren (TEF) aus Anlage 2 die Summe der Toxizitätsäquivalente einer Probe errechnet werden. Weist ein Analysenergebnis einer PAK-Einzelsubstanz einen Wert unterhalb der Bestimmungsgrenze auf, ist für die Berechnung der Zahlenwert Null zu verwenden (siehe auch Bsp. Acenaphthylen in Tabelle 4).

Der Anteil von BaP an dieser Summe sollte zwischen 30 - 60 % betragen. Bei Anteilen unter 30 % führt die Anwendung des PAK-Prüfwertes, vertreten durch BaP, zu einer Risikounterschätzung, bei Anteilen über 60 % ggf. zu einer Risikoüberschätzung.

4.1.3. Bewertung der ermittelten Prüfungsergebnisse

Bei Einhaltung der Kriterien PAK-Muster und Summe der Toxizitätsäquivalente

Wenn die ermittelten PAK-Muster die Anteils-Obergrenzen der Tabelle 2 einhalten (siehe Kapitel 4.1.1) sowie der Anteil von BaP an der Summe der Toxizitätsäquivalente zwischen 30 - 60 % beträgt (siehe Kapitel 4.1.2), **können die PAK-Gehalte im Boden durch den Vergleich des BaP-Messwertes mit dem jeweiligen BaP-Prüfwert beurteilt werden.**

Bei einer Überschreitung des BaP-Prüfwertes besteht ein hinreichender Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast, so dass eine Detailuntersuchung angeordnet

werden kann, sollten die von der schädlichen Bodenveränderung oder Altlast ausgehende Gefahr, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen nicht mit einfachen Mitteln abgewehrt oder auf andere Weise beseitigt werden (§ 10 Abs. 5 BBodSchV (2021)³).

Bei Überschreitungen des relevanten Prüfwertes bei der Untersuchung von altlastverdächtigen Flächen oder schädlichen Bodenveränderungen ist ggf. zu ermitteln, ob die lokalen Hintergrundgehalte für BaP eine vergleichbare Größenordnung aufweisen. Die zuständige Behörde kann bei nachgewiesenen großflächig siedlungsbedingt erhöhten Schadstoffgehalten diese gemäß § 15 Abs. 6 BBodSchV (2021)³ bei der Gefahrenbeurteilung berücksichtigen und ggf. die Resorptionsverfügbarkeit gemäß § 13 Abs. 3 BBodSchV (2021)³ ermitteln und bewerten.

Bei Überschreitung der Kriterien PAK-Muster und Summe der Toxizitätsäquivalente

In erster Linie sind dabei Überschreitungen der höhermolekularen und gering mobilen PAK mit höherem kanzerogenem Potential (TEF-Werte) zu betrachten – insbesondere Dibenzo(ah)anthracen (DBahA) und Benzo(b)fluoranthen (BbF). Beide Substanzen sind als ähnlich kanzerogen wie BaP einzustufen, siehe Anlage 2. Auch Benzo(a)anthracen (BaA), Benzo(k)fluoranthen (BkF) und Indeno(1,2,3-cd)pyren (I123P) weisen ein relevantes Wirkungspotential auf, das mit dem Prüfwert für BaP als Bezugssubstanz allein ggf. unterschätzt wäre, wenn an einem Standort die Gehalte dieser Stoffe die oben genannten Verhältniszahlen deutlich überschreiten.

Treten eine oder mehrere Überschreitungen der Anteils-Obergrenzen für Abweichungen des PAK-Musters auf, sollte zudem geprüft werden, ob die Messdaten plausibel durch eine andere, von den Standardszenarien abweichende, spezifische PAK-Quelle bedingt sein können.

Erhöhte Konzentrationen mobiler (niedermolekularer) PAK sind ein Hinweis darauf, dass der Schaden vor nicht allzu langer Zeit eingetreten sein muss oder auf Bodenverhältnisse, welche die Mobilität der Schadstoffe einschränken. Zudem haben sie aufgrund ihrer geringeren Toxizität meist einen eher geringen Einfluss auf das toxische Potential (TEF-Werte) des PAK-Gemisches; Überschreitungen bei Naphthalin sind nachrangig.

In Fällen mit deutlichen, plausiblen Überschreitungen der genannten Anteils-Obergrenzen für Abweichungen vom typischen PAK-Muster und/oder einem abweichenden Anteil (< 30 % und > 60 %) von BaP an der Summe der Toxizitätsäquivalente ist die Voraussetzung für die Anwendung des BaP-Prüfwertes zur Beurteilung der PAK-Gehalte im Boden nicht gegeben. In diesem Fall wird eine Bewertung des Einzelfalls unter Berücksichtigung von Art, Konzentration und Toxizität der relevanten Einzel-PAK, ggf. unter Hinzuziehung des LfULG bzw. eines Toxikologen, erforderlich.

4.1.4. Anwendungsbeispiel auf Stufe OU

1. Prüfung der PAK-Muster

- Normieren der PAK-Messwerte auf BaP
- Vergleich der Ergebnisse mit den Anteils-Obergrenzen für typische PAK-Zusammensetzungen

Tabelle 3: Beispiel zur Prüfung der PAK-Muster mit Normierung der PAK-Messwerte auf BaP und deren Vergleich mit den Anteils-Obergrenzen im Boden bezogen auf den BaP-Gehalt

PAK-Einzelsubstanz	Gehalt im Boden [mg/kg TM]	Normieren PAK-Messwerte auf BaP		Vergleich mit Anteils-Obergrenzen	
		rel. Anteil PAK-Einzelsubstanz (Konz.PAK-Einzelsubstanz : Konz.BaP)	Anteils-Obergrenzen bezogen auf BaP-Gehalt	rel. Anteil PAK-Einzelsubstanz < Anteils-Obergrenze?	
Acenaphthylen	<0,05	0,0 : 1,6 = 0*	5	0 < 5	✓
Anthracen	0,9	0,9 : 1,6 = 0,56	240	0,56 < 240	✓
Fluoranthen	3	3,0 : 1,6 = 1,88	55	1,88 < 55	✓
Benzo(a)anthracen	1,7	1,7 : 1,6 = 1,06	6	1,06 < 6	✓
Chrysen	1,8	1,8 : 1,6 = 1,13	5	1,13 < 5	✓
Benzo(b)fluoranthen	1,7	1,7 : 1,6 = 1,06	3	1,06 < 3	✓
Benzo(k)fluoranthen	0,8	0,8 : 1,6 = 0,5	3	0,5 < 3	✓
Benzo(a)pyren	1,6	1,6 : 1,6 = 1,0	1	1 = 1	✓
Benzo(ghi)perylen	0,9	0,9 : 1,6 = 0,56	3	0,56 < 3	✓
Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,7	0,7 : 1,6 = 0,44	3	0,44 < 3	✓
Dibenzo(ah)anthracen	0,12	0,12 : 1,6 = 0,08	1,5	0,08 < 1,5	✓

* bei Analyseergebnissen < BG wird für die Berechnung der Zahlenwert Null verwendet

Die in Tabelle 3 (Spalte 3) ermittelten relativen Anteile der PAK-Einzelsubstanzen werden mit den Anteils-Obergrenzen der PAK-Einzelsubstanzen bezogen auf den BaP-Gehalt (Spalte 4 bzw. Tabelle 2) verglichen (Spalte 5).

Alle ermittelten relativen Anteile der PAK-Einzelsubstanzen bezogen auf BaP liegen unterhalb der Anteils-Obergrenzen für typische PAK-Zusammensetzungen.

2. Prüfung der Summe der Toxizitätsäquivalente

Nachfolgend ist mittels der Toxizitätsäquivalentefaktoren (TEF) aus Anlage 2 die Summe der Toxizitätsäquivalente der Beispielprobe zu errechnen (siehe Tabelle 4).

Zur Berechnung des Toxizitätsäquivalents (TEQ) (Spalte 4) wird jeweils der TEF einer PAK-Einzelsubstanz (Spalte 2) mit dem ermittelten Gehalt dieser Einzelsubstanz im Boden (Spalte 3) multipliziert. Anschließend wird der jeweilige TEQ-Anteil einer PAK-Einzelsubstanz an der Summe der Toxizitätsäquivalente der betrachteten PAK-Einzelsubstanzen ermittelt (Spalte 5).

Tabelle 4: Beispiel zur Ermittlung der Toxizitätsäquivalente zur Prüfung des Anteils von BaP an der Summe der Toxizitätsäquivalente nach [8]

PAK-Einzelsubstanz	TEF	Gehalt im Boden [mg/kg TM]	Toxizitätsäquivalent (TEQ)	Anteil an \sum TEQ [%]
Acenaphthylen	0,01	<0,05	0*	0
Anthracen	0,01	0,9	0,009	0,2
Fluoranthen	0,01	3	0,03	0,8
Benzo(a)anthracen	0,1	1,7	0,17	4,5

PAK-Einzelsubstanz	TEF	Gehalt im Boden [mg/kg TM]	Toxizitätsäquivalent (TEQ)	Anteil an Σ TEQ [%]
Chrysen	0,01	1,8	0,018	0,5
Benzo(b)fluoranthen	1	1,7	1,7	44,6
Benzo(k)fluoranthen	0,1	0,8	0,08	2,1
Benzo(a)pyren	1	1,6	1,6	42,0
Benzo(ghi)perylen	0,01	0,9	0,009	0,2
Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,1	0,7	0,07	1,8
Dibenzo(ah)anthracen	1	0,12	0,12	3,2
Σ TEQ (TEF*Gehalt im Boden)			3,81	

* bei Analyseergebnissen < BG wird für die Berechnung der Zahlenwert Null verwendet

Im Beispiel der Tabelle 4 wurde eine Summe der Toxizitätsäquivalente von 3,81 errechnet. Der sich daraus ergebende Anteil von BaP an dieser Summe von 42 % liegt innerhalb des vorgegebenen plausiblen Wertebereiches von 30 - 60 %.

Die im oben betrachteten Beispiel durchgeführten Prüfschritte (Prüfung der PAK-Muster, Prüfung des Anteils von BaP an der Summe der Toxizitätsäquivalente) ergeben, dass die ermittelten PAK-Gehalte im Boden durch den Vergleich des BaP-Messwertes mit dem BaP-Prüfwert beurteilt werden können (siehe Kapitel 4.1.3).

4.2. Detailuntersuchung

Die BaP-Prüfwerte wurden unter Berücksichtigung bestehender Hintergrundbelastungen in Deutschland oberhalb der toxikologisch abgeleiteten ‚Rohwerte‘ festgelegt.

Der Festlegung dieser BaP-Prüfwerte liegt außerdem die Annahme einer 100%igen Verfügbarkeit (Mobilität, Bioverfügbarkeit) zu Grunde. Erfordern Prüfwertüberschreitungen eine Detailuntersuchung, sollen gemäß § 13 Abs. 3 BBodSchV (2021)³ Untersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit (RV) nach DIN 19738 durchgeführt werden, wenn die Gefahr einer oralen oder dermalen Aufnahme besteht und sofern keine diesbezüglichen einfachen Maßnahmen gem. § 10 Abs. 5 BBodSchV (2021)³ ergriffen werden können.

Prüfschritte bei der Detailuntersuchung:

1. Untersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit (RV)
2. Bestimmung der mittleren RV aus den RV-Daten der höhermolekularen PAK (arithmetisches Mittel)
3. Anwendung der mittleren RV auf die BaP-Messwerte und Bewertung anhand der Prüfwerte

4.2.1. Untersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit

Bei der Detailuntersuchung sollen Untersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit (RV) nach DIN 19738 (mit Milchpulver) durchgeführt werden, sofern eine orale Aufnahme beurteilungs-

relevant ist. Es sind in jedem Fall die nach dem entsprechend aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik bekannten Erkenntnisse in die Methodik der Durchführung und Bewertung von RV-Untersuchungen einfließen zu lassen.

Folgende Bedingungen sind dabei unbedingt einzuhalten:

- Einsatz von Vollmilchpulver notwendig, (fakultative) Speichelstufe dagegen vernachlässigbar
- Verwendung von Probenmaterial der Korngröße < 2 mm
- Durchführung von Doppel- oder (bei inhomogenem Materialien) Dreifachbestimmungen
- Untersuchung des nach den Extraktionen verbleibenden Materials
- Analytische Ermittlung der Wiederfindungsrate des Verfahrens (z. B. durch Standard-addition), um Verlustursachen bei der Probenbehandlungsprozedur und Analytik zu ermitteln

Da die verschiedenen Einzel-PAK unterschiedliche Resorptionsverfügbarkeiten aufweisen, für eine detaillierte Betrachtung der PAK-Toxizität jedoch die Resorptionsverfügbarkeit des PAK-Gemisches relevant ist, können:

1. die RV-Daten der 15 EPA-PAK (ohne Naphthalin) gemittelt,
2. die RV-Daten der 8 höhermolekularen PAK ab BaA mit geringer Mobilität und kanzerogenem Potential (Tabelle 2, grau hinterlegt) gemittelt oder
3. der RV-Wert für BaP verwendet werden.

Aus toxikologischer Sicht ist ein Vorgehen nach 2. zu empfehlen (siehe auch [3], [5]).

4.2.2. Bestimmung der mittleren RV aus den RV-Daten der höhermolekularen PAK

Zur Ermittlung der mittleren Resorptionsverfügbarkeit wird empfohlen, den arithmetischen Mittelwert aus den RV-Werten der höhermolekularen PAK (Tabelle 2, grau hinterlegt) zu bestimmen.

4.2.3. Anwendung der gemittelten RV auf die BaP-Messwerte und Bewertung anhand der Prüfwerte

Der arithmetische Mittelwert dieser RV-Anteile wird dann mit dem BaP-Messwert multipliziert und mit den o. g. Prüfwerten für PAK verglichen.

4.2.4. Anwendungsbeispiel auf Stufe DU

1. Untersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit (RV)
2. Bestimmung der mittleren RV aus den RV-Daten der höhermolekularen PAK (arithmetisches Mittel)

Bei einer Untersuchung eines Bereichs einer Kinderspielfläche beträgt der BaP-Wert 1,5 mg/kg TM. Bei einer RV-Untersuchung werden folgende resorptionsverfügbaren Anteile festgestellt (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Ergebnisse einer beispielhaften RV-Prüfung einer Kinderspielfläche [nach [8] und [9]]

	PAK-Einzelsubstanz	Abkürzung	Resorptionsverfügbare Anteil [%]
Höhermolekulare PAK-Verbindungen	Benzo(a)anthracen	BaA	42
	Chrysen	Chry	40
	Benzo(b)fluoranthren	BbF	36
	Benzo(k)fluoranthren	BkF	34
	Benzo(a)pyren	BaP	21
	Benzo(ghi)perylen	BghiP	19
	Indeno(1,2,3-cd)pyren	I123P	15
	Dibenzo(ah)anthracen	DBahA	14
	Mittelwert		27,6

3. Anwendung der gemittelten RV auf die BaP-Messwerte und Bewertung anhand der Prüfwerte

$$BaP - \text{Messwert} * \text{mittlere RV} = 1,5 \frac{mg BaP}{kg} * 0,276 = 0,41 \frac{mg BaP}{kg}$$

Bezogen auf den BaP-Messwert ist davon auszugehen, dass nur 0,41 mg BaP/kg (stellvertretend für andere kanzerogene Substanzen) aufgenommen werden kann und somit die kanzerogene Wirkung des Gemisches soweit reduziert ist (0,41 mg BaP/kg < Prüfwert 0,5 mg BaP/kg), dass der Gefahrenverdacht für die untersuchte (Teil-) Fläche nicht bestätigt werden kann.

5. Quellen

- [1] BBodSchV. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716)
- [2] FoBiG (Forschungs- und Beratungsinstitut Gefahrstoffe e.V.) (1999, Korrektur 2004): Grundlagen für die Bewertung von Kontaminationen des Bodens mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, Teil B Ableitung von Prüfwerten, Bericht zum F+E-Vorhaben 298 73 771, Bearbeitung: Dr. K. Schneider, Dr. U. S. Schuhmacher, J. Oltmanns, Dr. F. Kalberlah, Forschungs- und Beratungsinstitut Gefahrstoffe, FoBiG GmbH, Freiburg i. Br.. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juli 1999, aktualisiert 2004.
- [3] LfU Bayern. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2023): Untersuchung und Bewertung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen, Merkblatt Nr. 3.8/8, Stand 05/2023.
- [4] LfULG. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2022): „Bewertungshilfen bei der Gefahrenverdachtsermittlung in der Altlastenbehandlung - Orientierungswerte zur Ermessensausübung sowie Prüf- und Maßnahmenwerte“.
- [5] LGL Bayern. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (2014): Bewertungshilfe „Prüf- und Maßnahmenwerte für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)“, Oktober 2014.
- [6] LGA. LandesGesundheitsAmt Baden-Württemberg (2019): Bewertung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch, 2019.
- [7] LUGW. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Bodenschutz, Rheinland-Pfalz (2011): ALEX-Informationsblatt 21/2021 - Hinweise zur Beurteilung von PAK-Gemischen in kontaminierten Böden, Mainz. Mai 2011.
- [8] MELUR. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2017): Bewertung von Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch, Erlass vom 05.01.2017, Kiel, Januar 2017.
- [9] MLU MV. Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2017): Bewertung von Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bezüglich des Wirkungspfades Boden - Mensch. Erlass vom 13.04.2017.
- [10] MU Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2016): Bewertung von Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch. Erlass vom 24.08.2016, Hannover, August 2016.
- [11] UBA. Umweltbundesamt (2016): Untersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen zur weiteren Fortschreibung des Anhangs 1 der BBodSchV, UBA-Texte 15 / 2016.
- [12] UBA. Umweltbundesamt (2016): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe. Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar? Dessau-Roßlau, 2016.

- [13] Kardel, K.; Müller, I. (2021): Hintergrundwerte und Verteilung von organischen Schadstoffen in den Oberböden des Freistaates Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.), Schriftenreihe, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/38912/documents/59936>.
- [14] FBU (2021): Methodensammlung Feststoffuntersuchung Version 2.0 vom 15.06.2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/359/dokumente/2021_0615_methodensammlungfeststoffuntersuchung_v2_final.pdf.

Rechnerische Ableitung der Prüfwerte für PAK

$$\text{Prüfwert PAK} = \frac{\text{Dosis bei Risiko } 10^{-5} * \text{Gefahrenfaktor} * \text{Expositionszeitfaktor}}{\text{Bodenaufnahmerate} * \text{Empfindlichkeitsfaktor}}$$

$$\text{Prüfwert PAK} = \frac{0,87 \text{ ng} * 5 * 8,75 * \text{kg} * \text{d}}{\text{kg} * \text{d} * 33 \text{ mg} * 5}$$

$$\text{Prüfwert PAK} = \frac{0,87 \text{ ng} * 5 * 8,75}{* 33 \text{ mg} * 5}$$

$$\text{Prüfwert PAK} = 0,23 \text{ mg/kg}$$

mit:

Dosis bei akzeptablem zusätzlichem Risiko: Bei kanzerogenen Stoffen wird gemäß der Bekanntmachung über Methoden und Maßstäbe für die Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte nach der BBodSchV (1999)² eine Krebsrisikoberechnung nach dem „unit-risk-Konzept“ durchgeführt.

Ein „akzeptables zusätzliches Risiko“ liegt danach vor, wenn bei 100.000 lebenslang mit einer entsprechenden Schadstoffdosis belasteten Menschen, zusätzlich einer auf Grund dieser Exposition (rechnerisch) an Krebs erkranken würde (Risiko von 1:100.000 bzw. 10⁻⁵).

Auf Grundlage von Untersuchungen zur kanzerogenen Wirkung von Steinkohleteergemischen wurde in [2] ein akzeptables zusätzliches Risiko bezüglich der kanzerogenen PAK bei einer Dosis von 0,87 ng BaP/kg·d ermittelt.

- Gefahrenfaktor F_(Gef): Als Gefahr wird bei diesen Stoffen der Umstand gewertet, wenn 5 von 100.000 Menschen auf Grund der lebenslangen Exposition an Krebs erkranken würden (F_(Gef) = 5).
- Expositionszeitfaktor L: Hochrechnung des Krebsrisikos der Zeit der hauptsächlichsten Bodenaufnahme (erste 8 Lebensjahre) auf eine Lebenszeit von 70 Jahren

$$\text{Expositionszeitfaktor } L = \frac{\text{Gesamtlebenszeit}}{\text{Zeit der haupts. Bodenaufnahme}} = \frac{70 \text{ a}}{8 \text{ a}} = 8,75$$

- Bodenaufnahmerate: orale Aufnahme von Boden durch Kleinkinder (10 kg Körpergewicht) auf Kinderspielflächen (mit der Pauschalannahme von 500 mg/Tag an 240 Tagen im Jahr)

$$\begin{aligned}
 \text{Bodenaufnahmerate} &= \frac{\text{tägliche orale Bodenaufnahme} * \text{Aufenthaltszeit}}{\text{Frequenz} * \text{Körpergewicht}} \\
 &= \frac{500 \text{ mg} * 240 \text{ d} * a}{d * a * 365 \text{ d} * 10 \text{ kg}} \\
 &= 33 \frac{\text{mg}}{\text{kg} * \text{d}}
 \end{aligned}$$

- **Empfindlichkeitsfaktor:** Es liegen Hinweise vor, dass der jugendliche Organismus gegenüber genotoxischen Kanzerogenen eine besondere Empfindlichkeit besitzt. Nach Auswertung vorliegender Daten nimmt [2] für die orale Exposition einen **Empfindlichkeitsfaktor** von 5 an.

Die obige Gleichung ergibt einen ersten rechnerisch ermittelten PAK-Prüfwert (‚Rohwert‘) von 0,23 mg BaP/ kg TM⁴.

Die **rechnerischen ‚Rohwerte‘** für die weiteren Nutzungen (mit Kleinkindern) ergeben sich aus einer pauschal verminderten Bodenaufnahmerate bei der Nutzung Wohngebiet (Faktor 2) und Park- und Freizeitanlagen (Faktor 5) (siehe Tabelle 6). Auf die Ableitung des Prüfwertes für Industrie- und Gewerbegrundstücke wird hier nicht gesondert eingegangen.

Im Rahmen der Plausibilitätsprüfung wurde in [2] ein ubiquitärer Hintergrundgehalt von BaP in Böden von 0,36 mg BaP/kg angesetzt und den ‚Rohwert‘ für Kinderspielflächen auf einen **Prüfwert nach Plausibilitätsprüfung** von 0,5 mg BaP/kg angehoben. Für die Szenarien ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ wurde keine Anhebung vorgeschlagen (siehe Tabelle 6).

Der **wissenschaftliche Beirat Bodenschutz** (WBB) hat 2001 unter der Annahme höherer BaP-Hintergrundgehalte in urbanen Räumen eine stärkere Anhebung der toxikologisch abgeleiteten Werte empfohlen (siehe Tabelle 6), wobei er eine beschleunigte Präzisierung flächenrepräsentativer Hintergrundwerte von siedlungsbedingt erhöhten BaP-Gehalten für notwendig hielt. Die Themengruppe Boden-Mensch zur Novellierung der BBodSchV (1999)² hatte die Prüfwerte-Stufung des WBB zur Übernahme empfohlen (siehe erste Entwürfe zur Novellierung der BBodSchV (1999)²).

Tabelle 6: Prüfwertvorschläge für Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Prüfwertvorschläge PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren (BaP)	Kinderspiel- flächen	Wohn- gebiete	Park- und Freizeitanlagen	Industrie- und Gewerbegrundstücke
	[mg BaP/kg]			
‚Rohwerte‘ / erste Ableitung [2] (1999)	0,23	0,46	1,15	5,6-11,1
Prüfwert nach Plausibilitätsprüfung [2] (1999)	0,5	0,5	1	5

⁴ Der korrekte Bezug der Werte ist auf 1 kg Trockenmasse (TM) des Bodens; im Weiteren wird auf das ‚TM‘ zur besseren Übersichtlichkeit verzichtet – der Bezug bleibt jedoch immer auf Trockenmasse.

Prüfwertvorschläge PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren (BaP)	Kinderspiel- flächen	Wohn- gebiete	Park- und Freizeitanlagen	Industrie- und Gewerbegrundstücke
	[mg BaP/kg]			
Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz WBB (2001)	1	1	1	5
ALA, 53. ALA-Sitzung (2016)	0,5	1	1	5

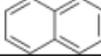
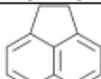
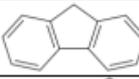
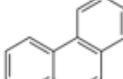
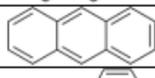
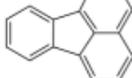
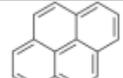
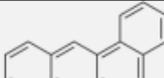
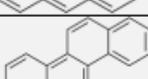
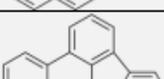
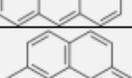
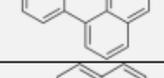
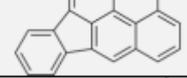
Der **Altlastenausschuss der LABO (ALA)** empfahl auf seiner 53. Sitzung im Januar 2016 mehrheitlich einen Prüfwert für Kinderspielflächen von 0,5 mg BaP/kg (siehe Tabelle 6).

Dieser Empfehlung liegt die Abwägung zwischen wünschenswerter Sicherheit durch die Prüfwertsetzung und einer ausreichenden Berücksichtigung der ubiquitären Belastungen in Deutschland⁵ zu Grunde.

Der ALA empfahl demgegenüber, angesichts des hohen zusätzlichen Risikos insbesondere bei Kinderspielflächen den Prüfwert für Kinderspielflächen auf 0,5 mg BaP/kg abzusenken. Der Beschluss des ALA beruht auf der Überlegung, dass das bei einem Prüfwert von 0,5 mg BaP/kg für Kinderspielflächen bereits hohe zusätzliche Risiko, das in Kauf genommen wird, das maximal vertretbare darstellt. Eine Erhöhung auf 1 mg BaP/kg ist daher abzulehnen. Um erheblichen Umsetzungsproblemen durch die Prüfwerte entgegenzuwirken, soll jedoch der Prüfwert für Wohngebiete mit 1 mg BaP/kg einen ausreichenden Abstand zum Hintergrund aufweisen und entsprechend dem WBB-Vorschlag mit dem Prüfwert für Park- und Freizeitanlagen gleichgesetzt werden. Dies ist insbesondere dort sachgerecht, wo Flächen in Wohngebieten wie Abstandsrün auch von der Frequentierung dem der Park- und Freizeitflächen entsprechen. Die Prüfwerte für Kinderspielflächen und Wohngebiete sind damit vergleichbar anderen Prüfwerten gestuft und entsprechen damit einem gleichen Risiko.

⁵ Prüfwerte dienen dazu, bei altlastverdächtigen Flächen die über übliche Belastungen hinausgehenden Gefährdungen zu identifizieren und weitere Untersuchungen oder Maßnahmen einzuleiten. Sie müssen daher einen ausreichenden Abstand zu den Hintergrundwerten aufweisen. Hintergrundwerte werden dabei üblicherweise als 90-Perzentil untersuchter unbelasteter Standorte angegeben, d. h. den Stoffgehalt, der von 90 % dieser Proben unterschritten und von 10 % überschritten wird. Die BaP-Gehalte verschiedener Länder weisen im urbanen Raum Hintergrundwerte deutlich über 0,5 mg BaP/kg auf. Dabei handelt es sich nach aktuellen Erhebungen nicht nur um die Stadtstaaten oder Nordrhein-Westfalen, sondern auch um Flächenländer wie Niedersachsen (90-Perzentil: 0,6 mg BaP/kg) oder Mecklenburg-Vorpommern (90-Perzentil: 0,7 mg BaP/kg). Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass bei einer Erhöhung der Prüfwerte aufgrund von urbanen Schadstoffbelastungen das Risiko für die Schutzgüter in ländlichen Bereichen (mit niedrigeren Hintergrundwerten) nicht unangemessen erhöht wird.

Tabelle 7: 16 EPA-PAK mit ihren Abkürzungen, Formeln, Wasserlöslichkeiten [mg/L] und Hinweisen auf das kanzerogene Potential (Toxizitätsäquivalentfaktor, TEF) im Verhältnis zu BaP. Die Reihenfolge entspricht der typischen Elutionsfolge nach einer Gaschromatographie-(GC) Trennung und damit der Reihenfolge der Stoffe in den PAK-Mustern ([2], [8])

	Substanz	Abkürzung	Formel	Wasserlöslichkeit	TEF
Niedermolekulare PAK	Naphthalin	Naph		31,7	
	Acenaphthylen	Acy		3,93	0,01
	Acenaphthen	Ace		1,93	
	Fluoren	Flu		1,68-1,98	
	Phenanthren	Phen		1,2	
	Anthracen	Anth		0,076	0,01
	Fluoranthren	FluA		0,2-0,26	0,01
	Pyren	Pyr		0,077	
Höhermolekulare PAK	Benzo(a)anthracen	BaA		0,013	0,1
	Chrysen	Chry		0,003	0,01
	Benzo(b)fluoranthren	BbF		0,0012	1
	Benzo(k)fluoranthren	BkF		0,0008	0,1
	Benzo(a)pyren	BaP		0,0023	1
	Benzo(ghi)perylen	BghiP		0,0003	0,01
	Indeno(1,2,3-cd)pyren	I123P		0,062	0,1
	Dibenzo(ah)anthracen	DBahA		0,00054	1

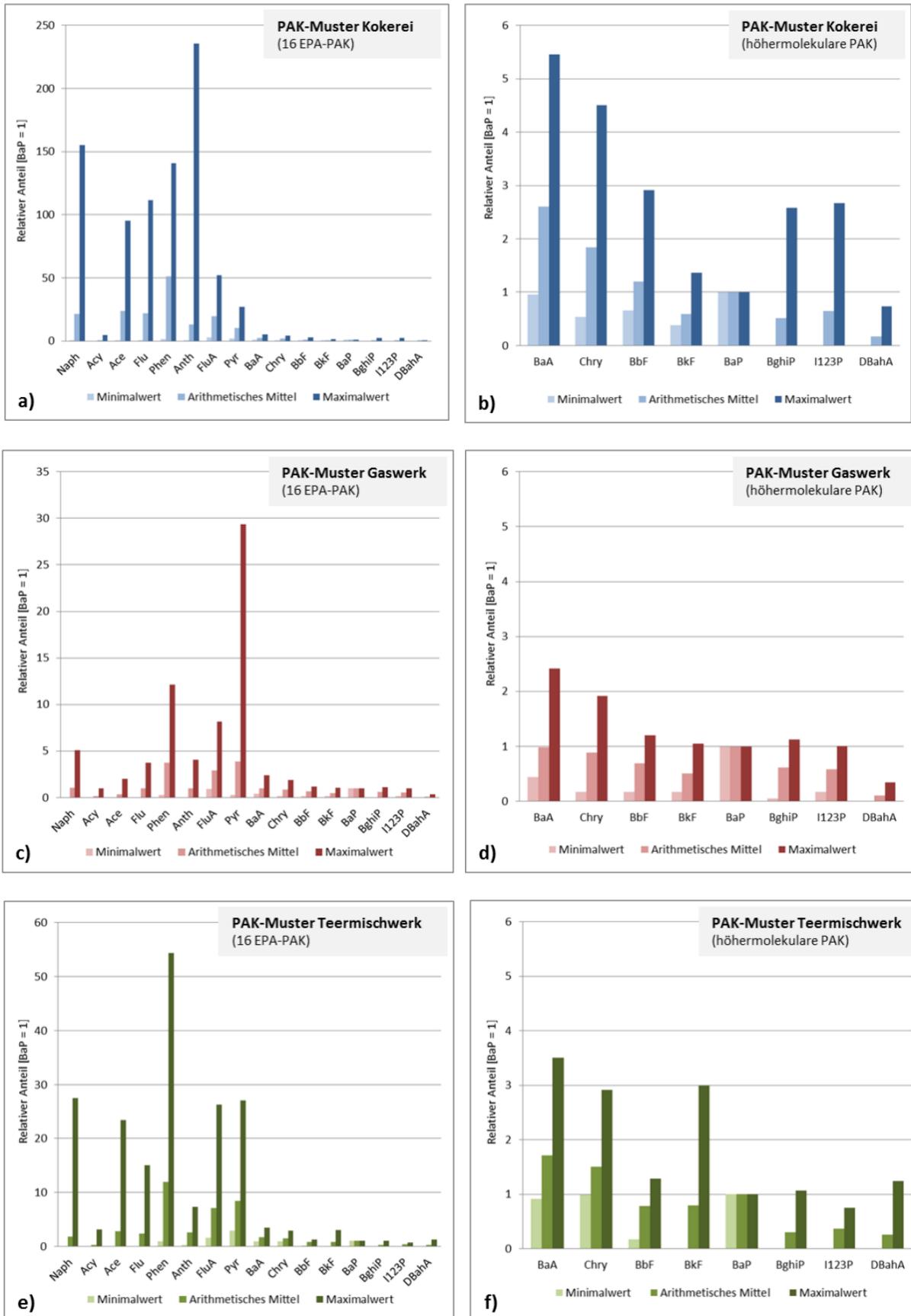


Abbildung 1: PAK-Muster an typischen Standorten: Kokerei (a und b), Gaswerk (c und d) und Teermischwerk (e und f). Gezeigt sind die PAK-Muster der 16 EPA-PAK und die der höhermolekularen PAK an einem Standort. Die Werte sind auf BaP normiert (BaP=1) (nach [2])

Tabelle 8: Vorkommen von PAK in Bodenproben typischer Standorte relativ zu BaP (nach [2] und [5]; höhermolekulare PAK sind grau hinterlegt)

		Abk.	Kokereien (n=36)			Gaswerke (n=22)			Teermischwerke/ Teeröllager (n=37)		
			Min.	Max.	Max./ Min.	Min.	Max.	Max ./Mi n.	Min.	Max.	Max ./Mi n.
Niedermolekulare PAK	Naphthalin	Naph	0,05	155,15	3103	0,00	5,08		0,00	27,48	
	Acenaphthylen	Acy	0,00	4,66		0,00	0,97		0,00	3,19	
	Acenaphthen	Ace	0,07	95,15	1359	0,00	2,0		0,00	23,44	
	Fluoren	Flu	0,02	111,34	5567	0,02	3,74	187	0,00	15,01	
	Phenanthren	Phen	1,47	140,88	96	0,30	12,12	40	0,93	54,39	58
	Anthracen	Anth	0,66	235,68	357	0,04	4,08	102	0,29	7,34	25
	Fluoranthren	FluA	2,90	52,19	18	0,96	8,18	9	1,55	26,29	17
	Pyren	Pyr	1,80	27,11	15	0,32	29,33	92	2,97	27,00	9
Höhermolekulare PAK	Benzo(a)anthracen	BaA	0,96	5,45	6	0,44	2,42	6	0,91	3,51	4
	Chrysen	Chry	0,53	4,50	8	0,17	1,92	11	0,99	2,92	3
	Benzo(b)fluoranthren	BbF	0,66	2,91	4	0,17	1,20	7	0,17	1,29	8
	Benzo(k)fluoranthren	BkF	0,38	1,36	4	0,17	1,05	6	0,00	2,99	
	Benzo(a)pyren	BaP	1,00	1,00		1,00	1,00		1,00	1,00	
	Benzo(ghi)perylen	BghiP	0,00	2,58		0,05	1,13	23	0,00	1,07	
	Indeno(1,2,3-cd)pyren	I123P	0,00	2,67		0,17	1,01	6	0,00	0,75	
	Dibenzo(ah)anthracen	DBahA	0,00	0,73		0,00	0,35		0,00	1,24	