



Fortbildung im Umweltsektor

Seminar

Altlasten und Schadensfälle 2025

– Neue Entwicklungen –

Weilburg, 28. und 29. Oktober 2025



Für eine lebenswerte Zukunft

Impressum

Herausgeber:

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Rheingaustraße 186

65203 Wiesbaden

Tel.: 0611-6939-0

Fax: 0611-6939-555

E-Mail: poststelle@hlnug.hessen.de

Bildnachweis Titelbild:

Denkmalamt Stadt Frankfurt am Main, Nr. 478

www.hlnug.de

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter.

Seminar Altlasten und Schadensfälle

28./29. Oktober 2025

Schlosshotel Weilburg - Langgasse 25, 35781 Weilburg

1. Tag	28. Oktober 2025	Seite
10:00 Uhr	Begrüßung und Einführung Volker Zeisberger, HLNUG Grußwort Johanna Busch, HLNUG	
10:20 Uhr	Vorsorgender Bodenschutz, Bodenschutzrecht, Altlasten – Neues aus dem Ministerium Juliane Kieseewetter, HMLU	
10:40 Uhr	Handbuch Altlasten „Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen“, 4. Auflage Volker Zeisberger, HLNUG	5
11:00 Uhr	Kaffeepause	
11:20 Uhr	Ehemalige Kupferhütte Richelsdorf – Sicherung einer Rückstandshalde Michael Sieber, HIM-ASG	7
12:00 Uhr	In-situ-Sanierung eines PFAS-Schadens durch Biopolymerelektion Anja Wilken, Sensatec GmbH	19
12:40 Uhr	Mittagspause	
14:10 Uhr	Optimierung und Anpassung von In-Situ-Verfahren an besondere Standortfaktoren Dr. Benjamin Faigle, Züblin Umwelttechnik GmbH	22
14:50 Uhr	Erkundung und Sanierung eines CKW-Schadensfalls in verwitterten Vulkaniten des Vogelsbergs Joachim Feldges, Dr. Walter Lenz, HG Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH	27
15:30 Uhr	Kaffeepause	
15:50 Uhr	Teilsanierung und Sicherung einer dioxinbelasteten Waldfläche mit angrenzender Wohnbebauung in Lampertheim-Neuschloß Mareen Radies, Arcadis Germany GmbH	32
16:30 Uhr	Ende des ersten Seminartages	
18:00 Uhr	Stadtführung und gemeinsamer Restaurantbesuch	

2. Tag	29. Oktober 2025	Seite
9:30 Uhr	Gefahrenabwehr von Bodenerosion – Verfahrensablauf, Zusammenarbeit und Herausforderungen Sandra Philippov, RP Kassel; Fabian Achten, HLNUG	41
10:10 Uhr	Akkreditierung für die Probennahme – Vor- und Nachteile einer Kompetenzbestätigung Dr. Thorsten Spirgath, Spicon GmbH	48
10:50 Uhr	Kaffeepause	
11:10 Uhr	Aktuelles aus der Altlastenanalytik - Eckpunkte zum Umgang mit der Mess- und Ergebnisunsicherheit im Vollzug der BBodSchV Florian Schaller, HLNUG	51
11:40 Uhr	Anwendung der PAK-Prüfwerte nach BBodSchV Matthias Adam, HLNUG	54
12:10 Uhr	Mittagspause	
13:40 Uhr	Wiederherstellung des Naturraums durch Renaturierung einer Industriebrache Daniel Fröhlich, HIM-ASG	59
14:20 Uhr	Hintergrundbelastungen von Böden mit PFAS – Ergebnisse der hessischen Boden-Dauerbeobachtung Katrin Lügger, HLNUG	63
15:00 Uhr	Kaffeepause	
15:20 Uhr	LABO-Arbeitshilfe zur Bewertung von LCKW und BTEX im Grundwasser hinsichtlich einer möglichen Belastung der Innenraumluft geplanter Gebäude Volker Zeisberger, HLNUG	71
15:50 Uhr	Handbuch Altlasten „Sickerwasserprognose“, 3. Auflage Volker Zeisberger, HLNUG	76
	Referenten	78
16:20 Uhr	Schlusswort Florian Schaller, HLNUG	

Seminarleitung: Matthias Adam, Florian Schaller, Volker Zeisberger, HLNUG, 0611 / 6939-710, -764, -748

Handbuch Altlasten „Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen“, 4. Auflage

Volker Zeisberger, HLNUG Dezernat „Boden und Altlasten“

Das Handbuch Altlasten Band 3, Teil 7 „Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen (3. Auflage 2018)“ wurde von einer Behörden-Arbeitsgruppe (RP'en, HLNUG) überarbeitet und ist 2025 als 4. aktualisierte Auflage erschienen:

<https://www.hlnug.de/themen/altlasten/arbeitshilfen/band-3-erkundung-von-altflaechen/teil-7>



Wesentliche Änderungen gegenüber der 3. Auflage betreffen:

- Anhang 2 „Geringfügigkeitsschwellenwerte der GWS-VwV“: hier werden die aktuellen Geringfügigkeitsschwellen (GFS) der LAWA übernommen.
- Anhang 9 „Datenauswertung von Pump&Treat-Grundwassersanierungen“: Für die 3. Auflage hatte die HIM-ASG mit Stand 2016 insgesamt 38 langlaufende Grundwassersanierungen ausgewertet, um typische Sanierungskosten zu ermitteln. Für die 4. Auflage des Handbuchs Altlasten wurden die Projektdaten nochmals aktualisiert (Stand Jahresende 2022). Die Auswertung der Verfahrenskosten bis 2022 hat gezeigt, dass die Auswirkungen der Kostenentwicklung seit 2016 (Stand 3. Auflage) bei langlaufenden Sanierungsverfahren über den Sanierungszeitraum moderat ausgefallen sind. Demnach hat sich Stand 2022 das 0,75-Quantil um ca. 10 % erhöht, während der Median um ca. 10 % (alle Fälle) bzw. ca. 20 % (LHKW-Fälle) gesunken ist.
- Anhang 12.2 „Einleitung von gereinigtem Grundwasser in öffentliche Abwasserreinigungsanlagen“: Im Anhang 12.2. wird auf die aktualisierte IndirekteinleiterV und die neue Indirekteinleiter-VwV Bezug genommen. Es wird darauf hingewiesen, dass der „Stand der Technik nach GWS-VwV“ nicht den Schwellenwerten der IndV entspricht. Für die Indirekteinleitung in eine öffentliche Abwasseranlage ist der „Stand der Technik nach GWS-VwV“ heranzuziehen. Bei der sogenannten „Emissionsbetrachtung“ war in der 3. Auflage eine Tabelle mit Emissionswerten enthalten, die auf Erfahrungswerten aus dem Vollzug beruhte. Aufgrund der novellierten IndV war eine Überarbeitung der Werte erforderlich. In der 4. Auflage werden nun zwei Tabellen mit orientierenden Emissionswerten gezeigt, wobei die 1. Tabelle sich auf die Schwellenwerte der IndV bezieht und die 2. Tabelle auf Erfahrungswerten aus dem Vollzug beruht (die letztgenannte Tabelle entspricht damit sinngemäß der Tabelle aus der 3. Auflage).

Ehemalige Richelsdorfer Kupferhütte – Sicherung einer Rückstandshalde

Michael Sieber, HIM GmbH Bereich Altlastensanierung -HIM-ASG-

1. Einleitung

Der Projektstandort der ehemaligen *Richelsdorfer Hütte* liegt im Osten des Regierungsbezirks Kassel, nur knapp 2 km von der thüringischen Grenze.



OT Richelsdorf,
Gemeinde Wildeck,
Kreis Hersfeld-
Rotenburg,
Hessen

Richelsdorfer Hütte
Aktuell:
Gewerbefläche,
Produktion von
Farben und Putzen,
Brachfläche
(Rückstandshalde)

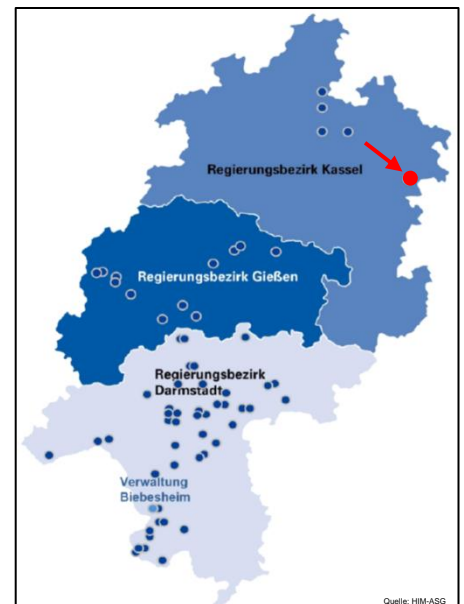


Abb.1a/b: Lage des Sanierungsstandortes

Das Gelände der ehemaligen *Richelsdorfer Hütte* ist westlich des Ortes Wildeck-Richelsdorf im von Nordwesten in südöstlicher Richtung verlaufenden Tal des Weihebachs gelegen. Es erstreckt sich über eine Länge von rund 500 m und umfasst eine Fläche von insgesamt rund 56.000 m². Hier fanden mindestens seit Anfang des 16. Jahrhunderts Verhüttungsprozesse mit Kupfer-, Nickel und Kobalterzen statt. Seit 1925 wurden auf dem Standort dann aus den örtlichen Rohstoffen (Schwerspat, Glaubersalze und Zinkerze) Weißpigmente, sog. *Blanc fixe* und *Lithopone*, hergestellt. Noch heute produziert auf der Gewerbefläche eine Firma Putze und Fassadenmaterialien.

Die Standorthistorie der *Richelsdorfer Hütte* :

- | | |
|-----------|---|
| seit 1514 | <i>Bernsdorfer Hütte</i> zwei Hochöfen, ein Garherd, ein Pochwerk
(Kupferverhüttung) |
| ab 1700 | <i>Richelsdorfer Hütte</i> zwei Hochöfen, eine Kokerei, ein Kupferhammer, zwei
Pochwerke mit Kobaltwäscherei (Kupfer-, Nickel-, Kobaltverhüttung) |
| 1880 | Umbau der Kupferschmelzhütte in eine Spatmühle mit chemischer
Verarbeitung zur Weißpigmentproduktion (zusätzlich Kupfer-, Nickel- und
Kobaltverhüttung aus „Nachlesebergbau“) |

seit 1925	ausschließlich Verarbeitung von Schwerspat (nassmechanische Abtrennung von Begleitmineralien: u.a. Bleiglanz, Zinkblende, Speisskobalt, Weißnickel- und Kupfernickelerze, etc.)
1938 - 1969	Produktion von Lithopone und Blanc fixe
seit 1969	Produktion und Absatz bauchemischer Produkte

In historischer Zeit wurden im Rahmen der Verhüttung, nahe der Erzaufbereitungsstätten, auf dem Talboden flächenhaft Kupferschlacken und Materialgemische abgelagert. Später erfolgte entlang der nördlichen Talseite die Schüttung einer Halde mit den Rückständen der Weißpigmente-Produktion (sog. *Zinkhalde*) auf die natürlichen Hangschuttdecken, abermals teilweise überlagert von Materialien aus der Produktion von Baustoffmaterialien.

Der westliche Teil dieser Halde besteht überwiegend aus den Rückständen der Schwerspat-verarbeitung und der östliche Teil aus Rückständen der Zinkverarbeitung.

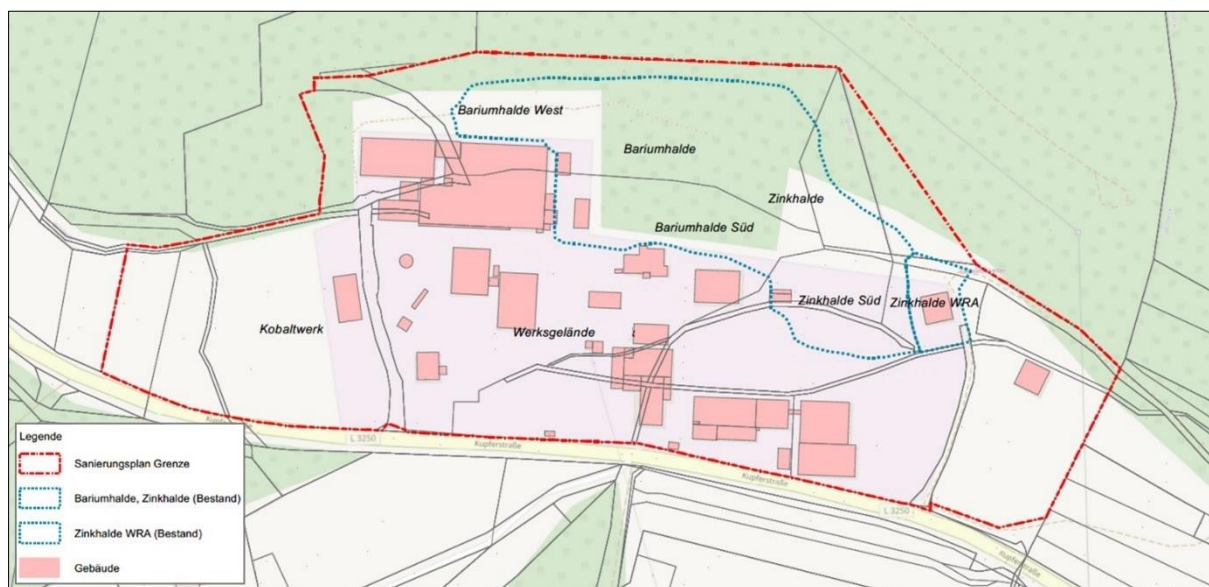


Abb. 2: Übersichtslageplan der Liegenschaft und Sanierungsplangebiet *Richelsdorfer Kupferhütte* mit der Rückstandshalde nördlich des Werksgeländes.

Die Grundfläche der Gesamthalde beträgt rd. 18.530 m², das Haldenvolumen liegt bei rd. 110.000 m³. Die Mächtigkeit der Ablagerungen wurde im Mittel mit rd. 7,0 m bestimmt, reicht lokal aber bis rd. 14 m u. GOK.

Aus der Halde mit den zinkhaltigen Abfällen werden über das Sicker- und Grundwasser erheblich Schwermetalle ausgetragen, die eine Auffruchtung des Grundwassers bewirken.

Aufgrund der sanierungsrelevanten schädlichen Beeinflussung des Grundwassers wurde 1993 das gesamte Gelände zur Altlast erklärt. Zur Verhinderung des Austrags der schwermetall-haltigen Wässer aus der Halde und den Auffüllungen im Werksgelände wurden seit Anfang 1992 Maßnahmen zur Gefahrenabwehr betrieben (hydraulische Sicherung des Grundwasserabstroms, Umlegung der Vorflut

Weihe, Verfüllung alter Werkstollen, Herstellung einer ca. 20 cm mächtigen Kalkschotterschicht auf der Halde usw.).

Im Jahre 2011 wurden neue Ansätze für ein Sanierungskonzept für den Gesamtstandort vorgelegt. Die HIM GmbH, Bereich Altlastensanierung – HIM-ASG – veranlasste die Planung und Umsetzung von Erkundungs- und Sanierungsmaßnahmen auf dem Standort *Richelsdorfer Kupferhütte* in Wildeck-Richelsdorf. Im Zuge der Erkundung wurden auch erhebliche, sanierungsrelevante Schadstoffablagerungen im abstromigen Weihetal und den dortigen Überflutungsbereichen erkundet, von denen u.a. zahlreiche private Grundstücke betroffen waren. Ausmaße dieser verfrachteten Kontaminationen und deren Sanierung (2022/2023 erfolgreich durch die HIM-ASG abgeschlossen) sind nicht Gegenstand dieser Projektvorstellung.

Auf der Grundlage umfangreicher Standortuntersuchungen wurde der vordringliche Sanierungsbedarf für die Halde bestätigt und eine Variantenstudie zu deren Sicherung erstellt, bei der die Variante *Sicherung mit Basisabdichtung* nach Abwägung aller Bewertungskriterien als diejenige bewertet wurde, die das günstigste Verhältnis aus der Zielerreichung und den Kosten erwarten ließ.

Auf der Grundlage detaillierterer Planungen zur Vorbereitung der Genehmigungsplanung (Sanierungsplan nach § 13 BBodSchG) konnte eine Optimierung der Haldentopografie erzielt werden, bei der auf den Bau einer Basisabdichtung verzichtet werden kann. Der finale Lösungsvorschlag beruhte ausschließlich auf der Umlagerung von Haldenmaterialien und der nachfolgenden Sicherung der Halde durch eine Oberflächenabdichtung. Für diese Variante der Haldensicherung wurde der letztendlich der Sanierungsplan erstellt.

Die aus den Talauffüllungen im Bereich des Werksgeländes resultierenden Grundwasserbeeinflussungen sind überwiegend an die Feststoffbelastungen gebunden, besitzen einen lokalen Charakter und teilen sich dem Grundwasserabstrom nur geringfügig mit. Entsprechend der Gefährdungsabschätzung nach den Erkundungen der Boden- und Grundwasserbelastungen im abstromigen Weihetal besteht nach Sicherung der Halde unter Beibehaltung der aktuellen Standortnutzung keine weitergehende Sanierungserfordernis für das verbleibende Gelände. Daher ist das aktiv genutzte Werksgelände nicht Gegenstand der Sanierungsmaßnahmen.

Auf Antrag der HIM GmbH – Bereich Altlastensanierung wurde der Sanierungsplan zur Umsetzung dieser Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen auf dem Gelände der ehemaligen *Richelsdorfer Hütte* gemäß § 13 Abs. 6 BBodSchG am 11.10.2023 für verbindlich erklärt.

2. Geologie und Hydrogeologie

Das Sanierungsgebiet liegt im Großraum *Mitteldeutsches Bruchschollenland*, Raum *Mitteldeutscher Buntsandstein*, Teilraum *Fulda-Werra Bergland und Solling*. Das *Richelsdorfer Gebirge* umfasst Strukturen aus permischen Gesteinen und Gesteinsabfolgen des Buntsandsteins. Der Bergbau

konzentrierte sich vorrangig auf die Mineralien Kupfer, Kobalt und Schwerspat (Baryt) aus den Lagerstätten des Kupferschiefers und Rotliegend-Ganggesteinen.

Im Bereich der *Richelsdorfer Hütte* wird der geologische Untergrund vorwiegend von Unterem Buntsandsteins aufgebaut. In nordwestlicher Richtung werden im Weihebachtal zunehmend die Schichtenfolgen des Rotsandsteins und des oberen Zechsteins angeschnitten.

Infolge eines tiefgründigen Gesteinszersatzes ist das Gefüge der Buntsandsteinabfolge vollständig aufgelöst und zu einer vorwiegend feinkörnigen und bindigen Schicht mit geringen Durchlässigkeiten umgewandelt. Diese Verwitterungsschicht wurde mit Mächtigkeiten zwischen ca. 1,0 m und 4,0 m erfasst. Sie fungiert als lithologische Sperrschicht zu den überlagernden, grundwasserführenden Bachschottern.

Auf dem Betriebsgelände wurden auf den Auenablagerungen und Hangschuttdecken flächen-deckend Auffüllungen mit einer Mächtigkeit von 2 - 7 m abgelagert. Sie bestehen aus schluffig-sandigen Bodenarten, grobkörnigen Bauschuttresten, Anteilen aus Kupferschlacke, Sandsteinbruchstücken und untergeordnet Holzresten. Die Auffüllungen erstrecken sich im Bereich des Betriebsgeländes über die gesamte Talbreite bis an die Talflanken. Die Abfälle der Weißpigmentproduktion überlagern am nördlichen Talrand die schlackenführenden Ablagerungen des Hüttenbetriebs sowie in Hanganlehnung die Hangschuttdecke aus umgelagerten Gesteinen des Unteren Buntsandsteins.

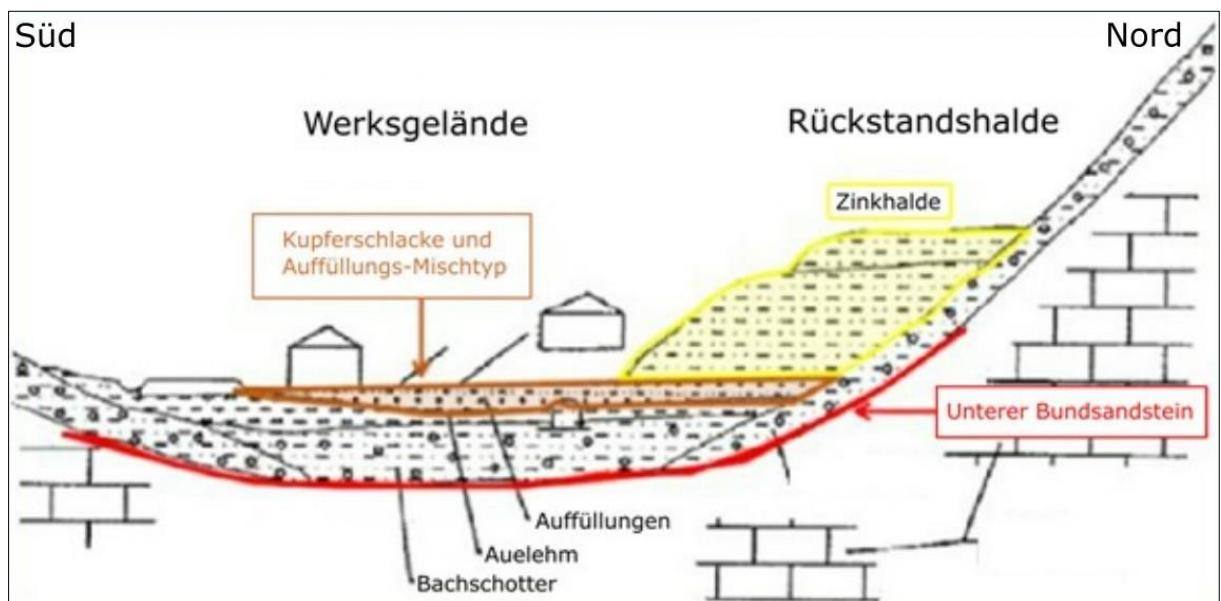


Abb. 3: Schematische Darstellung der Untergrundverhältnisse am Standort (Schnitt Süd-Nord)

Die *Weihe* tangiert als einziges Fließgewässer das Planungsgebiet. Sie floss ursprünglich kanalisiert von der südlichen zur nördlichen Talseite durch das Betriebsgelände. Im Jahr 1999 wurde der Weihebach auf einer Länge von rund 400 m in ein neues Bett verlegt und fließt heute auf der Südseite des Talbodens am Betriebsgelände vorbei bevor er unterhalb des ehemaligen Werksstandortes wieder in sein altes Bett wechselt.

Im überwiegenden Teil des ehemaligen Produktionsstandortes ist zwischen den beiden Grundwasserhorizonten die vorwiegend feinkörnige und bindige Verwitterungsschicht ausgebildet, die gespannte Grundwasserverhältnisse im Kluftgrundwasserleiter hervorruft und zu einer Stockwerksgliederung zwischen Kluftgrundwasserleiter und Porengrundwasserleiter führt. Innerhalb des Porengrundwasserleiters liegen ebenfalls gespannte Grundwasser-verhältnisse vor, wobei das Druckspiegelniveau innerhalb der auflagernden Auenlehme bzw. bereits in den Auffüllungsschichten liegt.

In Teilbereichen des Werksgeländes liegen zudem wassergesättigte Auffüllungsschichten vor, die durch die unterlagernden Auenlehme überwiegend hydraulisch gegen den liegenden Porengrundwasserleiter getrennt sind und einen separaten, räumlich begrenzten und schwebenden Grundwasserhorizont (Auffüllungsgrundwasserleiter) ausbilden. Die Auffüllungsschichten am nördlichen Talrand im Bereich der geplanten Oberflächensicherung mit Kunststoffdichtungs-bahn sind dagegen als nicht wasserführend zu werten.

In den Kernbereichen des alten Talverlaufs ist ganzjährig von einer Wassersättigung der Auffüllungsschichten auszugehen. Diese erfasst insbesondere den östlichen Haldenfuß der *Zinkhalde* sowie Teilbereiche des ehemaligen Hüttenstandortes. Die von Niederschlags- und Hangwasser durchströmten Teile der Rückstandshalde sowie die dauerhaft in Grundwasser-kontakt stehenden Teile der Auffüllungen sind im Wesentlichen für die Schadstoffbeaufschlagung des Grundwasserflusses verantwortlich.

3. Schadstoffinventar

Als Produktionsrückstände bei der Herstellung von Lithopone und Blanc fixe sind insbesondere Bariumsulfidlaugereirückstände sowie zinkhaltige Chlorierschlämme anzuführen, die auf der Halde abgelagert oder eingeschlämmt wurden. Zinkhaltige Chlorierschlämme wurden vorwiegend im östlichen Teil der Halde eingebaut. Auf den westlich angrenzenden Haldenbereich wurden die Bariumsulfidlaugereirückstände verbracht. Neben den produktionsspezifischen Rückständen wurden die Aschen und Brandrückstände aus dem Kesselhaus abgelagert. Es ist davon auszugehen, dass auch sonstige Abfälle wie z.B. Bauschutt aus dem Gebäuderückbau oder aus Umbaumaßnahmen auf die Halde verbracht wurden.

Die bereits anhand des Aufbaus und der Komponentenführung zu treffende Unterscheidung in zwei Haldenbereiche unterschiedlicher Materialzusammensetzung ist in gleicher Ausprägung aus den chemisch-analytischen Untersuchungen abzuleiten. Die räumliche Trennung zeigt sich u.a. in der Verteilung der Elemente Arsen, Kupfer, Blei und Zink sowie der Elemente Barium und Thallium und dem Bodenmilieu.

Im Westteil der Halde liegen vorwiegend bariumhaltige Abfälle aus der Schwerspataufbereitung vor. Es handelt sich um die nach dem Abrösten im Drehofen und anschließender Laugung verbleibenden

Bariumsulfidlaugereirückstände. Ausgehend von der Materialcharakterisierung kann der westliche Teil der Halde als *Bariumhalde* bezeichnet werden. In diese bariumhaltigen Abfälle sind lokal zinkhaltige Abfälle eingestreut.

Im Ostteil der Halde liegen vorwiegend zinkhaltige Abfälle vor, die auf die Einlagerung von zinkhaltigen Chlorierschlämmen zurückzuführen sind. Ausgehend von der Dominanz des Elementes Zink im Stoffmuster, ist ausschließlich dieser Haldenbereich korrekterweise als *Zinkhalde* zu benennen. Nach Westen kann die *Zinkhalde* relativ klar gegen die *Bariumhalde* abgegrenzt werden.

Die *Zinkhalde* nimmt den ganzen östlichen Flächenbereich der Halde ein. Die Zinkgehalte steigen hier sprunghaft auf Konzentrationshöhen von z. T. > 100.000 mg/kg bis rd. 250.000 mg/kg an. Die in den Ablagerungen der *Zinkhalde* erfassten Zinkanteile sind heterogen verteilt und streuen in einem Wertebereich zwischen 1 % und rd. 25 %. Eine Rückgewinnung der Zinkanteile wurde geprüft und ist wirtschaftlich nicht darstellbar.

Im Rahmen einer Gefährdungsabschätzung wurde auf Basis aller für den Standort vorliegenden bodengebundenen Analyseergebnisse eine Bilanzierung des vorhandenen Schadstoffinventars ausgeführt. Auf dieser Basis wurden die in der nachfolgenden dargelegten Tonnagen abgeschätzt.

Tabelle 1: Abschätzung Schadstoffinventar

Bereich	Arsen	Cadmium	Zink
Ehem. Werksgelände	78.600 kg	2.330 kg	795.000 kg
Halde	53.100 kg	9.630 kg	4.240.000 kg
Summe	131.700 kg	11.960 kg	5.035.000 kg

Die Schadstoffsituation wird i. W. durch exorbitante Zink-Eluatgehalte geprägt, die im Bereich der *Zinkhalde* durchschnittlich bei rd. 25.000 - 30.000 µg/l liegen und lokal auf > 900.000 µg/l ansteigen können.

Auf der *Bariumhalde* ist im Mittel nur eine geringe Freisetzung von Zink zu verzeichnen. Für das Element Arsen ist keine Beeinflussung der Löslichkeit durch den pH-Wert erkennbar. Anstiege der Arsen-Eluatgehalte sind ausschließlich durch lokal erhöhte Arsen-Feststoffgehalte bedingt.

Auf der *Zinkhalde* liegen insgesamt stark erhöhte Zink-Eluatgehalte bei neutralen bis sauren pH-Werten vor. Die Arsen-Eluatgehalte sind hingegen weitestgehend als gering zu bewerten.

4. Bodenmechanische Charakterisierung des Haldenmaterials

Anhand der durchgeführten Untersuchungen zeigt sich, dass die Materialien der *Zinkhalde* hinsichtlich der Kornverteilung in sehr weiten Grenzen streuen und zum Teil eine sehr von üblichen Böden abweichende Kornzusammensetzung haben. Hierdurch wird der anthropogene Charakter der abgelagerten mineralischen Stoffe deutlich.

Das Kornspektrum umfasst alle Bereiche von tonigen bis grobsteinigen Körnungen. In vielen Bereichen der Halde liegt das Kornspektrum sehr stark im schluffigen Bereich. Nur drei der untersuchten Proben weisen einen Ton-/Schluffgehalt kleiner als 30 % auf. Der durchschnittliche Feinkornanteil beträgt um die 50 %. Die abgelagerten Reststoffe können insgesamt als schluffige Sande oder sandige Schluffe beschrieben werden. Für einen großen Anteil der Proben ist eine Zuordnung zu üblichen Bodenklassen nicht möglich. Insgesamt seien die Haldenmaterialien von der „Chemie“ geprägt und nicht mit natürlichen Böden vergleichbar.

Auf der Grundlage der aktuellen Erkenntnisse unterscheiden sich die Auffüllungen des Talbodens, die teilweise unterhalb des eigentlichen Haldenkörpers liegen und in Teilbereichen (zentrales Werksgelände und südwestlicher Bereich der Halde) wassergesättigt sind (Auffüllungsgrundwasserleiter), stark von den Materialien der Halde. Es handelt sich um schluffige, teilweise auch kiesige Sande, in die Kupferschlacken, Bauschutt und andere anthropogene Bestandteile eingearbeitet sind.

5. Grundwassersituation

Während in weiten Bereichen des Untersuchungsgebietes vergleichsweise geringe Zink-Gehalte im Grundwasser vorlagen, sind im Abstrom der *Zinkhalde* deutliche Konzentrationsanstiege zu verzeichnen. Innerhalb der *Zinkhalde* fanden sich Zink-Konzentrationen von bis zu 2.360 mg/l, die eine hohe Freisetzung von Zink mit dem Sicker- und Grundwasser in der *Zinkhalde* belegten. Die hohe Zink-Freisetzung führte am Haldenfuß noch zu einer Grundwasserbeeinflussung mit Zink-Konzentrationen zwischen rd. 100-300 mg/l.

Charakteristisch ist dabei, dass der östliche Bereich der *Zinkhalde* durch einen Einstau von Grundwasser in den Fuß der Halde geprägt ist. Vor allem dieser direkte Kontakt von hoch zinkhaltigen Abfällen mit sehr starker Eluierbarkeit mit dem Auffüllungsgrundwasserleiter, der auch im Werksgelände verbreitet ist, führt zu dem beschriebenen starken Austrag von Zink und anderen Schwermetallen mit dem Grundwasserstrom. Die Untersuchungen belegten, dass im östlichen Bereich der *Zinkhalde* nicht nur ein direkter Kontakt des Ablagerungsmaterials mit dem Auffüllungsgrundwasserleiter besteht, sondern auch, dass dieser unterhalb dieses Haldenteils mit dem Porengrundwasserleiter im Kontakt steht und Schadstoffe, vor allem Zink, in großem Umfang in diesen Porengrundwasserleiter eintreten. Durch eine Horizontaldrainage ist inzwischen eine gezielte Absenkung am Haldenfuß mit der Maßnahme zur Trockenlegung des Bereiches um die Wasserreinigungsanlage (WRA) kombiniert worden. Die so erzeugte zusätzliche Grundwasserentnahme im Auffüllungsgrundwasserleiter wird im Porengrundwasserleiter durch die optimierte hydraulische Sicherung ergänzt.

6. Gefährdungen

Zusammenfassend kann die von der Halde ausgehende Gefährdung der Schutzgüter wie folgt charakterisiert werden:

Gefahrenbewertung *Zinkhalde*:

- Direkter Kontakt des Auffüllungsgrundwasserleiters mit dem Haldenmaterial
- Erhebliche Freisetzung von Zink und Cadmium über Eluate
- Die *Zinkhalde* ist die Ursache für die massiven Grundwasserschäden im Auffüllungsgrundwasserleiter, vor allem mit Zink und Cadmium
- Sekundäre Belastung des Porengrundwasserleiters in der Talaue östlich des Werksgeländes, Bereich Biotop

Gefahrenbewertung *Bariumhalde*:

- Südteil: lokal erhebliche Freisetzung von Arsen
- Ursache von massiver Arsenbelastung im Stauwasser der Deponie und im Auffüllungsgrundwasserleiter
- Nordteil: relativ geringe Freisetzung von Schadstoffen

Die starke Freisetzung von Arsen sowie von Zink und Cadmium in den Auffüllungs- und Porengrundwasserleiter führt dort zu einem massiven Grundwasserschaden im wasserrechtlichen Sinne. Aufgrund des Potentials an Schwermetallen bzw. Arsen in der Halde ist davon auszugehen, dass diese konkrete Schädigung des Grundwassers auf sehr lange Zeiträume hin wirksam sein wird, sofern keine Sicherung der Halde erfolgt.

Werksgelände:

Die aus den Talauffüllungen im Bereich des Werksgeländes resultierenden Grundwasserbeeinflussungen sind überwiegend an die Feststoffbelastungen gebunden, besitzen einen lokalen Charakter und teilen sich dem Grundwasserabstrom nur geringfügig mit. Entsprechend der Gefährdungsabschätzung besteht nach Sicherung der Halde unter Beibehaltung der aktuellen Standortnutzung keine weitergehende Sanierungserfordernis für das verbleibende Gelände.

7. Sanierungsziel der Haldensanierung

Aus den bestehenden Gefährdungen können die folgenden Sanierungsziele für den Sanierungsbereich Halde insgesamt sowie differenziert für die beiden Haldenteile formuliert werden:

Primäres Sanierungsziel:

- Nachhaltige Unterbindung der Schadstoffausträge aus der Halde, Wirkungspfad Boden – Grundwasser

Sekundäre Sanierungsziele:

- Herstellung standsicherer Böschungen
- Herstellung geordneter Entwässerungsverhältnisse
- Harmonische Einordnung in das Landschaftsbild

Dabei sind alle Eingriffe in den bestehenden Bewuchs unter Berücksichtigung der naturschutzrechtlichen Belange zu minimieren oder auszugleichen.

8. Variantenstudien und Sanierungsmaßnahmen

Im Rahmen einer Variantenstudie im Jahr 2014 wurden Lösungsmöglichkeiten zur Sanierung der Halde untersucht, wobei 5 Varianten des Abtrags und der Entsorgung der Haldenmaterialien (Verwertung oder Deponierung), der Sicherung sowie kombinierte Varianten betrachtet wurden. Im Rahmen der Genehmigungsplanung (2015) gelang es auf der Grundlage detaillierterer Modellierungen der zukünftigen Haldentopografie, eine sechste Variante zu entwickeln, die Nachteile der zuvor betrachteten Lösungen vermeidet und durch eine vergleichsweise einfache Bauweise kostengünstiger ist, als die zuvor betrachteten Lösungen. Sie umfasst eine voll-ständige Sicherung des Haldenkörpers mit Umlagerung von Haldenmaterial aus der gesättigten Bodenzone im Bereich der *Zinkhalde* Süd auf das Top der Halde bei Verkleinerung der zu sichernden Haldenoberfläche sowie einen Verzicht auf Winkelstützwände im Bereich des Werksgeländes. Dabei unterscheidet sie sich im Wesentlichen durch den angepassten Bau-ablauf mit Baustraße über die Halde, die geänderte Linienführung des Betriebsweges und die Verschiebung der Haldengrenzen nach außen, was kleinere Teilflächen und flachere Hang-neigungen im Kuppenbereich und damit eine insgesamt für das Landschaftsbild gefälligere Form der Halde ermöglicht.

Die optimierte Variante lässt sich wie folgt umreißen:

- Das Material aus dem Bereich des Haldenfußes mit Grundwasserkontakt wird ausgehoben und auf die Halde verlagert.
- Das Grundwasser wird im Bereich der Baugrube *Zinkhalde* Süd mit einer temporären Wasserhaltung abgesenkt, der aufgehende Hang mit einem Verbau gesichert.
- Die Böschungen werden profiliert und das abgetragene Material auf die Halde verlagert.
- Haldenränder werden begradigt und die Drainage mit wenigen Gefällewechseln geplant.
- Die Halde erhält eine in Ost-West-Richtung verlaufende, schwach geneigte Hochfläche.
- Vom Top fallen die Böschungen nach allen Seiten ab. Es entsteht eine lange Böschung zum Werksgelände, sowie hangseitig eine kurze Böschung zum umliegenden Gelände.
- Auf mittlerer Höhe wird eine Berme als späterer Betriebsweg hergestellt, der ein Befahren der Haldenoberfläche z.B. für Kontrollen und die Landschaftspflege erlaubt.
- Die profilierte Halde erhält ein Oberflächenabdichtungssystem aus Schutzvlies, PEHD-Kunststoffdichtungsbahn, Drainagematte und Rekultivierungsschicht.

Die Sanierung der Halde setzt die Sanierungsziele um, die eine deutliche Verbesserung der Situation in Bezug auf die Gefährdungen der Halde erwarten lassen. Schadstoffeinträge in das Grundwasser über den Wirkungspfad Boden – Grundwasser werden erheblich und nachhaltig reduziert.

Der Gebäuderückbau WRA und die Sanierung der darunter verbliebenen Auffüllungen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Sanierungsplanung, diese erfolgen im Anschluss an die Haldensicherung.

9. Sanierungsablauf

Der Sanierungsablauf ist planmäßig in 4 Phasen unterteilt (s.a. Abb.4), der sich schematisch wie folgt darstellen lässt:

- Baustelleneinrichtung und Logistik
 - BE-Fläche *Zinkhalde*: 3.400 m² im südöstlichen Werksgelände
 - BE-Fläche *Kobaltwerk*: 1.500 m² als potenzielles Zwischenlager
- Vorbereitende Arbeiten
 - Rückbau von Gebäuden im Grenzbereich Werksgelände/Rückstandshalde
 - Umverlegung von Ver-/Entsorgungsleitungen
 - Rückbau/Bau Zaunanlagen
 - Rodungsarbeiten (Halde)
- Umlagerung und Profilierung des Haldenmaterials
 - Abtrag des Haldenmaterials vom Fuß der Halde nach oben auf das Haldentop.
 - Herstellung Trägerbohlwandverbau für Sanierungsaushub in der gesättigten Bodenzone
 - Vollständiger Aushub der *Zinkhalde* Süd in der gesättigten und ungesättigten Bodenzone
 - ggfls. erforderliche Konditionierung gesättigter Aushubmassen
 - Umlagerung Aushubmaterial in Auftragsbereiche des Haldenkörpers
 - Rückverfüllung gesättigte Zone des Aushubbereichs mit sauberem Fremdmaterial
 - Rückverfüllung des Aushubbereichs in der ungesättigten Bodenzone
 - Umlagerung Aushubmaterial und Profilierung der *Zinkhalde*
 - Rückbau Trägerbohlwandverbau; die Bohrpfahlwand verbleibt
 - Trassierung Betriebsweg im Bereich der *Zinkhalde* Süd, Tragschichtaufbau
 - Herstellung der Oberflächenabdichtung aus Schutzvlies, Kunststoffdichtungsbahn (KDB), Drainageschicht, Rekultivierungsschicht
 - Drainageleitungen an den Haldenrändern und entlang des Betriebsweges
 - Rekultivierung und Anschluss an Geländeoberkante des Werksgeländes
 - Infrastruktur Haldensicherung, Zaunanlage Werksgelände mit Toren

10. Oberflächensicherung mit Kunststoffdichtungsbahn

Auf das profilierte Haldenmaterial wird das Oberflächenabdichtungssystem aufgebracht. Es besteht aus folgenden Elementen (von unten nach oben):

- 10 cm Ausgleichsschicht (Sand) → 20 cm Kalksteinschotter
- Geotextil (optional) → Vlies 800 g/m²
- PEHD Kunststoffdichtungsbahn 2,5 mm
- Drainagematte
- 1 m Rekultivierungsschicht → 0,5 m Rekultivierungsschicht

Im Zuge der Bauausführung zeigten sich an großen Teilen des Haldenmaterials bodenmechanische Eigenschaften die zu Anpassungen des geplanten Aufbaus des Sicherungssystems führten. So musste die Ausgleichsschicht zum Erlangen der erforderlichen Tragfähigkeit mächtiger und aus einem gut verdichtbaren Material aufgebaut werden. Der Sand-Kies-Charakter des zum Einbau herangezogenen Kalksteinschotters machte den Einsatz eine widerstandsfähigen Vlieses zum Schutz der KDB erforderlich. Dagegen konnte nach gutachterlicher Bewertung und Expertise von Rekultivierungsfachunternehmen mit Zustimmung der beteiligten Genehmigungsbehörden die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht auf 0,5 reduziert werden.

11. Zahlen Daten Fakten

Genehmigung/Verbindlicherklärung:	11.10.2023
Baubeginn:	11/2023
Abschluss Voraushub <i>Zinkhalde</i> :	11/2024
Winterpause:	12/2024 – 03/2025
Abschluss Aushubsanierung <i>Zinkhalde</i> :	06/2025
Abschluss Umlagerung/Profilierung:	08/2025
Abschluss KDB-Belegung:	10/2025
Abschluss Rekultivierungsschicht:	11/2025

Fläche gesamt:	56.000 m ²
Fläche Rückstandshalde:	18.530 m ²
Haldenoberfläche unter KDB:	16.890 m ²
Kubatur Abtrag/Umlagerung, ges.:	53.000 m ³
Aushub <i>Zinkhalde</i> , gesättigt:	8.770 m ³
Volumen Ausgleichsschicht:	3.380 m ³
Volumen Rekultivierungsschicht:	8.450 m ³



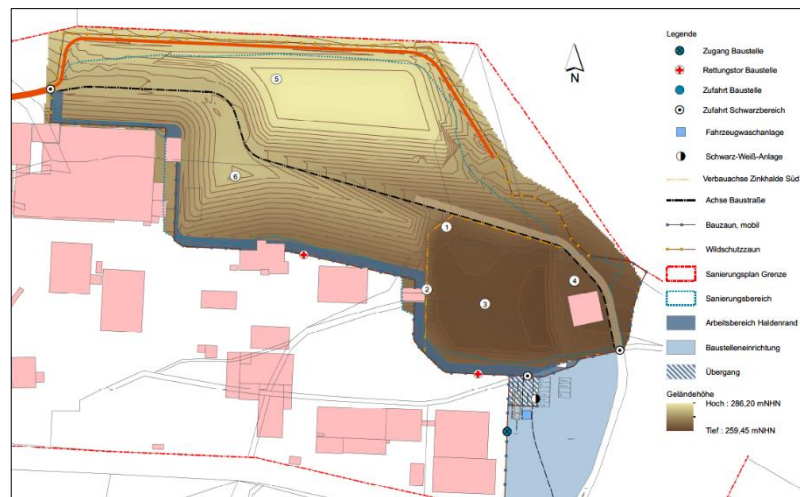
Abb. 4 a-d:
Bauphasen 1-4 der Haldensanierung

Bauphase 1:

- Herstellung der Baustraße über die Halde
- Installation Grundwasserabsenkung für die Baugrube *Zinkhalde Süd*
- Sanierung der östlichen Teilfläche
- Ausbau des befestigten Randstreifens nördlich und östlich der Halde
- Herstellung des Haldenfußes von der westlichen Haldengrenze bis zur Wasserreinigungsanlage
- Aufbau des Haldenplateaus aus umgelagertem Haldenmaterial

Bauphase 2:

- Herstellung Trägerbohlwandverbau *Zinkhalde Süd*
- Bohrpfehlwand im Bereich der Wasseraufbereitung
- Aushub der *Zinkhalde Süd*
- Aushub der westlichen Teilfläche *Zinkhalde*
- Umlagerung Aushubmaterial in Auftragsbereiche des Haldenkörpers
- Fertigstellung der Haldenprofilierung entlang des Haldenfußes

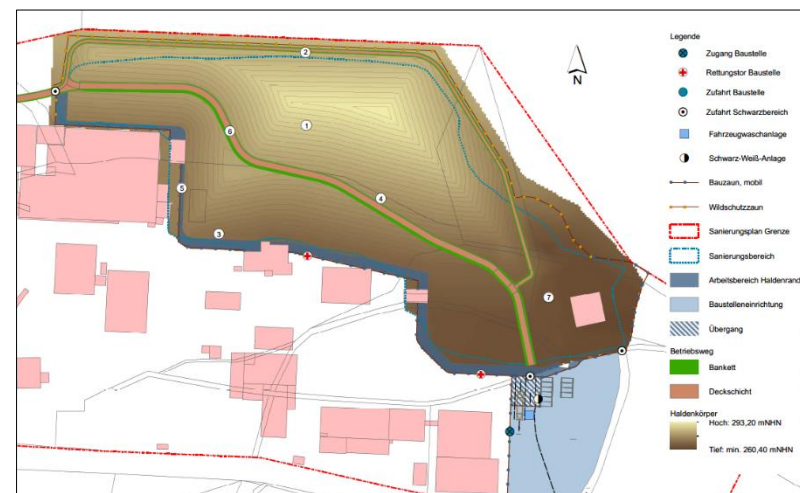


Bauphase 3:

- Rückverfüllung des Aushubbereichs
- Umlagerung Aushubmaterial und Profilierung der *Zinkhalde*, Überschüttung Baustraße
- Rückbau Trägerbohlwandverbau
- Trassierung Betriebsweg im Bereich der *Zinkhalde Süd*, Tragschichtaufbau
- Umlagerung Aushubmaterial, Profilierung des Haldenkörpers für KDB

Bauphase 4:

- Herstellung der Oberflächenabdichtung aus Vlies, KDB, Drain- und Rekultivierungsschicht
- Drainageleitungen an den Haldenrändern
- Drainageleitungen an den Haldenrändern zum Werksgelände
- Drainageleitungen entlang des Betriebsweges
- Anschlussarbeiten an das Werksgelände
- Wegebau Betriebsweg, Anbindung an die Rekultivierungsschicht, Entwässerungseinrichtungen
- Infrastruktur Haldensicherung, Zaunanlage Werksgelände mit Toren



In-situ-Sanierung eines PFAS-Schadens durch Biopolymerelution

Anja Wilken, Sensatec GmbH, Kiel; Miriam Kunz, Sensatec GmbH

Dr. Stephan Kreutzer, ECOS Umwelt Nord GmbH, Kiel

Auf einem ehemaligen Marinegeländes in Kiel liegt eine im Boden und im Grundwasser vorliegende Verunreinigung mit PFAS vor, die auf den Eintrag von fluortensidhaltigen Löschmitteln zurückzuführen. Für die ca. 7.000 m² umfassende Schadensquelle erweist sich nach den bisherigen Ergebnissen der laufenden Sanierungsuntersuchung eine In-situ Bodenspülung als ein möglicherweise geeignetes Verfahren zur Reduzierung des Schadstoffpotentials. Mit einer in der Fahne zu errichtenden Sorptionsbarriere soll der weitere Schadstoffeintrag in den unbelasteten Grundwasserleiter bzw. in die in Reichweite liegende Kieler Förde unterbunden werden.

Laborversuche zur Bodenspülung

Mittels einer mehrstufigen Labormachbarkeitsstudie im Säulenaufbau wurde am homogenisierten Probenmaterial aus dem späteren Behandlungsbereich ein geeignetes Biopolymer, dessen Konzentration und ein effektives Elutionsregime ermittelt. Mit diesem konnten die PFAS-Konzentrationen sowohl im Eluat als auch im Feststoff um ca. 97 % reduziert werden. Die Abreinigung wurde anhand von Bodenproben vor und nach der Elution bestimmt. Weiter wurden die Säulenperkolate untersucht. Die Analytik zeigt einen deutlichen Anstieg der PFAS Konzentrationen im Perkolat bei Biopolymerspülung im Vergleich zur unbehandelten Referenz.

Feldversuch zur Bodenelution

Der Feldversuch wurde innerhalb eines 144 m² umfassenden Testfeldes durchgeführt. In fünf Teilflächen des Testfeldes wurden jeweils die Ausgangsbelastungen an PFAS und deren Vorläufersubstanzen im Feststoff und Eluat in der 2,5 m mächtigen ungesättigten Zone und in dem obersten Meter der gesättigten Zone erfasst. Die Elution erfolgte in mehreren Zyklen über einen Gesamtzeitraum von sieben Monaten mittels oberflächiger Aufbringung von Standortwasser bzw. der Biopolymerkondensatlösung. Das dem Grundwasserleiter zugeführte Spülwasser wurde über einen abstromigen Brunnen entnommen und nach konventioneller Aufbereitung mittels Kiesfilter und Wasseraktivkohle in die Regenwasserkanalisation eingeleitet.

Analog zu Erhebung der Ausgangsbelastung wurden zwei weitere Bodenprobenahmen zur Ermittlung der im Boden verbliebenen bzw. noch eluierbaren Schadstoffkonzentration während der Elutionsphase durchgeführt, sowie eine Abschlussbeprobung. Als Hauptschadstoffkomponenten wurden PFOS, PFNA, PFUnA und PFHxS nachgewiesen, die vorwiegend in der ungesättigten Zone nachgewiesen wurden. Eine vertikale Verteilung der Einzelkomponenten vor Beginn der Maßnahme ist in Abbildung 1 dargestellt.

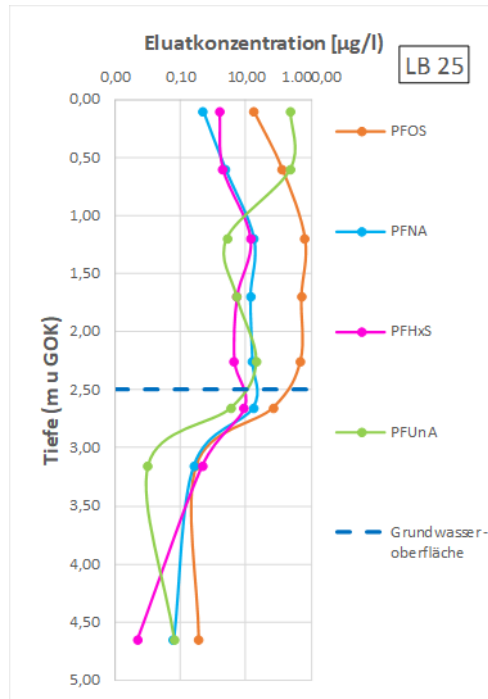


Abbildung 1: Vertikale Verteilung der Einzelkomponenten (Ausgangsbelastung).

© Dr. Stephan Kreutzer

In der Abschlussbeprobung konnte an Bodenproben aus der ungesättigten Zone im Feststoff eine Abreinigung um ca. 96 % (PFNA) bzw. 65 % (PFOS) nachgewiesen werden. Bei den Eluat betrug die Abreinigung jeweils 97 % (PFNA) bzw. 73 % (PFOS). Mit Abschluss der Elution wurden aus der ungesättigten Bodenzone ca. 350 g PFNA und ca. 550 g PFOS ausgespült. Dies entspricht in etwa den innerhalb von 13 Jahren in der abstromigen Schadstofffahne anfallenden Schadstofffrachten.

Die regelmäßige Untersuchung des Grundwassers in 5 Grundwassermessstellen innerhalb des Testfeldes und dem Förderbrunnen ermöglicht eine weitere Abschätzung der in den Grundwasserleiter eingespülten bzw. aus dem Grundwasserleiter entnommenen Schadstoffmassen. Gegenüber den Ausgangsbelastungen steigen die Konzentrationen zu Beginn um bis zu drei Größenordnungen an. Im Laufe der Messungen ergibt sich für PFOS im Vergleich zu PFHxS und PFNA ein deutlich reduziertes Abklingverhalten. Die perfluorierten Anionen sorbieren aufgrund ihres tensidartigen Charakters auch in der Grenzfläche Bodenwasser/Bodenluft. Das unterschiedliche Austragsverhalten von PFNA und PFOS in der ungesättigten Zone wird auf die abweichenden Grenzflächenaktivitäten Luft/Wasser der beiden Einzelstoffe zurückgeführt.

Standzeit der Sorptionsbarriere / Erreichbarkeit von Sanierungszielen

Der Erkenntnisgewinn aus der Bilanzierung der In-Situ-Elution wird für die Standzeitberechnung einer in der Fahne zu errichtenden Sorptionsbarriere zur Minimierung des weiteren Schadstoffeintrags in den unbelasteten Grundwasserleiter einbezogen. Die Standzeit einer Sorptionsbarriere wird sich mit den abnehmenden Stoffkonzentrationen im Zustrom der Barriere auf jeden Fall erhöhen. Die Reduktion der Lebensdauer der Schadstoffquelle wird darüber hinaus eine wesentliche Reduzierung der erforderlichen Standzeit der Barriere bedingen.

Optimierung und Anpassung von In-Situ-Verfahren an besondere Standortfaktoren

Dr. Benjamin Faigle, Züblin Umwelttechnik GmbH, Stuttgart
Anke Wiener, Züblin Umwelttechnik GmbH, Stuttgart

1. Einleitung

In-Situ-Verfahren haben sich als wirksame Sanierungsverfahren etabliert und finden weite Anwendung, da sie sozio-ökologische sowie oft auch ökonomische Vorteile bieten. Im Vergleich zur konventionellen Sanierung durch Bodenaustausch oder Sanierungsansätzen wie Pump&Treat sind sie jedoch stärker von den Standortbedingungen abhängig. An manchen Standorten treten hindernde Faktoren auf, die die Wirksamkeit der In-situ-Maßnahmen hindern oder deren Anwendbarkeit grundsätzlich in Frage stellen. Eine Vielzahl an Weiterentwicklungen in den vergangenen Jahren eröffnet zunehmend Möglichkeiten, in-situ-Methoden auch unter besonderen Standortbedingungen einzusetzen. In diesem Beitrag werden einige beispielhafte Ansätze und Detaillösungen gezeigt, mit denen trotz widrigen Umständen doch ein erfolgreicher Einsatz der Verfahren möglich wurde.

2. Beispiele

2.1. Erfolgreiches Air-Sparging auch in Bereichen mit ungeeigneten

Bodencharakteristika

Im Rahmen einer Sanierung eines ehemaligen Raffineriegeländes wurden Flächen von über 125.000 m² mittels Air-Sparging von flüchtigen, kurzkettigen Kohlenwasserstoffen behandelt. Bei diesem Verfahren wird Luft in das Grundwasser unter der Schadstoffbelastung eingepresst, reichert sich beim Aufstieg durch die Schadenszone mit den Schadstoffen an und wird dann in der ungesättigten Zone über eine Bodenluftabsaugung entfernt und in einer Abgasbehandlung gereinigt. Der Untergrund am Standort bestand in großen Teilen aus gut durchlässigen Donaukiesen, weshalb das Verfahren grundsätzlich sehr gut geeignet waren. Zusätzlich wurde der Sanierungserfolg des Air-Spargings in einem nachlaufenden Monitoring an 270 Bodenluftmesspegeln und an 78 Grundwassermessstellen gemessen, der Sanierungsfortschritt zusätzlich an über 70 lokalen Sicherungsbrunnen im direkten Abstrom der Air-Sparging–Sanierungsflächen verfolgt. Insgesamt war das Verfahren sehr wirksam, aber natürlich gibt es bei dieser großen Fläche auch Bereiche mit lokal anspruchsvollen, hindernden Rahmenbedingungen. Aus den Beobachtungen des Sanierungsfortschritts konnten mehrere Bereiche mit stark geminderter Schadstoffreduktion identifiziert werden. Die ersten Ansätze zur Verbesserung hatten keinen relevanten Erfolg: Eine Intensivierung der Bearbeitung durch Veränderung der Injektions- und Absaugvolumenströme und Veränderung der der Bearbeitungsdauer zeigten wenig Verbesserung, auch eine lokale Verdichtung des Pegelnetzes (Injektion und Absaugung) hat kaum zur Verbesserung beigetragen. Auch eine flankierende Unterstützung durch lokales Pump&Treat mit Förderleistungen bis 30 m³/h konnte die lokalen Belastungsschwerpunkte im Grundwasser nicht wesentlich verbessern.

Die Lösung brachten dann untersuchende Baggerschürfe (Abb. 1) in den betroffenen Bereichen, die lokal begrenzt direkt im Grundwasserschwankungsbereich, und damit etwa 1,5 m unter der damaligen Geländeoberkante, eine undurchlässige Bodenschicht aufdeckte. Schadstoffe wurden erfolgreich aus tieferen Lagen nach oben mobilisiert, haben sich jedoch im Grundwasserschwankungsbereich in dieser undurchlässigen Schicht wie unter einem Deckel angesammelt und konnten auch nicht in den darüber liegenden Bodenluftabsaugung entfernt werden. Von dort erfolgte die Rücklösung ins Grundwasser und damit anhaltend hohe Konzentrationen. Die Bodenluft in der ungesättigten Zone war vermeintlich sauber, im Grundwasser jedoch pendelten sich die Konzentrationen nach anfänglichem Rückgang auf einem Niveau über dem Sanierungszielwert ein. Zur wirksamen Sanierung mittels Air-Sparging musste also die Durchlässigkeit in die ungesättigte Zone geschaffen werden, also „Wege durch den Deckel“.



Abbildung 1: Einbringen von durchlässigem Kies zur Schaffung von Wegbarkeiten in die ungesättigte Zone.

Nach Wiederinbetriebnahme konnte die Wirksamkeit durch die online-Gasmesstechnik nachgewiesen werden, beispielhaft dargestellt an den Austragskurven an zwei ausgewählten Injektionspegeln im Bereich vor und nach dem Einbringen der Kiesschicht (Abb. 2).

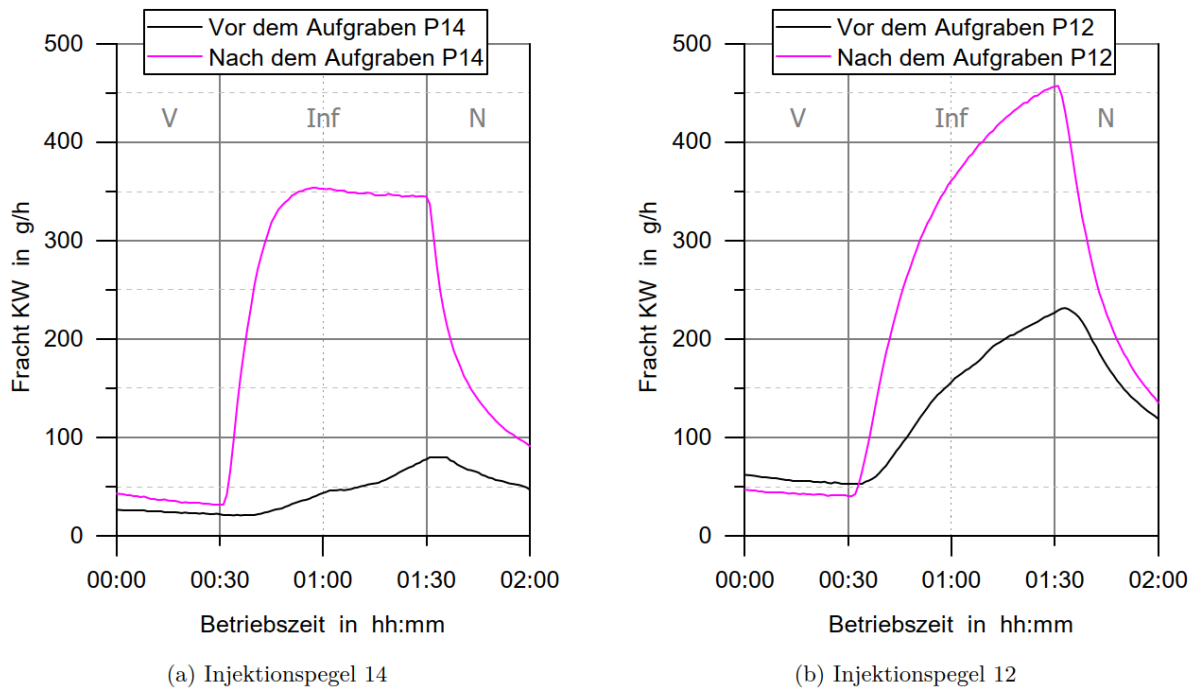


Abbildung 2: Vergleich der ausgetragenen Fracht an Schadstoffen vor und nach der Verbesserung der Durchlässigkeit in der Ungesättigten Zone.

Auch auf der Beobachtungsskala des bearbeiteten Felds zeigte sich die Verbesserung: Nach Schaffung dieser Wegigkeiten aus dem Grundwasserschwankungsbereich stieg der Schadstoffaustrag beim Air-Sparging signifikant an, damit konnte die Belastung im Grundwasser entfrachtet werden und schlussendlich auch die Sanierungsziele im Grundwasser erreicht werden.

Dabei war kein flächiger, vollständiger Austausch des bindigen Materials erforderlich, es war ausreichend an den Stellen der Bodenluftabsaugung für die flüchtigen Schadstoffe eine gut durchlässige Passage zu ermöglichen, der „Deckel“ wurde also punktuell durchörtert.

2.2. Mikrobieller Schadstoffabbau durch Bioaugmentation

Auf dem Gelände einer ehemaligen Galvanik- und Eisenwarenfabrik in Greven wurden Verunreinigungen des Bodens, der Bodenluft und des Grundwassers durch leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) festgestellt. Allerdings war die mikrobielle Aktivität am Standort gering, mit entsprechend erwartbar langsamem Sanierungsfortschritt bei einer geplanten biologischen In-situ-Sanierung. Durch Bioaugmentation, also der Eingabe von zusätzlichen Bakterien in den Untergrund, lässt sich der Abbau beschleunigen.

Im Bauhof der Züblin Umwelttechnik wurde dazu mit standorteigenem Wasser in einem geschlossenen Fermentationsreaktor unter streng kontrollierten, anaeroben Bedingungen insgesamt 800 Liter konzentrierte Bakterienstammlösung der LCKW-abbauenden Spezies *Dehalococcoides mccartyi* kultiviert. Eine gesteuerte Zugabe spezieller MolaZUT®-Rezepturen, Neutralisationsmittel und Tetrachlorethen als Abbaukomponente intensivierte die Entwicklung der Bakterienkulturen und führte zu einer Erhöhung der Bakteriendichte von bis zu 10^{11} Genkopien pro Liter im Grundwasser. Analytisch

konnte eine reduktive Dechlorierung der zugegebenen LCKW beobachtet werden, bei der das Tetrachlorethen schrittweise bis zum Ethen abgebaut wurde.

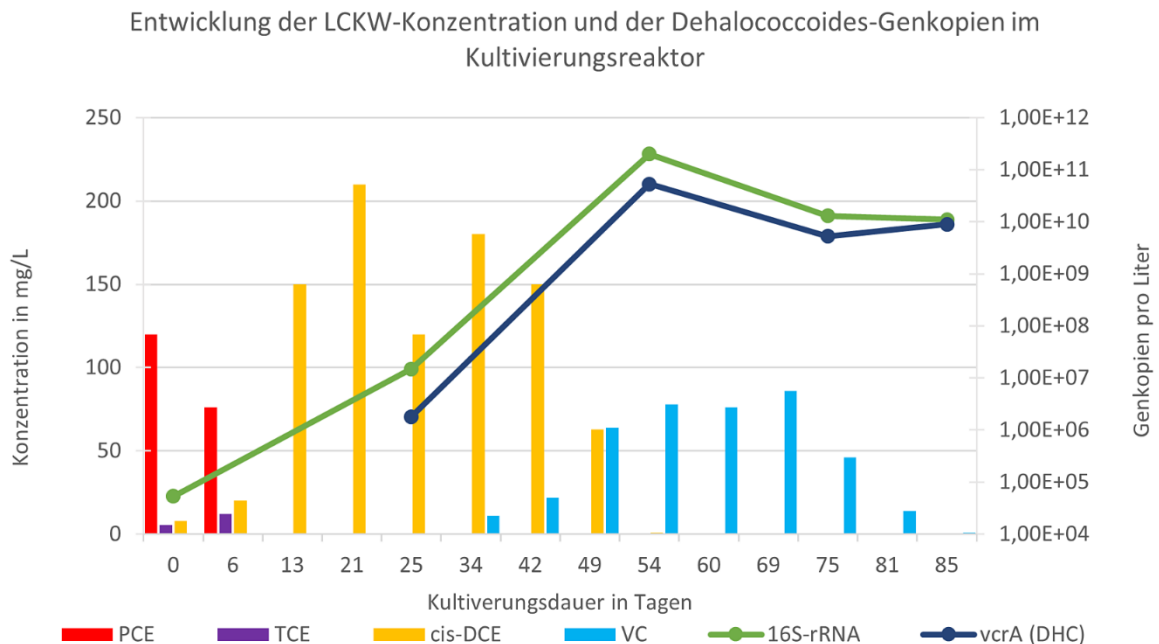


Abbildung 3: Entwicklung der Konzentration und Bakterienpopulation im Kultivierungsreaktor.

2.3. Melasseinjektion zum reduktiven Schadstoffabbau mit sauerstoffgesättigtem Grundwasser

Auf dem Grundstück einer ehemaligen Wäscherei mit angeschlossener chemischer Reinigung wurde ein Grundwasserschaden infolge von Einträgen des Schadstoffs Trichlorethen (TCE) festgestellt. Zur Sanierung des Schadens erfolgt die In-situ-Stimulierung des mikrobiellen LCKW-Abbaus. Hierzu wurde mit Grundwasser verdünnte Melasse als leicht verfügbare Kohlenstoffquelle zudosiert, um die reduktive Dechlorierung von Trichlorethen über die Zwischenprodukte Dichlorethen und Vinylchlorid bis hin zum Endprodukt Ethen zu stimulieren. Ziel ist die vollständige Eliminierung der chlorierten Kohlenwasserstoffe und die Wiederherstellung der Grundwasserqualität. Die nahezu vollständige Sauerstoffsättigung des Grundwassers am Standort stellt jedoch ein erhebliches Hindernis für eine effektive anaerobe Dechlorierung im reduktiven Milieu dar.

In einem ersten Verfahrensschritt wird das sauerstoffreiche Wasser deshalb einem Bioreaktor zugeführt, in dem der gelöste Sauerstoff nahezu vollständig durch mikrobielle Atmung aufgezehrt wird. Dadurch können bereits vor der Infiltration anaerobe Bedingungen geschaffen werden, die eine Grundvoraussetzung für die reduktive Dechlorierung darstellen. Ein möglicher Austrag von Biomasse aus dem Bioreaktor und damit weniger Probleme im Pegel wird durch einen nachgeschalteten Sandfilter sowie drei parallel geschaltete Beutelfilter verhindert. Anschließend erfolgt die Infiltration des kohlenstoffhaltigen, sauerstoffarmen Wassers über neun Infiltrationsbrunnen in den Untergrund. Jeder

Brunnen ist mit einem Regelventil ausgestattet, um eine definierte Infiltrationsrate sicherzustellen und eine gleichmäßige Verteilung im Schadensbereich zu erreichen.



Abbildung 4: Anlagentechnik zur Vorbehandlung des Injektionswassers mit großem Bioreaktor zur Sauerstoffzehrung.

3. Zusammenfassung

Trotz hindernder Standortbedingungen können In-situ-Sanierungsverfahren erfolgreich eingesetzt werden. Einige Beispiele sind in diesem Beitrag aufgeführt. Bisher bleiben jedoch insbesondere bei In-Situ-Verfahren weiterhin Anwendungsgrenzen bestehen, sodass sie nicht grundsätzlich und uneingeschränkt an allen Standorten anwendbar sind.

Erkundung und Sanierung eines CKW-Schadensfalls in verwitterten Vulkaniten des Vogelsbergs

Joachim Feldges, Dr. Walter Lenz, HG Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH

Bei der Herstellung von Regalsystemen wurden etwa im Zeitraum 1960 - '85 chlorierte Lösemittel eingesetzt, die aufgrund des damaligen Stands der Technik zu Einträgen von CKW in den Untergrund führten. Erste Untersuchungen in den 1990er Jahren wiesen lokal untergeordnete Verunreinigungen nach, die aber keine Veranlassung für weitere Maßnahmen gaben.

Bei einem Eigentümerwechsel in 2017 wurde zwischen Käufer und Verkäufer eine umwelttechnische Bestandsaufnahme vereinbart, um eventuelle Altlasten erfassen und monetär bewerten zu können. Mit diesen Maßnahmen wurde das Büro HG in Gießen beauftragt.

Daraufhin wurden 2018 im Rahmen einer orientierenden Untersuchung (OU) zunächst mehrere Bohrungen abgeteuft und zu Grundwassermessstellen (GWM) ausgebaut, an denen Immissions-Pumpversuche durchgeführt werden konnten.

Der Standort befindet sich im Verbreitungsgebiet der vulkanischen Gesteine des Vogelsbergs, die hier allerdings überwiegend durch quartäre Lockergesteine in wechselnder Mächtigkeit überdeckt sind und nur punktuell zu Tage treten. In der aktuellen GK25 dominieren dabei „Zersetzungsprodukte der Basalte, Trappe und Tuffe mit Bauxit“, „Geschichteter Basalttuff“ sowie undifferenzierte „Basalte“.

Mit Blick auf die relevanten Nutzungen des Grundwassers ist die Lage in der Wasserschutzzone IIIB des ca. 13 km sw' gelegenen Wasserwerk (WW) Inheiden der OVAG von Bedeutung, dem überregionale Bedeutung zukommt.

Die Untersuchungen auf dem Betriebsgelände wiesen einen gering durchlässigen Untergrund aus verwitterten Tuffen mit kf-Werten in der Größenordnung von 10^{-8} m/s nach und dadurch eine sehr geringe Ergiebigkeit der GWM. Deswegen resultierte trotz Überschreitung der GFS-Werte bei einer Frachtbetrachtung gemäß HLUG-Handbuch Altlasten Bd. 3 Teil 6 zwar eine „große“ Masse, aber nur eine „kleine“ Fracht der Schadstoffe und damit eine „mittlere schädliche GwVerunreinigung“.

Die „weiteren Prüfschritte, um entscheiden zu können, ob / welche Maßnahmen erforderlich sind“ erfolgten mittels MIP-Sondierungen, wobei eine vor-Ort-Analytik mit einem hochauflösenden GC-MS-System eingesetzt wurde.

Anhand der EC-Logs (el. Leitfähigkeit des Gebirges) konnte an den insgesamt ca. 50 Messpunkten eine oberflächennahe Auflockerung der tonigen Schluffe nachgewiesen werden, ab ca. 10 m uGOK sank die Durchlässigkeit unter den Messbereich der eingesetzten HPT-Sonde von 10^{-8} m/s ab.

Als maßgebliche Eintragsbereiche für CKW erwiesen sich zuvor als unverdächtig eingestufte Flächen, die erst durch nachträgliche Befragungen eines im Ruhestand befindlichen Mitarbeiters als Lager- und

Handhabungsbereiche identifiziert werden konnten. Allein anhand verfügbarer Unterlagen hätten sich keine Hinweise auf diese „hot spots“ ergeben.

Die im Rahmen vertiefender Untersuchungen (DU) eingesetzte innovative Messtechnik ermöglichte eine räumliche Abgrenzung des relevanten CKW-Reservoirs auf einer Fläche von ca. 50 m * 20 m bis in eine Tiefe ca. 25 m. Dabei war mit den Messungen vor-Ort nachvollziehbar, dass durch das Einfallen der Schichten eine kaskadenartige Ausbreitung der Lösemittel nach SO in den Hang hinein erfolgt ist, also gegenläufig zum Relief der Erdoberfläche.

Eine weitere wesentliche Erkenntnis der DU war, dass die an der Nordgrenze des Betriebsgeländes verlaufende Wetter entgegen der ursprünglich naheliegenden Annahme keine Vorflutfunktion hat. Die Messungen an den tw. als GWM ausgebauten Kleinbohrungen bestätigten zwar das sehr geringe GwGefälle, das allerdings nicht nach N, sondern nach SO gerichtet ist. In Verbindung mit dem hohen Speichervermögen der vulkanischen „Zersetzungsprodukte“ und deren sehr geringen Nutzporosität hatten diese Rahmenbedingungen eine weitgehende Stationarität des CKW-Reservoirs zur Folge.

Das anhand der vor-Ort-Messungen erzeugte dreidimensionale Bild der residual gesättigten Lockergesteine ermöglichte eine kleinräumig differenzierte Planung von in-situ-Maßnahmen und damit einen optimierten Einsatz technischer und finanzieller Mittel in den Kernbereichen des CKW-Reservoirs.

Ende 2019 wurde in zwei Testfeldern (ISCO im Schadenszentrum, ENA in einem Randbereich) mit Pilotversuchen zur Eliminierung der Reservoirs begonnen. Nach einjähriger Beobachtung der Reaktionen wurde Anfang 2021 entschieden, die eigentliche Sanierung mittels einer Kombination aus Förderung / Stimulation des biologischen Abbaus (ENA) und In-Situ-Chemischen Reduktion (ISCR) durchzuführen.

Mit der in-situ-Sanierung wurde nach ausführlichen Abstimmungsgesprächen mit verschiedenen Anbietern die Sensatec GmbH beauftragt, die im Sommer 2022 die umfangreichen Injektionsarbeiten durchführte. Zunächst wurde das GWM-Messnetz um eine abstromige Kontrollebene an der Grenze des Werksgeländes erweitert. Anschließend wurden 40 Tonnen bzw. 400 m³ einer Wirkstoffsuspension aus EHC und Verdickungsmittel über einen Zeitraum von etwa 4 Monaten an 40 gleichmäßig verteilten Injektionspunkten im Direct-Push-Verfahren mittels druckaktivierter Injektionssonde zielgerichtet im TSE-Verfahren (tiefenzoniert und abgestimmt auf die in der DU ermittelte Schadstoffverteilung) in den Untergrund eingebracht.

EHC besteht aus einer Kombination von nullwertigen Nanoeisen (für ISCR) und organischen Substraten (für den anaeroben biologischen Abbau bzw. die reduktive Dechlorierung). Alle Injektionspunkte wurden nach erfolgreichem Einbringen der Wirkstoffe als dauerhafte Injektionselemente bzw. Micro-Messstellen ausgebaut, um kostengünstigere Folgekampagnen umsetzen zu können und gleichzeitig zusätzliche Beobachtungs-/ Probenahmepunkte zu erhalten.

Zum Abschluss der Injektionsarbeiten erfolgte zusätzlich eine Eingabe von 250 L der Bakterienkulturen aus der Gattung *Dehalococcoides* unter Ausschluss von Luftkontakt über alle Micro-Messstellen zur Forcierung des biologischen Abbaus.

In den Folgejahren wurde die Entwicklung im Reaktionsraum durch regelmäßige Probenahmen an den im Rahmen der Erkundung und der Injektionen installierten GwMessstellen und ausgewählten dauerhaften Injektionselementen kontrolliert. Überwacht wurden dabei sowohl die chem.-phys. Milieubedingungen im Untergrund, als auch die Entwicklung von Konzentrationsniveau und Stoffspektrum der Ausgangs- und der Abbauprodukte.

Die Konzentration der in Grundwasserproben nachweisbaren chlorierten Ethene und Ethane wurde dabei von $>1 - >10 \text{ mg/l}$ um den Faktor 10 – 100 reduziert, wobei die Reduktion überwiegend durch biologischen Abbau der CKW bis zu nachweisbaren Endprodukten erfolgte.

Der Prozess der ISCR setzt nach Erfahrungen der ausführenden Sensatec GmbH oft erst zeitlich verzögert zum biologischen Abbau ein und stellt am Standort bislang einen untergeordneten Faktor der Sanierung dar.

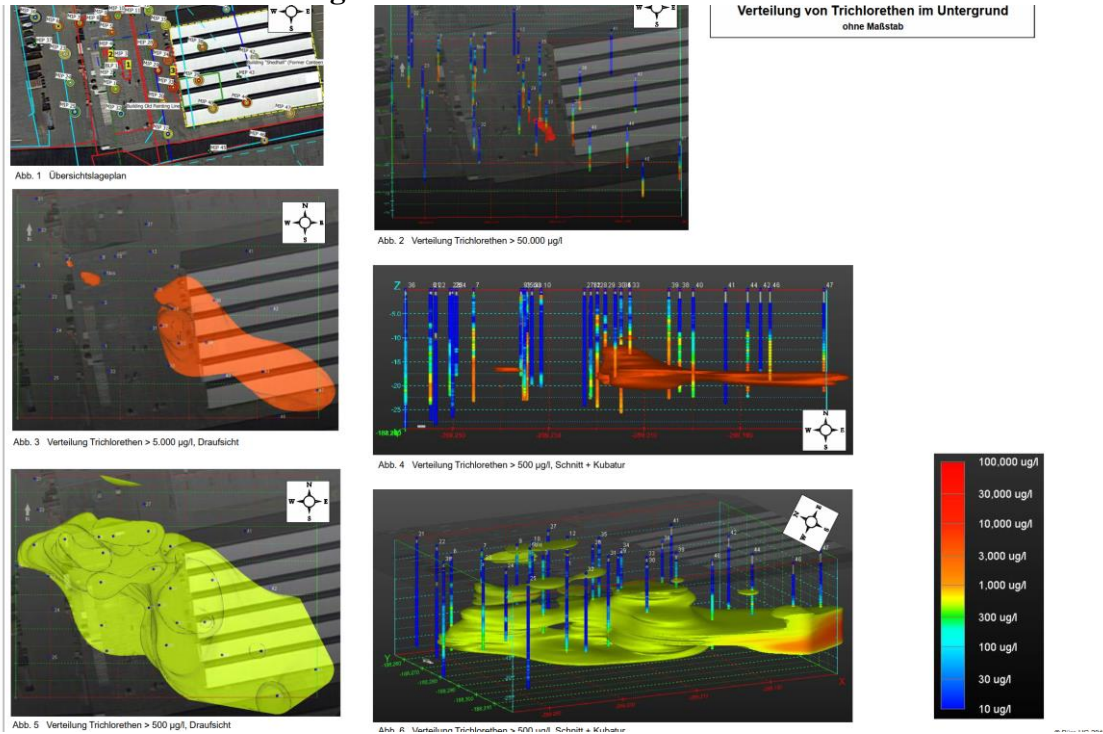
Die Entwicklung in den Jahren 2022-’25 entsprach somit den Erwartungen, d.h. es war bereichsweise ein weitgehender Abbau der CKW nachweisbar. In zwei Belastungsschwerpunkten war allerdings eine Stagnation bzw. ein Wiederanstieg der Konzentrationen festzustellen, weil im Gesamtporenraum der tonig-schluffigen Gesteine noch ein relevantes CKW-Reservoir vorhanden ist, das lediglich durch Diffusionsprozesse erreichbar ist, die längere Zeiträume erfordern.

Für 2026 ist daher eine zweite Phase der Injektionen vorgesehen, um auch in den verbliebenen Reservoiren einen Abbau auf das angestrebte Konzentrationsniveau zu erreichen und ggf. die ISCR zu beschleunigen.

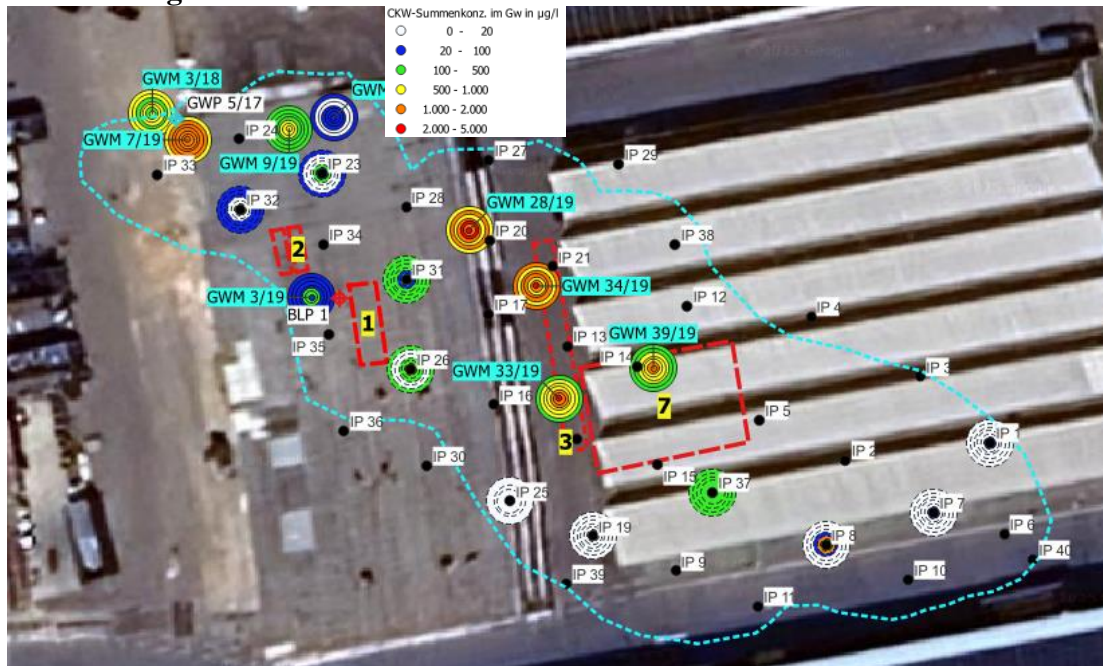
Im Ergebnis wird davon ausgegangen, dass das CKW-Reservoir bis etwa 2030 um über 90 % eliminiert werden kann. Lokale Restbelastungen in der Größenordnung $20 - 200 \mu\text{g/l}$ werden dabei vsl. verbleiben, weil eine Reduzierung auf das Niveau der GFS-Werte die Grenzen der Verhältnismäßigkeit sprengen würden.

Aus gutachterlicher Sicht ist dieses Ergebnis aber unter Berücksichtigung der geohydraulischen Rahmenbedingungen und der nach heutigem Kenntnisstand vernachlässigbaren Mobilität der Schadstoffe vertretbar, zumal von einer noch längerfristigen Wirkung der Sanierungsmaßnahmen ausgegangen wird.

3D-Modell der Verteilung von TCE im Schadensbereich

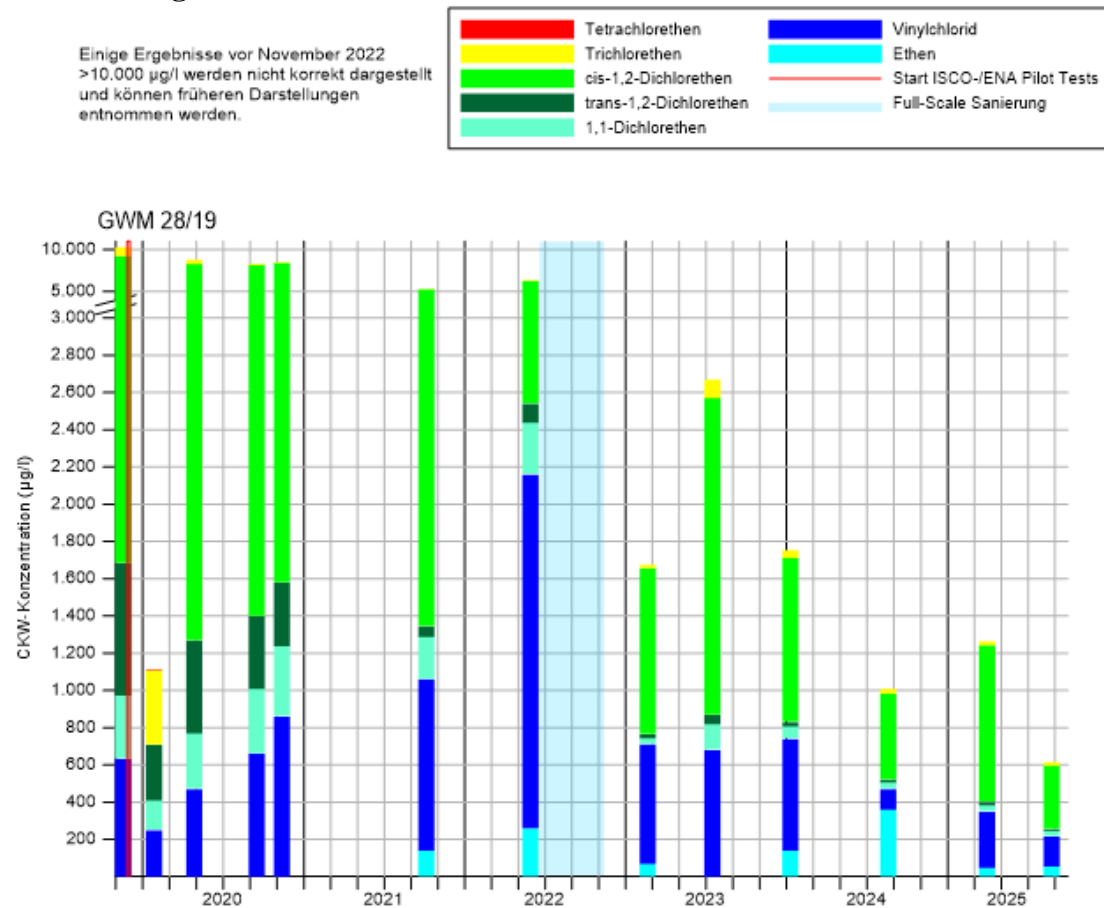


Entwicklung der CKW-Summenkonzentration im Schadensbereich



Konzentrische Kreise um die GWM (schwarzer Punkt) zeigen das Niveau der CKW-Summenkonzentration zum jeweiligen Probenahme-Zeitpunkt, beginnend von innen nach außen (aktuellste Ergebnisse)

Entwicklung der Konzentration chlorierter Ethene an GWM 28/19



Teilsanierung und Sicherung einer dioxinbelasteten Waldfläche mit angrenzender Wohnbebauung in Lampertheim-Neuschloß

Mareen Radies, Dr. Michael Selle, Arcadis Germany GmbH, Darmstadt

Einleitung

Sanierungsmaßnahmen in unmittelbarer Nähe zu Wohnbebauung stellen aufgrund der notwendigen Berücksichtigung von Anwohnerschutz und Sicherheitsvorkehrungen eine besondere Herausforderung dar. Insbesondere bei Altlasten, die Dioxine und andere persistente organische Schadstoffe enthalten, ist ein umfassendes Risikomanagement erforderlich. Diese Substanzen zeichnen sich durch ihre Toxizität, Karzinogenität sowie ihre umweltpersistenten und bioakkumulierenden Eigenschaften aus und können über diverse Transferpfade, etwa durch Staubemissionen, in die menschliche Nahrungskette gelangen. Die Entwicklung und Umsetzung geeigneter Sanierungsstrategien muss daher sowohl die Minimierung der Schadstofffreisetzung als auch den Schutz der betroffenen Bevölkerung gewährleisten. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen kommunalen Behörden, Umweltfachstellen, Gutachtern, ausführenden Unternehmen und der Bevölkerung ist unerlässlich, um technische Effektivität und soziale Akzeptanz der Maßnahmen sicherzustellen und nachhaltige Lösungen für die komplexen Herausforderungen solcher Projekte zu ermöglichen.

Ausgangssituation

Am Standort Lampertheim-Neuschloß im südhessischen Lampertheim wurde von 1829 bis 1927 die „Chemische Fabrik Neuschloß“ betrieben, in der unter anderem Soda, Glaubersalz, Chlor, Kalk, Schwefel- und Salzsäure hergestellt wurden. Nach der Stilllegung der Fabrik wurde das Gelände ab etwa 1955 und in einer zweiten Phase ab 1980 zum Neubaugebiet entwickelt, wodurch der heutige Stadtteil Lampertheim-Neuschloß entstand. Ab den 1990er Jahren wurden im Boden zunehmend Verunreinigungen festgestellt, deren Ursprung belastete Abfälle aus der Produktion der ehemaligen chemischen Fabrik waren. Diese führten zu weitreichenden Bodenverunreinigungen mit Arsen, Schwermetallen, Dioxinen und Furanen, die sowohl das ehemalige Betriebsgelände als auch die umliegenden Altablagerungen wie die „Sandgruben“ oder den „Sodabuckel“ betrafen.

Das ehemalige Betriebsgelände wurde zwischen 2003 und 2012 durch ein Bodenaustausch und in Teilbereichen einer Sicherung mit Kunststoffdichtungsbahnen saniert. Zwischen 2013 und 2020 wurde die Altablagerung „Sodabuckel“ anhand einer Abdeckung mit einer Wasserhaushaltsschicht gesichert. In den westlich angrenzenden Sandgruben lagerten vor allem in drei größeren Mulden (Nord-, West- und Ostmulde) bis zu 2,6 m mächtige Ablagerungen von Materialien aus dem ehemaligen Betriebsgelände. Es wird vermutet, dass diese ursprünglich ab etwa 1893 für die Sandentnahme zur Herstellung von Superphosphatdünger genutzt wurden.

Nach der Verfüllung blieben die Flächen nachfolgend brach liegen und bewaldeten sich. Mitte der 1990er Jahre wurde das Gelände aufgrund der festgestellten Belastungen eingezäunt. Bodenuntersuchungen zeigten, dass die Ablagerungen in den Sandgruben teils oberflächennah sehr hohe Konzentrationen an Schadstoffen wie Arsen (bis 9.500 mg/kg), Blei (bis 46.800 mg/kg), Quecksilber (460 mg/kg), Thallium (314 mg/kg) sowie Dioxinen und Furanen (bis 8.231 ng I-TE/kgⁱ) aufwiesen. Auch in angrenzenden Privatgärten wurden ab ca. 0,6 m u. GOK relevante Schadstoffbelastungen festgestellt.

Kritische Aufnahmewege für die nachgewiesenen Schadstoffe sind die orale sowie inhalative Aufnahme über den Direktkontakt mit belasteten Böden oder über eine Staubeentwicklung. Bis zum Zeitpunkt der Sicherung bildete lediglich die natürliche Auflage auf dem Boden (vor allem Laub) Schutz gegen Verwehungen oder dem Direktkontakt mit Schadstoffen.

Sanierungsziel und Umsetzung

Das Hauptziel der Sanierungsmaßnahme bestand darin, den Wirkungspfad Boden-Mensch nachhaltig zu unterbrechen. Um dies zu erreichen, wurde im Bereich der Altablagerung nach Rodungsmaßnahmen eine mineralische Abdeckung mit geringer Durchlässigkeit installiert, die sowohl Schutz vor Schadstoffausträgen in die Umgebung gewährleisten als auch die Durchsickerung von Niederschlagswasser minimieren soll. Die Oberflächenabdeckung wurde aus einer etwa 0,2 m dicken Trag- und Ausgleichsschicht, überlagert von einer 0,8 bis 1,3 m dicken Unterboden- sowie einer 0,2 m dicken Oberbodenschicht errichtet (siehe Abbildung 1). Im Anschluss wurde die Fläche durch das Neupflanzen von Bäumen und Büschen begrünt.

Für die Privatgrundstücke bestand das Ziel einer uneingeschränkten Nutzbarkeit der Flächen. Hierfür wurden in den betroffenen Privatgrundstücken sowie ergänzend im östlichen Randbereich Bodenaustauschmaßnahmen durchgeführt (siehe Abbildung 1). Der belastete Boden wurde ausgehoben und im mittleren Bereich der Altablagerung verbracht. Nach der Freimessung der Böschung und Sohle wurden die Bereiche mit unbelastetem, geeignetem Unterboden (bis 0,5 m u. GOK) und Oberboden verfüllt.



Abbildung 1: Randbereich der Oberflächenabdeckung in Richtung der Privatgärten mit Bodenaustauschmaßnahme sowie allgemeiner Aufbau der Oberflächenabdeckung (links). Bereich der Bodenaustauschmaßnahme (flächig grün) sowie Oberflächenverlauf der Abdeckung (rechts).

Herausforderungen

Es bestand die Gefahr der Aufwirbelung von schwermetall- und PCDD/PCDF-haltigen Stäuben während der Rodungsarbeiten, Aushubmaßnahmen und Bodenumlagerungen, mit der ein entsprechendes Gesundheitsrisiko für das angrenzende Wohngebiet einher ging. Daher war staubarmes Arbeiten vor allem beim Umgang mit belastetem Bodenmaterial essenziell. In Abstimmung mit dem RP Darmstadt sowie dem HLNUG wurde hierfür ein Sicherheitskonzept entwickelt, um die Gefährdungen zu vermeiden.

Einfache Schutzmaßnahmen

Zu Beginn der Maßnahme wurden um den Bereich der Sandgruben Bauzäune mit Schutzfolie errichtet. Im Rahmen dieser Baustelleneinrichtung wurde die eingezäunte Fläche zum Schwarzbereich, der erst nach den Aushubarbeiten und der vollständigen Abdeckung der belasteten Bereiche aufgehoben wurde.

Rodungsarbeiten ohne Bodenkontakt

Da die oberirdischen Pflanzenbestandteile der 13.140 m² großen Fläche nicht kontaminiert waren, konnten sie dem normalen Wirtschaftskreislauf zugeführt werden. Das Sanierungskonzept sah vor, dass bei der Fällung der Bäume der Kontakt des oberirdischen Schnitt- und Fällgutes mit dem kontaminierten Erdreich sowohl bei der Fällung selbst als auch beim Zwischentransport und eventueller Zwischenlagerung verhindert wird. Erreicht wurde dies durch die Verwendung eines Fällgreifers mit Guillotine (siehe Abbildung 2), mit dem die Bäume gefällt, dabei aufgenommen und außerhalb der Altablagerung abgelegt werden konnten. Die Rodung der betroffenen Waldfläche erfolgte etappenweise und über drei Schneisen. Neben den Bäumen wurde in diesem Verfahren auch das Unterholz bestehend aus kleinen Bäumen und Sträuchern entfernt. Totholz, Wurzelstöcke und Pflanzenteile, die sich im Kontakt mit kontaminiertem Boden befanden, verblieben vor Ort und wurden unterhalb der Trag- und



Abbildung 2: Fällgreifer mit Guillotine

Bei Bedarf erfolgte eine Zerkleinerung mit einem langsam laufenden Mulcher unter durchgehender Bewässerung zur Vermeidung und Niederschlagung von Staub.



Abbildung 3: Blick vom Sodabuckel auf die gerodete Waldfläche mit offenen Bereichen und mit einer Trag- und Ausgleichsschicht bedeckten Schneisen.

Die zwischen den drei Schneisen verbliebenden Bereiche (siehe Abbildung 3) wurden zu einem späteren Zeitpunkt mit der Trag- und Ausgleichschicht abgedeckt, da in diesem Bereich der Aushub aus den Privatgärten eingebaut wurde.

Staubdepositions-messung

Zur Überwachung der Staubbelastung erfolgten im Umfeld der Sanierungsmaßnahme Staubdepositions-messungen. Hierfür wurden bereits im Vorfeld zur Durchführung von Nullmessungen Bergerhoffgefäße an zwei Messstandorten in Luv und Lee aufgestellt (siehe Abbildung 4). Der Staubniederschlag wurde vor Beginn der Maßnahme sowie alle vier Wochen auf den Parameter Arsen untersucht. Hierbei wurden maximale Arsengehalte im Bereich der Bestimmungsgrenze von $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$ nachgewiesen.

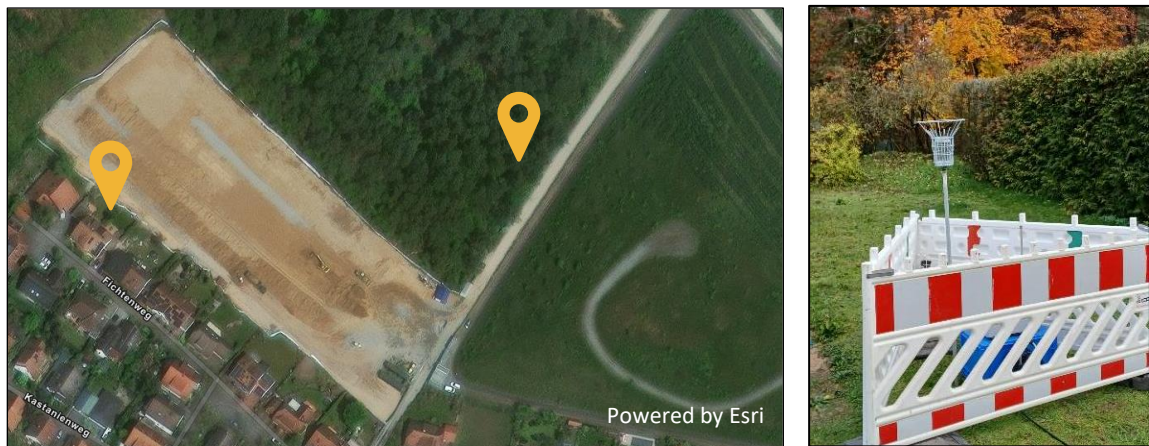


Abbildung 4: Standorte der Bergerhoffgefäße der begleitenden Staubdepositions-messungen (links) sowie Bergerhoffgefäß im Privatgarten, angrenzend an die Sanierungsfläche (rechts)

Schwebstaubmessung

Zur Kontrolle der Staubemissionen und -immissionen wurden kontinuierliche Messungen der Schwebstaubentwicklung während der Sanierungsmaßnahme durchgeführt. Mittels Staubmessgeräten wurden über Laser-Streulichphotometer (Messung der Lichtstreuung von Laserlicht an Partikeln) die Schwebstaubbelastung im direkten Umfeld der Arbeiten (Emission) sowie im Bereich der Privatgrundstücke und innerhalb der Baustellenumzäunung in Hauptwindrichtung durchgeführt (Immission).

In Rahmen der Erstellung des Sanierungskonzeptes wurden in Abstimmung mit dem RP Darmstadt sowie dem HLNUG ein Alarm- und Handlungswert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Schwebstaub (PM10) festgelegt

Bei der Überschreitung dieses Wertes an einer der drei Messgeräte erfolgte eine automatische Warnmeldung auf die Mobiltelefone der Bauleitung und Bauüberwachung.

Eine Überschreitung hatte im ersten Schritt eine Arbeitseinstellung und Ursachenüberprüfung zur Folge.

Je nach Ursache der Grenzwertüberschreitung wurden nachfolgend

Staubminderungsmaßnahmen wie z.B. eine Bewässerung umgesetzt. Neben dem Alarm- und Handlungswert war ein gleitender Tagesmittelwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ermittelt aus stündlichen Messungen) einzuhalten. Die aktuellen Messdaten konnten über einen Onlinezugang des Betreibers visuell abgerufen werden (siehe Abbildung 5).

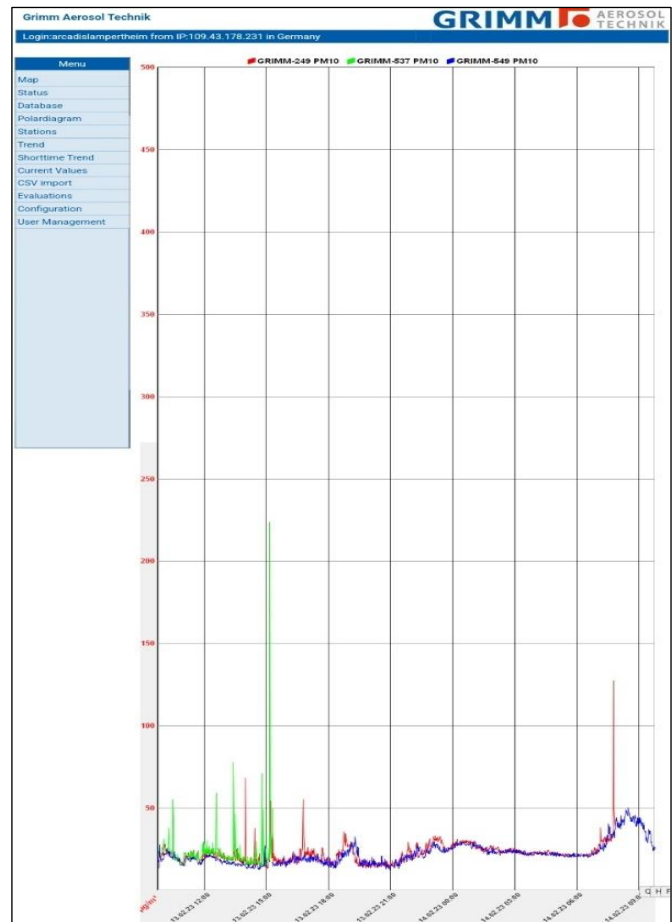


Abbildung 5: Visuelle Darstellung der aktuellen Schwebstaubkonzentration der drei Messgeräte über den Onlinezugang des Betreibers GRIMM Aerosol-Technik

Im Laufe der Maßnahme kam es an den Messgeräten zu mehreren Überschreitungen des Handlungswertes in den Minuten- und Tagesmittelwerten. Ursache hierfür war vor allem die sehr trockene Witterung, die auch am Wochenende, ohne Arbeiten auf dem Gelände der Sandgruben, zu Überschreitungen des Grenzwertes führte (siehe Abbildung 6).

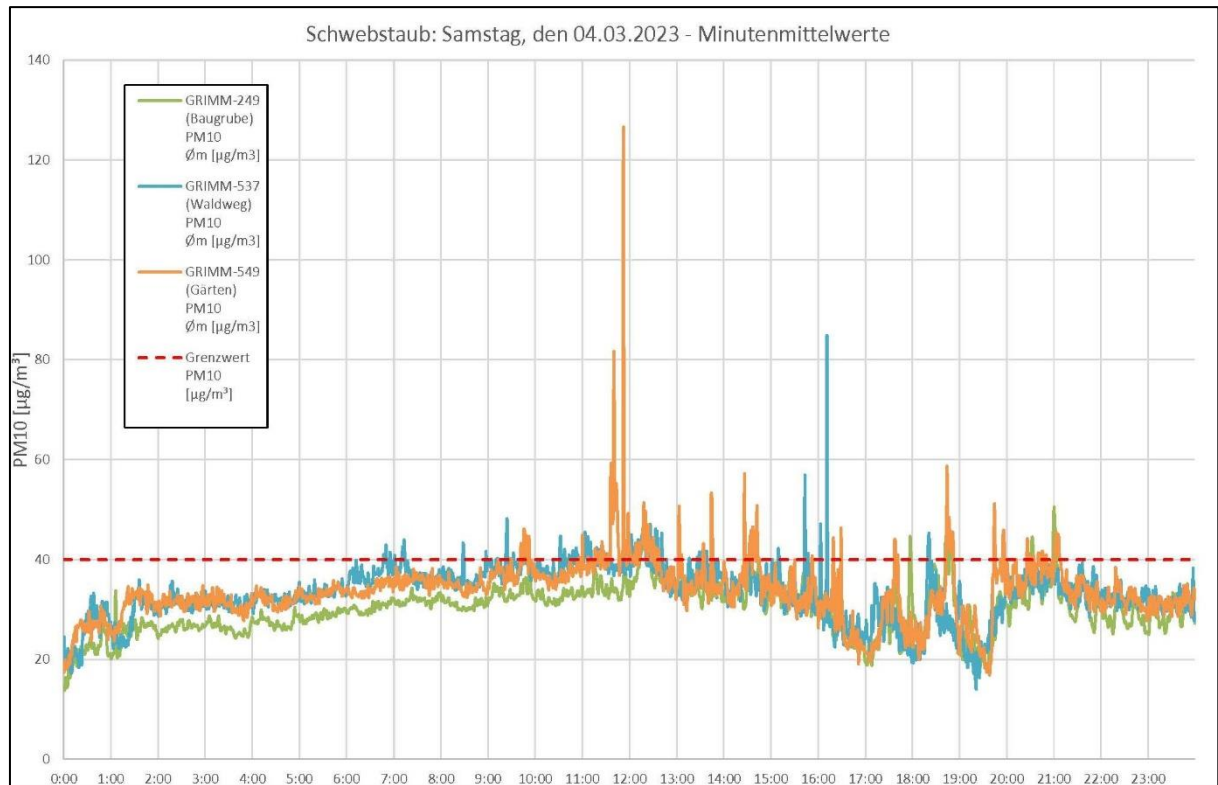


Abbildung 6: Auswertung von Minutenmittelwerte mit Grenzwertüberschreitung an allen drei Messgeräten an einem Samstag ohne Arbeitsmaßnahmen im Bereich der Sanierungsfläche.

Die trockene Witterung sorgte im Umfeld der Baustelle ebenfalls für sehr trockene Bedingungen, was vor allem im Bereich der Baustraße (Anlieferungsverkehr für Bodenmaterial) zu einer hohen Staubentwicklung führte. Auch eine Bewässerung der Waldwege verbesserte die Situation kaum. Gleiches galt für die aufgetragenen Bodenschichten der Oberflächenabdeckung, die trotz Bewässerung zur Staubentwicklung beim Befahren führten. Alle Überschreitungen des Alarm- und Handlungswertes konnten konkreten Ereignissen zugeordnet werden und wurden nachweislich durch unbelastetes Material verursacht.

Windmessung

Eine weitere Sicherheitsvorkehrung zum Schutz der Arbeitenden auf der Baustelle sowie der Anwohner auf den angrenzenden Grundstücken war die Einschränkung der Erdarbeiten in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Windrichtung. In Abstimmung mit dem RP Darmstadt wurde festgelegt, dass Arbeiten in der Nähe oder mit kontaminiertem Material nur bei Windgeschwindigkeiten von $\leq 5,5$ m/s (19,8 km/h) durchgeführt werden dürfen. Weiterhin wurden Windrichtungskorridore festgelegt, in denen die Erdarbeiten ebenfalls nicht ausgeführt werden durften. Dies galt für eine Windgeschwindigkeit > 1 m/s und Windrichtung in Richtung $150^\circ - 225^\circ$ bzw. $150^\circ - 270^\circ$ (Süd-Süd-Ost bis West bzw. Süd-Süd-Ost bis Süd-West) in Abhängigkeit der jeweiligen Flurstücke. Sobald diese Werte dauerhaft für mindestens 15 min überschritten wurden, waren die Erdarbeiten einzustellen. Für die Messung der

Windgeschwindigkeit/ -richtung wurden einerseits im Bereich des Baufelds Windsäcke aufgestellt, andererseits auf dem angrenzenden Sodabuckel erhöht eine Wetterstation installiert (siehe Abbildung 7).

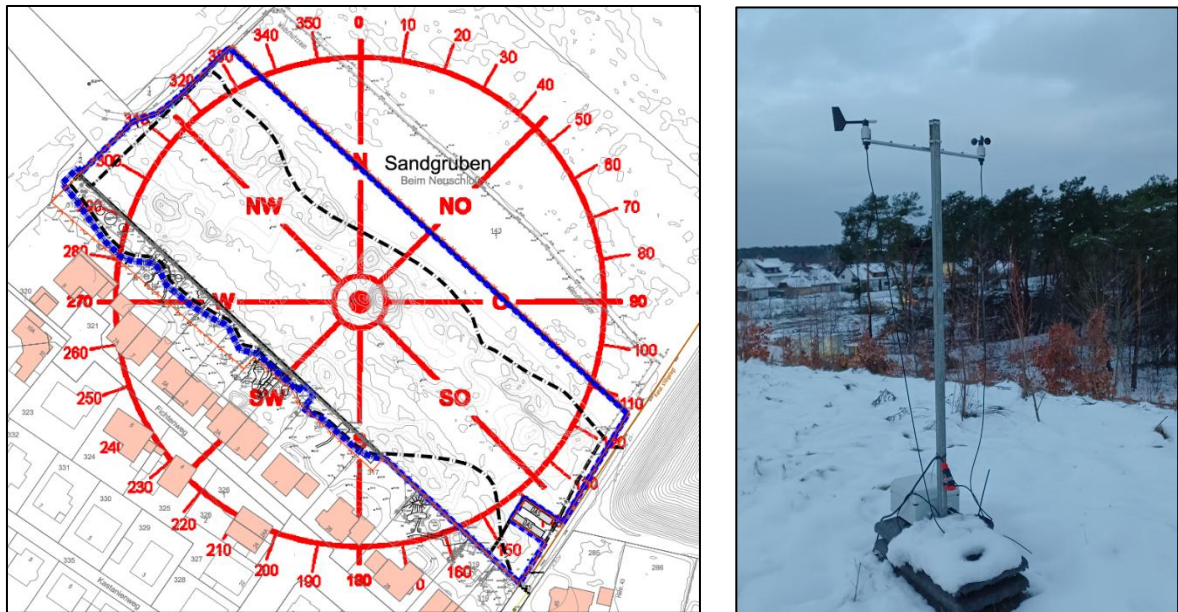


Abbildung 7: Lageplan mit Sanierungsbereich (blau) und Windrose (links) sowie Windmessstation auf dem Sodabuckel (rechts)

Die Datenerfassung erfolgte kontinuierlich im 5 Sekunden Takt. Bei Überschreitung der zulässigen Windgeschwindigkeit erfolgte eine automatische Warnmeldung auf die Mobiltelefone der Bauleitung und der Bauüberwachung, woraufhin die Wetterdaten im Detail geprüft wurden. Sobald die Abweichung von den Vorgaben mehr als 15 Minuten andauerte, wurden die Erdarbeiten eingestellt und erst nach Freigabe durch die örtliche Bauüberwachung fortgesetzt.

Die Daten der Winderfassung konnten ebenfalls online eingesehen und abgerufen werden (siehe Abbildung 8). Zur detaillierten Betrachtung der Daten im Bereich der vorgegebenen maximalen Windgeschwindigkeit/ -richtungen wurden die Daten regelmäßig abgerufen und ausgewertet. An windigen oder böigen Tagen wurden die Arbeiten mit belasteten Bodenmaterial vorsorgend pausiert.

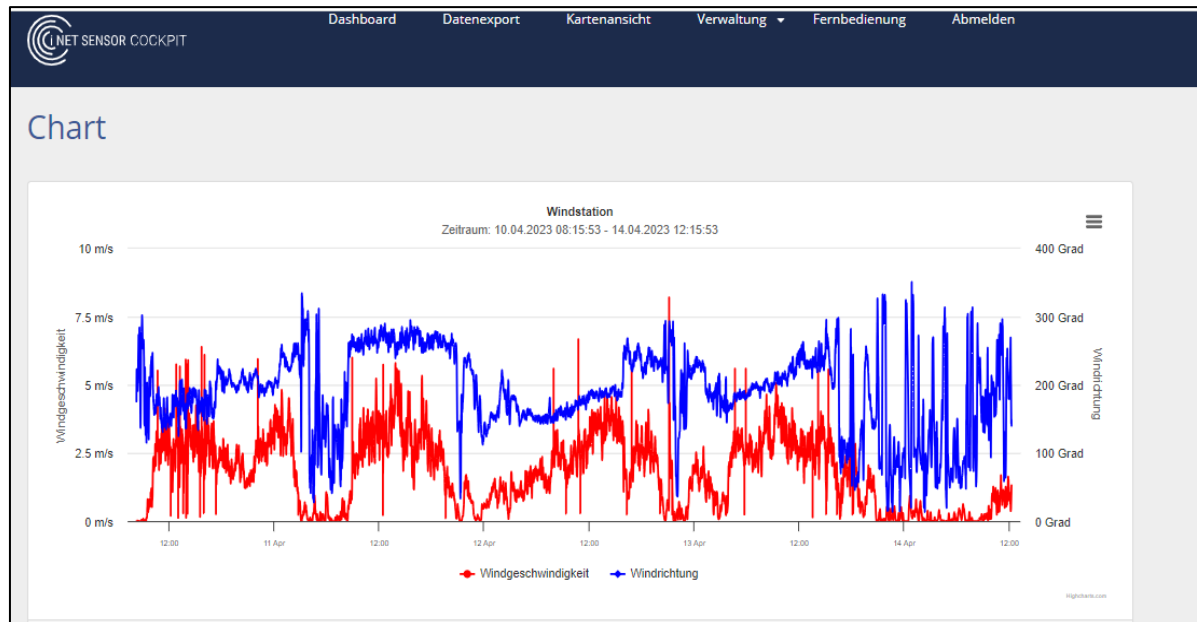


Abbildung 8: Onlinedarstellung der Winddaten der Messstation

Sanierungsabschluss. Die Sanierung der Altablagerungen in Lampertheim-Neuschloß wurde unter anspruchsvollen Rahmenbedingungen erfolgreich realisiert. In einer aktiven Bauphase von sieben Monaten und einer Gesamtlaufzeit von drei Jahren erfolgte die fachgerechte Umlagerung und Sicherung von rd. 2.900 m³ belastetem Boden. Zur Herstellung einer dauerhaft gesicherten und nutzbaren Fläche wurden insgesamt ca. 17.900 m³ unbelasteter Boden eingebracht. Das vormals durch einen Kiefernwald geprägte Areal wurde anschließend durch die Pflanzung von rd. 2.300 Bäumen und Büschen lokaler Arten ökologisch aufgewertet und an die natürliche Umgebung angepasst. Mit diesen Maßnahmen konnten die bestehenden Umweltrisiken nachhaltig beseitigt und die Grundlagen für eine naturnahe und vielfältige Nachnutzung geschaffen werden.

Die Maßnahme erfolgte in enger Zusammenarbeit mit:

- Stadt Lampertheim – Auftraggeber
- RP Darmstadt – Genehmigungsbehörde
- HLNUG – fachliche Unterstützung der Genehmigungsbehörde
- ARGE Sax & Klee / Zech Umwelt – Durchführung
- CDM Smith – Fremdüberwachung
- memo-consulting – ökologische Begleitung
- Umweltplanung Bullermann Schneble – Sicherheitskoordination

¹ Nanogramm I-TE (International Toxic Equivalents) pro Kilogramm = Maßeinheit, die die Gesamtgiftigkeit von Dioxinen und Furanen in einem Kilogramm Material angibt, berechnet nach international standardisierten Bewertungsfaktor

Gefahrenabwehr von Bodenerosion – Verfahrensablauf, Zusammenarbeit und Herausforderungen

Sandra Philippov, RP Kassel; Fabian Achten, HLNUG

1 Hintergrund

Der Vortrag soll die bisherigen Erfahrungen und die Zusammenarbeit zwischen der Oberen Bodenschutzbehörde (RP) und der Fachbehörde/dem Fachgutachter (HLNUG) darstellen und dabei Positives aber auch Negatives beim vorgesehenen „Verfahrensablauf zur Gefahrenabwehr bei Bodenerosion durch Wasser“ widerspiegeln.

In den vergangenen Jahren sind vielen von Ihnen sicherlich Erosionsereignisse durch Wasser, vor allem auf Maisflächen bzw. Feldbestellungen mit sogenannten Hackfrüchten oder im Spätsommer/Herbst auch auf unbestellten Flächen in Erinnerung geblieben. In der Presse tauchen dann oft die Schlagwörter „Unwetter“ und „Schlammlawine“ auf. Durch die Zunahme von Starkregenereignissen kommt es insbesondere auf Ackerflächen (in Hanglage) zu Bodenverlusten durch Bodenerosion. Auch in Zukunft werden Extremwetterereignisse wie Starkregen regelmäßig auftreten oder, bedingt durch den Klimawandel, sogar zunehmen und u. a. wertvollen Boden abtragen. Durch starke Erosionsereignisse gehen Bodenfunktionen unwiederbringlich verloren! Auf erosionsgefährdeten Standorten sind also entsprechende Maßnahmen zum Erosionsschutz erforderlich.

Den rechtlichen Rahmen des Bodenschutzes bildet das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG). Die Pflicht, Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen zu treffen, ist in § 7 BBodSchG geregelt. Bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung richtet sich die Vorsorgepflicht nach § 17 BBodSchG und ist dadurch an die Einhaltung der guten fachlichen Praxis (gfP) geknüpft. In § 9 BBodSchV sind ergänzende Regelungen zur Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen auf Grund von Bodenerosion durch Wasser formuliert. Hervorzuheben ist hier Absatz 5:

*„... (5) Wird die Erosionsfläche landwirtschaftlich genutzt, soll die nach Landesrecht zuständige **landwirtschaftliche Beratungsstelle** bei ihrer Beratungstätigkeit einzelfallbezogene erosionsmindernde Maßnahmen für die Bewirtschaftung der Erosionsfläche empfehlen. Maßnahmen zur Gefahrenabwehr im Einzelfall werden von der zuständigen Behörde nach § 10 Absatz 1 Satz 1 des BBodSchG im Einvernehmen mit der zuständigen Landwirtschaftsbehörde getroffen. Maßnahmen nach Satz 2 können auch solche sein, die sich aus den **Grundsätzen der gfP** nach § 17 Absatz 2 des BBodSchG ergeben.“*

Durch diesen Absatz wird deutlich, dass das bodenschutzrechtliche Instrumentarium zur Umsetzung der Vorsorge im Bereich der landwirtschaftlichen Bodennutzung allein nicht ausreicht! Es bleibt nur die sehr allgemein gehaltene Aufforderung an die landwirtschaftlichen Beratungsstellen (hier der LLH), dass diese die Grundsätze der gfP bei ihrer Beratungstätigkeit vermitteln sollen. Das Augenmerk bei der Gefahrenabwehr bei Bodenerosion liegt somit auf der (interdisziplinären) **Zusammenarbeit** zwischen

landwirtschaftlicher Beratungsstelle (LLH), der oberen Bodenschutzbehörde, der Fachbehörde (HLNUG) sowie der zuständigen Landwirtschaftsbehörde.

2 **Verfahrensablauf**

Zuständig für die Gefahrenabwehr bei Bodenerosion sind in Hessen die Regierungspräsidien als obere Bodenschutzbehörden. Zur Erleichterung des Vollzugs wurde unter Federführung des HMUKLV (Bodenschutzreferat) das Ablaufschema „Gefahrenabwehr bei Bodenerosion durch Wasser“ mit Erläuterungen entwickelt (siehe Seite 3). Für die Erfassung und Bewertung der Schadenssituation (liegt eine schädliche Bodenveränderung vor oder nicht) sowie für Maßnahmenempfehlungen und eventuelle Vor-Ort-Kontrollen kann bzw. sollte eine Unterstützung durch die Fachbehörde (HLNUG) erfolgen.

Zusammengefasst erfolgt der **Verfahrensablauf bei Bodenerosion** wie folgt:

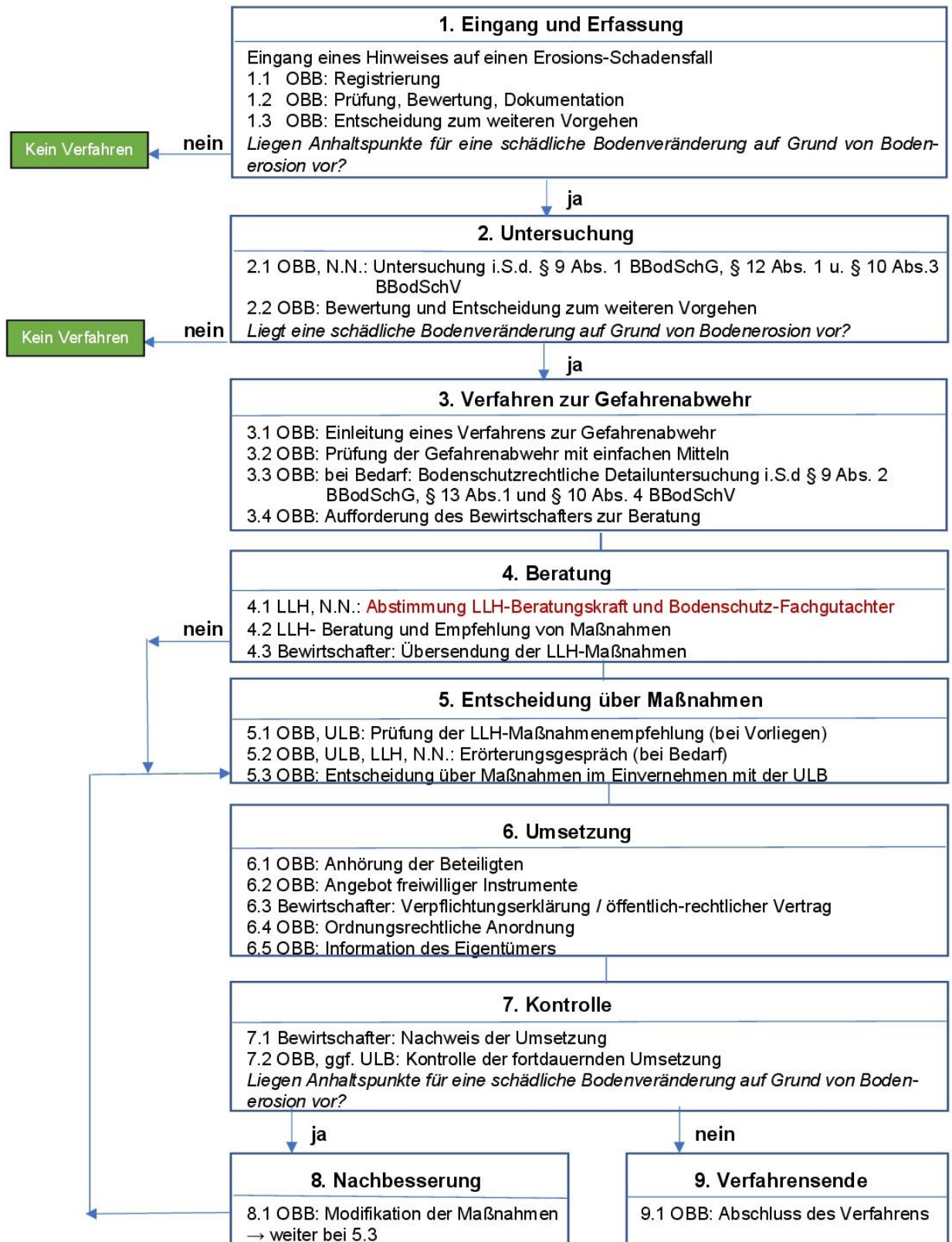
1. Zunächst werden von der Vollzugsbehörde alle Hinweise auf Bodenerosion gesammelt und erfasst.
2. Das HLNUG kann insbesondere mit der Durchführung von orientierenden Untersuchungen unterstützen. Hierbei soll geklärt werden, ob es sich bei einem konkreten Erosionsereignis um eine schädliche Bodenveränderung handelt. Schädliche Bodenveränderungen im Sinne des § 2, Abs. 3 BBodSchG sind Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen. Voraussetzungen für das Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung aufgrund von Bodenerosion durch Wasser sind zum einen, dass erhebliche Mengen Bodenmaterial von einer Erosionsfläche durch Oberflächenabfluss abgetragen wurden, und zum anderen, dass weitere erhebliche Bodenabträge zu erwarten sind (§ 9 Abs. 1 BBodSchV). Bei der Untersuchung werden zunächst die Ausmaße der Erosionsschäden auf und abseits der Fläche(n) über eine Erosionskartierung erfasst, dokumentiert und quantifiziert. In vielen Fällen wird die Kartierung durch Luftbildaufnahmen mithilfe einer Drohne unterstützt. Darüber hinaus wird die landwirtschaftliche Bewirtschaftung auf den betroffenen Flächen erfasst und beurteilt. Durch eine Kombination der aufgenommenen Schadens- und Bewirtschaftungssituation sowie von Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes lassen sich, unter Zuhilfenahme von Erosionsmodellen, die Abläufe der Erosionsereignisse hinreichend genau rekonstruieren und auch hinsichtlich ihrer Erheblichkeit und Wiederkehrwahrscheinlichkeit bewerten. Außerdem können Vorschläge für geeignete Schutzmaßnahmen formuliert werden. Die Erkenntnisse der Untersuchung durch das HLNUG werden den zuständigen Vollzugsbehörden in Form von Bodenschutz-Fachgutachten zur Verfügung gestellt.

3. Liegt eine schädliche Bodenveränderung vor, leitet die Obere Bodenschutzbehörde (OBB) ein Verfahren zur „Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen auf Grund von Bodenerosion durch Wasser“ ein. Im Sinne der Gefahrenabwehr richtet sich das Verfahren in der Regel an den Bewirtschafter. Zudem prüft die OBB ob die Gefahren mit **einfachen Mitteln (z. B. Bewirtschaftungsvorgaben)** abgewehrt oder beseitigt werden können. Wird die Erosionsfläche landwirtschaftlich genutzt, ist der zuständigen Beratungsstelle Gelegenheit zu geben, im Rahmen einer Beratung geeignete erosionsmindernde Maßnahmen für die Nutzung der Erosionsfläche zu empfehlen. Zuständige Beratungsstelle in Hessen ist der Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH). Die OBB fordert den Bewirtschafter auf, sich durch den LLH beraten zu lassen. Gleichzeitig informiert die OBB den LLH über die Aufnahme des Verfahrens, übermittelt das Bodenschutz-Fachgutachten und fordert den LLH auf, ein Abstimmungsgespräch mit dem Bodenschutzfachgutachter (HLNUG) zu führen.

4. Es erfolgt die Beratung und Empfehlung von Maßnahmen. Ziel der Erosionsschutzberatung ist, dem Bewirtschafter geeignete, erforderliche und angemessene Schutzmaßnahmen zur Vermeidung / Minderung von Bodenerosion zu empfehlen.

5. Anschließend prüft die OBB, ob die empfohlenen Maßnahmen geeignet sind, schädliche Bodenveränderungen auf Grund von Bodenerosion durch Wasser wirksam zu verhindern. Dabei sind der Erforderlichkeit der Gefahrenabwehr und dem Verhältnismäßigkeitsgebot auch unter dem Blickwinkel des landwirtschaftlichen Betriebs Rechnung zu tragen.

Verfahrensablauf zur Gefahrenabwehr bei Bodenerosion durch Wasser – Ablaufschema



Gefahrenabwehr:

Auch wenn bei der Beurteilung die Notwendigkeit zur Gefahrenabwehr festgestellt wurde, bedeutet dies nicht zwingend, dass hierauf auch eine bindende Anordnung ergehen muss bzw. kann. Anordnungen zur Gefahrenabwehr nach dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) unterliegen stets dem Maßstab der Verhältnismäßigkeit. Sie dürfen insbesondere nur dann ergehen, wenn sie notwendig sind, um die gesetzlichen Pflichten der Behörde zu erfüllen. Wenn sich der Bewirtschafter in Abstimmung mit den genannten Stellen bereits freiwillig dazu bereit erklärt, die notwendigen Maßnahmen durchzuführen, besteht hier kein Raum für eine bindende Anordnung mehr. Sollte sich aus den jährlich vorzulegenden Nachweisen der Maßnahmenumsetzung jedoch ergeben, dass diese nicht ausreichend erfolgt, wäre dieser Umstand neu zu bewerten. Dies gilt ebenso, wenn sich bei der weiteren Betrachtung der Lage ergeben sollte, dass weitere Maßnahmen zu effektiven Gefahrenabwehr nötig sind. In diesem Fall könnte eine bindende Anordnung der OBB ergehen.

3. Zusammenfassung der Erosionsfälle

2024/2025: Willingshausen-Gungelshausen

- In den Jahren 2012, 2016 und 2022 kam es in der Gemeinde Willingshausen, OT Gungelshausen, zu Bodenerosion in Folge von Starkregenereignissen auf einer Ackerfläche (10 ha groß). Die Schadensereignisse fanden jeweils in den Jahren statt, in denen erosionsanfällige Kulturen auf der Erosionsfläche angebaut wurden. Dies führte wiederholt zu Schäden auf und abseits der Erosionsfläche. Schlamm floss in die angrenzende Ortslage. Dabei wurden Privatgrundstücke, Wege und Abflussgräben verschmutzt.
- Eine betroffene Anwohnerin meldete die Schäden an die Kreisverwaltung des Schwalm-Eder-Kreises. Seitens der UWB des Schwalm-Eder-Kreises wurde der Fall im **Jahr 2024 (Mail)** an das RP Kassel weitergeleitet.
- Die zuständige OBB des RP Kassel bat daraufhin das Dezernat G3 des HLNUG um fachliche Unterstützung. Die betroffene Fläche wurde im **Juli 2024** von Mitarbeitern der OBB und des HLNUG gemeinsam besichtigt.
- Ebenfalls im **Juli 2024** wurden vom HLNUG die Ergebnisse der orientierenden Untersuchung in Form eines Gutachtens dargelegt. Dieses bestätigte das Vorliegen einer „schädlichen Bodenveränderung“. Die Fläche weist aufgrund der Fruchtfolge jedes dritte Jahr eine erhöhte Erosionsanfälligkeit auf, da alle drei Jahre eine **Hackfruchtart, wie Kartoffeln oder Zuckerrüben**, angebaut wird.

Bodenschutz-Fachgutachten HLNUG

- Die Erosionsgefährdung der Erosionsfläche in Gungelshausen wird nach der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) als hoch eingestuft, in besonders gefährdeten Teilbereichen sogar als sehr hoch. Ursächlich ist eine Kombination aus einer ungünstigen Morphologie (Tiefenlinien/Dellen) sowie einer natürlicherweise hohen Erosionsanfälligkeit der Böden. Diese Umstände sind weitgehend unveränderlich und müssen bei einer ackerbaulichen Nutzung der Fläche – im Sinne der Vorsorgepflicht gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen – berücksichtigt werden.
- Der Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung aufgrund von Bodenerosion hat sich im Fall der Erosionsfläche in Gungelshausen durch die mehrfach aufgetretenen Erosionsereignisse mit erheblichen Mengen Bodenabtrag bestätigt. Die Erosionsschäden wurden hierbei in erster Linie durch die Bewirtschaftung der Fläche begünstigt. Die Wahl der Anbaukulturen sowie die Bearbeitungsrichtung wurden mit Blick auf die erhöhte Erosionsgefährdung nicht (ausreichend) an die Gegebenheiten der Fläche angepasst.
- Aus Sicht des Bodenschutzes eine Kombination von Schutzmaßnahmen empfohlen. Dazu gehört allen voran ein Anbauverzicht erosionsanfälliger Kulturen wie Mais, Kartoffeln oder Rüben. Sollte ein weiterer Anbau dieser Kulturen beabsichtigt sein, würden ansonsten anderweitige Schutzmaßnahmen, wie die Anlage von Erosionsschutzstreifen oder die dauerhafte Begrünung besonders gefährdeter Bereiche nötig sein. Ergänzend dazu wurde eine Umstellung der Bearbeitungsform und -richtung empfohlen.
- Zusätzlichen Einfluss auf das Schadensausmaß hatte der Zufluss von Fremdwasser aus einer hangaufwärts gelegenen Fläche. Dieser Zufluss wirkte nicht als alleinige Ursache, hatte jedoch eine verstärkende Wirkung auf das Erosionsgeschehen. Diesbezüglich müsste ein Zufluss von Fremdwasser aus oberliegenden Flächen verhindert werden. Außerdem sollten beide Flächen nicht zeitgleich ähnlich erosionsanfälligen Kulturen bestellt sein.
- Viele Beteiligte, insbesondere betroffene Anwohner, pochen – verständlicherweise – engagiert auf eine nachhaltige Vermeidung weiterer Schäden. Die Forderungen gehen in manchen Fällen aber über die bodenschutzrechtlichen Möglichkeiten der Gefahrenabwehr von Bodenerosion hinaus. Denn das geltende Fachrecht erlaubt nur Maßnahmen, die eine Vermeidung von Bodenabträgen gewährleisten. Dadurch bleiben mitunter kritische Abflussverhältnisse mit unkontrolliert abfließendem Wasser bestehen. Für technische und strukturelle Maßnahmen abseits der Erosionsflächen müssen in der Regel die Kommunen oder die nach jeweiligem Fachrecht zuständige Behörde einbezogen werden.

2025: Fritzlar-Rothhelmshausen

- Im Juni und Juli 2024 kam es in Fritzlar, OT Rothhelmshausen, in Folge von mehreren Starkregenereignissen zu Bodenerosion auf einer Ackerfläche. Die betroffene Erosionsfläche war zum Zeitpunkt der Erosionsereignisse mit Mais bestellt. Dies führte wiederholt zu Schäden auf und abseits der Erosionsfläche. Schlamm floss in die angrenzende Ortslage. Dabei wurden Privatgrundstücke und Straßen verschmutzt. Des Weiteren kam es zum Eintrag des erodierten Bodenmaterials in Oberflächengewässer. Die Kläranlage der Stadt Fritzlar musste aufgrund von Sedimenteinträgen mehrfach abgeschaltet und gereinigt werden.
- Im Nachgang erfolgte eine Meldung der Schadensereignisse an das RP.
- Die zuständige OBB des RP Kassel bat daraufhin das Dezernat G3 des HLNUG um fachliche Unterstützung und Untersuchung der Schadenssituation. Die betroffene Fläche wurde im **März 2025** von Mitarbeitern der OBB und des HLNUG gemeinsam begutachtet.
- Im **April 2025** wurden vom HLNUG die Ergebnisse der orientierenden Untersuchung in Form eines Gutachtens dargelegt. Dieses bestätigte das Vorliegen einer „schädlichen Bodenveränderung“.

Bodenschutz-Fachgutachten HLNUG

- Im Flächenmittel weist die Erosionsfläche eine extrem hohe Erosionsgefährdung auf, die vor allem durch eine steile Hangneigung bedingt wird. Mit zunehmendem Hangverlauf wird dies zusätzlich durch die Bodeneigenschaften sowie durch die topografischen Gegebenheiten verstärkt.
- Durch das wiederholte Auftreten von erheblichen Bodenabträgen auf der Erosionsfläche hat sich der Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung bestätigt.
- Rückwirkend ließ sich das genaue Schadensausmaß vor Ort nicht mehr feststellen. Die Bewertung basiert daher auf minimalistisch geschätzten Bodenabträgen anhand von Foto- und Videodokumentationen.
- Vor allem die Bewirtschaftung in Kombination mit einer erhöhten Hangneigung sowie einer in diesem Verhältnis zu großen Hanglänge sind als Ursachen für die erhöhte Erosionsgefahr herauszustellen.
- Als Schutzmaßnahmen wurde ein Anbauverzicht von erosionsanfälligen Kulturen, insbesondere Mais, nachdrücklich empfohlen. Als weitere Maßnahme wurde die Teilung des Hangverlaufs bzw. der Fläche empfohlen. Eine Unterbrechung der erosionswirksamen Hanglänge kann anderweitig durch die Anlage mehrerer Erosionsschutzstreifen erzielt werden. Außerdem sollte eine Umstellung hin zu einer pfluglosen Bodenbearbeitung als erosionsmindernde Maßnahme in Erwägung gezogen werden.

Akkreditierung für die Probenahme – Vor- und Nachteile einer Kompetenzbestätigung

Dr. Thorsten Spirgath, Spicon GmbH

Die Verpflichtung zur Akkreditierung für die Probenahme ergibt sich aus der Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung vom 9. Juli 2021. Dort steht in § 19 Allgemeine Anforderungen an die Probenahme:

(1) Die Probenahme ist von Sachverständigen im Sinne des § 18 des Bundes-Bodenschutzgesetzes oder Personen mit vergleichbarer Sachkunde zu entwickeln und zu begründen, zu begleiten und zu dokumentieren. (2) **Die Probenahme ist von einer nach DIN EN ISO/IEC 17025 oder DIN EN ISO/IEC 17020 akkreditierten oder nach Regelungen der Länder gemäß § 18 Satz 2 des Bundes-Bodenschutzgesetzes notifizierten Untersuchungsstelle durchzuführen.**

Die Inhalte der DIN EN ISO/IEC 17025:2018 sind insbesondere auf Laboratorien bezogen, daher werden auch Ingenieurbüros oder Baufirmen als Laboratorien bzw. Untersuchungsstellen bezeichnet.

Die Anwendung dieser Norm für den Bereich Probenahme bringt einige Herausforderungen mit sich, denn die Abläufe in einem Ingenieurbüro unterscheiden sich teils erheblich von den Abläufen im Labor. Die Einführung eines Qualitätsmanagementsystems bringt für ein Unternehmen gute Vorteile, ist aber auch mit Nachteilen verbunden. Nachfolgend werden verschiedene Vor- und Nachteile aufgeführt.

Vorteile der Akkreditierung

Nachvollziehbare Prozesse

- Die Unparteilichkeit muss regelmäßig überprüft und dokumentiert werden (weshalb eine Einbindung von externem Personal in ein QMS problematisch sein kann).
- Jedes Probenahmeverfahren muss schriftlich dokumentiert sein, z.B. als Arbeitsanweisung.
- Es müssen schriftliche Regelungen (z.B. Arbeitsanweisungen) für Probenhandhabung, Probentransport, Probenlagerung sowie Probenentsorgung vorhanden sein.

Belastbare Ergebnisse

- Alle Messinstrumente, z.B. Waagen, Thermometer, Wetterstationen, Vor-Ort-Messgeräte (pH, Lf, O₂, Redox) oder Wasseruhren, sind systematisch und regelmäßig zu überprüfen bzw. zu kalibrieren. Es sind Gerätebücher und ggf. Kontrollkarten zu führen.
- Regelungen zur Vermeidung von Querkontaminationen müssen schriftlich dokumentiert werden, z.B. die Lagerung und der Transport von Generatoren, Benzin oder Öl. Diese Dinge sind immer separat zu transportieren (z.B. Anhänger) oder während des Transports einzuhausen.
- Es muss die Unsicherheit für jedes Probenahmeverfahren ermittelt werden. Die Unsicherheiten können z.B. durch Vergleichsprobenahmen bestimmt werden.

Vollständige Dokumentation

- Für jede Probenahme muss ein schriftlicher Auftrag für den Probenehmenden vorliegen. Die Mindestinhalte für diesen Probenahmeplan werden von einschlägigen Normen vorgegeben.
- Für jede Probenahme ist ein Protokoll mit den Mindestinhalten gemäß der einschlägigen Vorgaben zu führen.

Vertrauen in das Unternehmen

- Eine Akkreditierung ist eine Kompetenzbestätigung, d.h. ein Auftraggeber kann auf die Kompetenz und Zuverlässigkeit der KBS vertrauen.
- Es wurde durch einen unparteilichen Dritten (DAkKS) eine erfolgreiche Überprüfung des QMS und der Prüf- und/oder Probenahmeverfahren durchgeführt.
- Vereinfacht die Vergabe von Aufträgen an qualitätsgesicherte Unternehmen.

Nachteile der Akkreditierung

Hoher bürokratischer Aufwand

- Die Unparteilichkeit muss regelmäßig überprüft und dokumentiert werden (weshalb eine Einbindung von externem Personal in ein QMS problematisch sein kann).
- Es muss eine Risikobetrachtung durchgeführt werden. Dafür ist z.B. eine Risikomatrix anzufertigen, welche alle wesentlichen Risiken und Chancen enthält. Die einzelnen Risiken sind zu gewichten und zu werten. Bei Bedarf sind Maßnahmen zu ergreifen.
- Es müssen z.B. Kundenbefragungen durchgeführt werden und der Rücklauf muss ausgewertet werden. Die Ergebnisse sind auch in der jährlichen Managementbewertung zu berücksichtigen.

Zusätzlicher personeller Aufwand (QMB...)

- Es sind Personalakten vorzuhalten, u.a. mit Qualifikationsnachweisen (Zeugnissen), Unparteilichkeitserklärung und Einarbeitungsplan. Weiterbildungen für alle Mitarbeiter im akkreditierten Bereich sind zu planen und umzusetzen.
- Es sind verantwortliche Personen zu benennen, die Aufgaben im QMS übernehmen.
- Der zeitliche Aufwand für die Pflege eines QMS beträgt bei kleineren Unternehmen mindestens 10 bis 20 Stunden pro Woche.

Zusätzlicher finanzieller Aufwand (einige tausend Euro)

- Eine Akkreditierung erzeugt zunächst interne Kosten durch die Erstellung und Einführung eines QMS. Laufende Kosten entstehen durch die permanente Pflege des Systems.
- Kosten entstehen auch durch die spezifischen Anforderungen der Akkreditierung. Es müssen z.B. für alle akkreditierten Probenahmeverfahren Vergleichsprobenahmen durchgeführt werden.

Kleinstunternehmen werden vom Markt gedrängt

- Die Akkreditierungsstelle akkreditiert nur juristische Personen, d.h. Einzelunternehmen können nicht akkreditiert werden.
- Durch die hohen Kosten für die Akkreditierung werden Kleinstunternehmen mit 1 bis 2 Mitarbeitern es sehr schwer haben, eine Akkreditierung dauerhaft aufrechtzuerhalten.

- Erfahrungen zeigen, dass die kleinsten nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditierten Unternehmen wenigstens 5 Mitarbeiter haben.

Die Anforderungen für eine Akkreditierung sind hoch und bringen neue Herausforderungen mit sich, aber neben den fachlichen Anforderungen wird ein großer Aufwand für den Formalismus gefordert. Zu einer guten fachgerechten Probenahme gehören auch umfangreiche Dokumentation, doch Forderungen nach Vergleichsprobenahmen oder Bestimmung von Unsicherheiten von Probenahmen sind für den Umweltbereich nicht immer nachvollziehbar. Insbesondere bei heterogenen Feststoffproben kommen Ergebnisse dabei heraus, die nicht verwertbar sind (z.B. Unsicherheiten über 100 %).

Letztendlich wird sich die Qualität der Probenahme voraussichtlich nicht wesentlich steigern, aber durch den zusätzlichen Aufwand werden die Kosten deutlich erhöht.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) und Fachbeirat Bodenuntersuchungen (FBU): Eckpunkte zum Umgang mit der Mess- und Ergebnisunsicherheit im Vollzug der BBodSchV

Florian Schaller, HLNUG Dezernat „Boden und Altlasten“

Ergebnisse von Bodenuntersuchungen sind trotz aller Bemühungen um Qualitätssicherung immer mit Unsicherheiten behaftet.

Die BBodSchV (2021) führt hierzu den Begriff der „Ergebnisunsicherheit“ ein, trifft jedoch keine Regelungen über die Art und Weise der Berücksichtigung dieser Unsicherheiten. Um den Vollzugsbehörden Hinweise zum Umgang damit zu geben, wurde das Papier „Eckpunkte zum Umgang mit der Mess- und Ergebnisunsicherheit im Vollzug der BBodSchV“ erarbeitet. Die Erarbeitung erfolgte unter fachlichen und juristischen Aspekten durch eine gremienübergreifende Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitgliedern des Altlastenausschusses (ALA) der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) und Mitgliedern des Fachbeirates Bodenuntersuchungen (FBU).

Zur gesamten Ergebnisunsicherheit tragen folgende Komponenten bei:

- Räumliche Heterogenität
- Fundamentalvariabilität
- Unsicherheiten durch die Probennahme
- Messunsicherheit

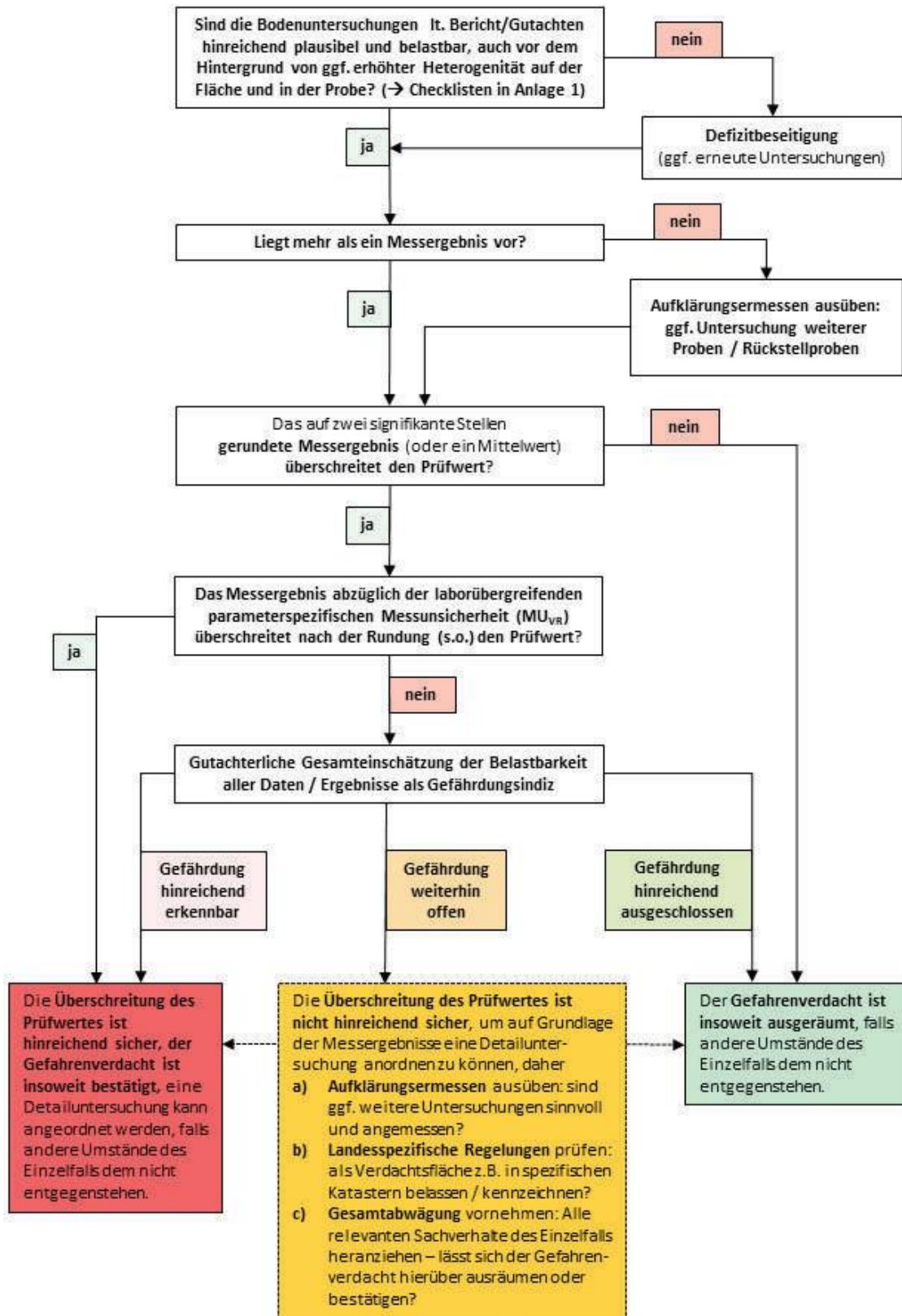
Von diesen Komponenten lässt sich lediglich die analytische Messunsicherheit allgemein quantifizieren. Die weiteren Komponenten sind stark einzelfallabhängig und nicht allgemein bezifferbar; sie können jedoch mit Hilfe von Checklisten zur Qualitäts- und Fehlerprüfung im Anhang des Eckpunktepapiers möglichst identifiziert und eingegrenzt werden.

Zur Berücksichtigung der quantifizierbaren Messunsicherheit empfiehlt die AG, die einfache laborübergreifende parameterspezifische Standardabweichung (MU_{VR}) heranzuziehen. Diese wurde durch den FBU in Ringversuchen ermittelt und veröffentlicht.

Aufgrund fehlender regulatorischer Vorgaben zur Berücksichtigung der Ergebnisunsicherheit im Bereich der BBodSchV wird sich zur Wirkrichtung der Unsicherheit an den allgemeinen Verfahrensgrundsätzen nach § 24 VwVfG orientiert. Der dort enthaltene Untersuchungsgrundsatz besagt, dass sich die Seite, die einen Tatbestand belegen möchte, mögliche Unsicherheiten der Untersuchungsergebnisse zurechnen lassen muss (sog. Günstigkeitsprinzip).

Aus Sicht der AG bietet sich vor der Berücksichtigung der Messunsicherheit zunächst die Rundung des Analyseergebnisses auf 2 signifikante Stellen an. Dies entspricht der Anzahl an signifikanten Stellen, die die Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Mensch aufweisen.

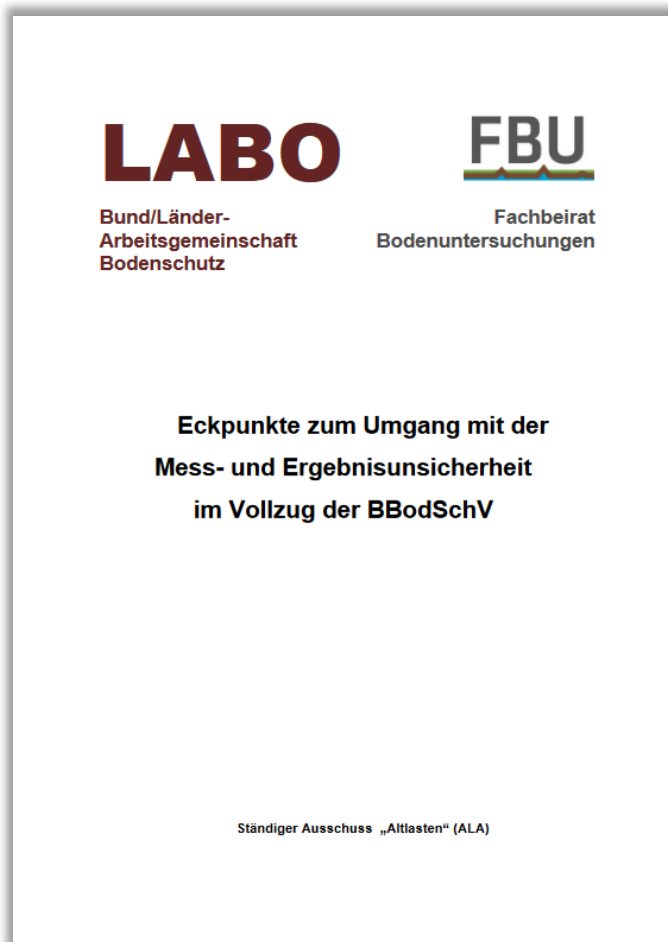
Aufgrund der beschriebenen Grundsätze bietet sich zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bei Ergebnissen im Nahbereich von Prüfwerten ein Vorgehen nach dem folgenden Schema an.



Empfehlungen zum Einbezug der Mess- und Ergebnisunsicherheit bei der Beurteilung von Messergebnissen im Nahbereich von Prüfwerten im Rahmen der Orientierenden Untersuchung

Der Anwendungsbereich für die Berücksichtigung der Ergebnisunsicherheit nach den Empfehlungen des Eckpunktepapiers beschränkt sich auf den Wirkungspfad Boden-Mensch im Rahmen der orientierenden Untersuchung. Es ist zu beachten, dass bei Vollzugsentscheidungen immer alle Umstände und Sachverhalte des Einzelfalls zu berücksichtigen sind. Das Thema Mess- und Ergebnisunsicherheit ist nur ein (kleiner) Teil davon!

Das Eckpunktepapier wurde im September 2024 auf der Seite der LABO veröffentlicht:
https://www.labo-deutschland.de/documents/Eckpunkte_Mess_und_Ergebnisunsicherheit.pdf



Anwendung der PAK-Prüfwerte nach BBodSchV

Matthias Adam, HLNUG Dezernat „Boden und Altlasten“

1 Einleitung

Die Prüfwerte für Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) für den Wirkungspfad Boden-Mensch nach Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV [1]) wurden aufgrund von PAK-Gemischen, wie sie auf typischen Altlastenstandorten vorkommen, festgelegt. Daher sind etwaige Abweichungen von den typischen PAK-Mustern bei Anwendung der Prüfwerte zu berücksichtigen. In diesem Artikel wird ein neues Excel-Tool vorgestellt, mit dem das Vorliegen eines für Altlastenstandorte typischen PAK-Musters geprüft werden kann.

Bei den PAK handelt es sich um eine große Stoffgruppe organischer Verbindungen, die jeweils aus mindestens zwei kondensierten Benzolringen bestehen (verschiedene Quellen gehen von geschätzten 10 000 Verbindungen aus). PAK entstehen durch unvollständige Verbrennung oder Pyrolyse organischer Stoffe wie z. B. Kohle, Öl oder Holz und kommen zudem in einigen fossilen Rohstoffen vor. Sie sind schwer abbaubar und reichern sich daher in der Umwelt an. Die akute Toxizität ist vergleichsweise gering, jedoch werden zahlreiche PAK als kanzerogen (krebserregend) eingestuft. Zur analytischen Erfassung dieser großen Stoffgruppe wurden im Jahr 1977 durch die US-Umweltbehörde (EPA) stellvertretend 16 Einzelverbindungen ausgewählt (sog. EPA-PAK). Dabei handelt es sich um häufig vorkommende und gut analysierbare Vertreter, die i. d. R. bei Fragestellungen im Zusammenhang mit PAK herangezogen werden.

Zur Beurteilung von PAK-Belastungen wurden in der BBodSchV in der Fassung von 1999 [2] für den Wirkungspfad Boden-Mensch Prüfwerte für den bekanntesten und stark kanzerogenen Vertreter Benzo(a)pyren (BaP) festgelegt. Somit wurde für die gesamte Stoffgruppe der PAK ausschließlich die toxikologische Wirkung des Einzelstoffes BaP berücksichtigt. PAK liegen in der Umwelt jedoch immer als Gemische mehrerer Einzelsubstanzen vor. Diese Tatsache wurde in der Novellierung der BBodSchV (2021, [1]) berücksichtigt, indem BaP als stellvertretende Bezugssubstanz für die typischen PAK-Gemische auf PAK-typischen Altlastenstandorten (ehemaligen Kokereien, ehemaligen Gaswerksgeländen und ehemaligen Teermischwerken/-ölläger) festgelegt wurde und die Prüfwerte entsprechend angepasst wurden. Damit werden die toxischen Wirkungen aller Einzelstoffe in den typischen PAK-Gemischen berücksichtigt.

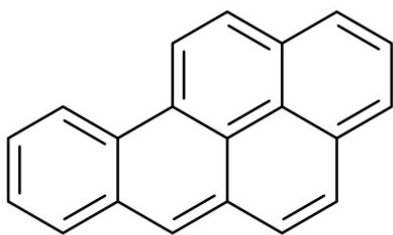


Abb. 1: Strukturformel von Benzo(a)pyren

2 PAK-Prüfwerte der BBodSchV

Für den Wirkungspfad Boden-Mensch sind in der BBodSchV (Anlage 2 Tabelle 4 [1]) folgende Prüfwerte für „Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK₁₆) vertreten durch Benzo(a)pyren“ festgelegt:

Tab. 1: PAK-Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch nach Anlage 2 Tabelle 4 BBodSchV [1]

Nutzungsart	Kinderspielflächen	Wohngebiete	Park- und Freizeitanlagen	Industrie- und Gewerbegrundstücke
Prüfwert (mg/kg TM)	0,5	1	1	5

Die Anwendung dieser Prüfwerte, die sich zunächst nur auf BaP beziehen, ist mit folgenden Anforderungen verbunden (Fußnote 3 von Anlage 2 Tabelle 4 BBodSchV [1]):

„Der Boden ist auf alle PAK₁₆ hin zu untersuchen. Die Prüfwerte beziehen sich auf den Gehalt an Benzo(a)pyren im Boden. Benzo(a)pyren repräsentiert dabei die Wirkung typischer PAK-Gemische auf ehemaligen Kokereien, ehemaligen Gaswerksgeländen und ehemaligen Teermischwerken/-ölläger. Weicht das PAK-Muster oder der Anteil von Benzo(a)pyren an der Summe der Toxizitätsäquivalente im zu bewertenden Einzelfall deutlich von diesen typischen PAK-Gemischen ab, so ist dies bei der Anwendung der Prüfwerte zu berücksichtigen. Liegen die siedlungsbedingten Hintergrundwerte oberhalb der Prüfwerte für Benzo(a)pyren, ist dies bei der Bewertung der Untersuchungsergebnisse gemäß § 15 zu berücksichtigen.“

3 Anwendung der PAK-Prüfwerte

Die o. g. Anforderungen bedeuten, dass zur Anwendung der Prüfwerte verifiziert werden muss, ob die für die Prüfworthableitung zugrunde gelegten typischen Gemische vorliegen. Abweichungen vom typischen PAK-Muster sind insbesondere dann relevant, wenn neben BaP weitere stark kanzerogene PAK (vier und mehr Ringe) in untypisch hohen Gehalten vorhanden sind. In diesen Fällen kann eine gesonderte Einzelfallbetrachtung erforderlich sein.

Vor Anwendung der Prüfwerte muss also zunächst geprüft werden, ob

- das PAK-Muster der untersuchten Bodenprobe sowie
- der Anteil von BaP an der Gesamtoxitizität der untersuchten Probe (ausgedrückt als Anteil an der Summe der Toxizitätsäquivalente)

mit den typischen PAK-Gemischen von ehemaligen Kokereien, ehemaligen Gaswerksanlagen und ehemaligen Teermischwerken/-öllagern vergleichbar ist. Hierzu ist die Analyse auf alle PAK₁₆ Voraussetzung.

4 Excel-Tool zur Prüfung des PAK-Musters und des BaP-Anteils

Die beiden in der BBodSchV geforderten Prüfschritte (PAK-Muster, Anteil von BaP an der Gesamtoxitizität) können durch das vom HLNUG entwickelte Excel-Tool „[PAK-Musterprüfung zur Anwendbarkeit der PAK-Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch nach BBodSchV](#)“ (siehe auch [4]) automatisch durchgeführt werden, indem die Analysenergebnisse der Bodenprobe (16 EPA-PAK) dort in Spalte B eingegeben werden. Die Ergebnisse und Bewertungen der Prüfschritte werden im Tool wiedergegeben und farblich hervorgehoben. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus dem Excel-Tool für den ersten Prüfschritt (PAK-Muster), Abbildung 3 für den zweiten Prüfschritt (Anteil von BaP an der Gesamtoxitizität). Die Berechnungen und Erläuterungen basieren dabei auf der sächsischen Arbeitshilfe zur „[Bewertung von Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen \(PAK\) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch](#)“ [3].

A	B	C	D	E
PAK-Einzelsubstanz	Eingabe: Gehalt im Boden (mg/kg TM)*	Anteils-Obergrenzen bezogen auf BaP-Gehalt**	Normieren PAK-Messwerte auf BaP rel. Anteil PAK-Einzelsubstanz (Gehalt PAK-Einzelsubstanz ÷ Gehalt BaP)	rel. Anteil PAK-Einzelsubstanz ≤ Anteils-Obergrenze?
Naphthalin	0,06	160	0,04	
Acenaphthylen	22	5	13,75	prüfen
Acenaphthen	2	95	1,25	plausibel
Fluoren	0	110	0,00	
Phenanthren	2,88	140	1,80	plausibel
Anthracen	0,47	240	0,29	plausibel
Fluoranthren	6,17	55	3,86	plausibel
Pyren	4,48	30	2,80	plausibel
Benzo(a)anthracen	2,1	6	1,31	plausibel
Chrysen	2,1	5	1,31	plausibel
Benzo(b)fluoranthren	3,1	3	1,94	plausibel
Benzo(k)fluoranthren	1,1	3	0,69	plausibel
Benzo(a)pyren***	1,6	1	1,00	plausibel
Indeno(1,2,3-cd)pyren	1,2	3	0,75	plausibel
Dibenzo(ah)anthracen	0,3	1,5	0,19	plausibel
Benzo(ghi)perylene	1,3	3	0,81	plausibel

Spalte E: Es werden die ermittelten relativen Anteile der PAK-Einzelsubstanzen (Spalte D) mit den Anteils-Obergrenzen der PAK-Einzelsubstanzen bezogen auf den BaP-Gehalt (Spalte C) verglichen.

Überschreitungen werden rot, Unterschreitungen grün markiert. Bei Überschreitung dieser Obergrenzen, insbesondere bei den höhermolekularen PAK-Verbindungen, sollte überprüft werden:

- Können analytische Probleme zur Überschreitung geführt haben?
- Können andere PAK-Quellen als Kokereien, Gaswerke, Teeröllager vorliegen?
- Sofern Überschreitungen bei niedermolekularen PAK-Verbindungen auftreten: Hinweis auf jungen PAK-Schaden und eher geringen Einfluss auf das toxische Potenzial des Gemisches.

Spalte D: Messwerte werden auf Benzo(a)pyren normiert. Hierzu wird der Analysenwert einer PAK-Einzelsubstanz durch den Benzo(a)pyren-Gehalt der Probe dividiert.

Spalte C: Hier sind die Anteils-Obergrenzen bezogen auf den Gehalt an Benzo(a)pyren aufgeführt. Benzo(a)pyren repräsentiert die Wirkung typischer PAK-Gemische (Kokereien, Gaswerke, Teeröllager).

Abb. 2: Prüfung des PAK-Musters auf Plausibilität

A	B	F	G	H
PAK-Einzelsubstanz	Eingabe: Gehalt im Boden [mg/kg TM]*	Prüfung des Benzo(a)pyren-Anteils Beträgt der Anteil von BaP an der Summe der ermittelten Toxizitätsäquivalente zwischen 30 % und 60 %?		
		Toxizitätsäquivalenzfaktor (TEF)	Toxizitätsäquivalent (TEQ) [mg/kg TM]	Anteil an Σ TEQ [%]
Naphthalin	0,06			
Acenaphthylen	0,09	0,01	0,0009	0,02
Acenaphthen	0,1			
Fluoren	0,12			
Phenanthren	2,88			
Anthracen	0,47	0,01	0,0047	0,10
Fluoranthren	6,17	0,01	0,0617	1,27
Pyren	4,48			
Benzo(a)anthracen	2,1	0,1	0,21	4,34
Chrysen	2,1	0,01	0,021	0,43
Benzo(b)fluoranthren	3	1	3	61,97
Benzo(k)fluoranthren	1,1	0,1	0,11	2,27
Benzo(a)pyren**	1	1	1	20,66
Indeno(1,2,3-cd)pyren	1,2	0,1	0,12	2,48
Dibenzo(ah)anthracen	0,3	1	0,3	6,20
Benzo(ghi)perylene	1,3	0,01	0,013	0,27
Σ TEQ			4,84	

Spalte H: Berechnet wird der jeweilige prozentuale Anteil an der Summe der ermittelten Toxizitätsäquivalente.

Liegt der BaP-Anteil zwischen 30 % und 60 % wird der Wert grün markiert. Die PAK-Prüfwerte der BBodSchV können direkt angewendet werden.

Liegt der BaP-Anteil unter 30 % wird der Wert rot markiert. Es kann eine Risikounterschätzung angenommen werden, da neben BaP andere PAK-Verbindungen mit hohem toxischen Potenzial vorliegen. Auch bei Unterschreitung der PAK-Prüfwerte der BBodSchV kann ggf. Handlungsbedarf bestehen.

Liegt der BaP-Anteil über 60 % wird der Wert blau markiert. Es kann eine Risikoüberschätzung angenommen werden, da ein vergleichsweise hoher BaP-Anteil vorliegt. Im Falle einer nur geringfügigen Überschreitung der PAK-Prüfwerte der BBodSchV ist ggf. kein Handlungsbedarf erforderlich.

Spalte F: Die vorgegebenen Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) beschreiben das kanzerogene Potenzial der PAK-Einzelparame-ter.

Spalte G: Zur Berechnung der Toxizitätsäquivalente (TEQ) wird der Analysenwert (Spalte B) mit dem Toxizitätsäquivalenzfaktor (Spalte F) multipliziert. Die Aufsummierung aller TEQ erfolgt in Feld G20 (Σ TEQ).

Abb. 3: Prüfung des Benzo(a)pyren-Anteils an der Gesamtttoxizität

Sind die relativen PAK-Einzelsubstanz-Anteile (s. Abb. 2) alle „plausibel“ (grün hinterlegt) und liegt der Anteil von BaP an der Gesamtttoxizität (s. Abb. 3) zwischen 30 % und 60 % (grün hinterlegt), kann der jeweilige Prüfwert aus der BBodSchV angewendet werden. Anderenfalls ist ggf. eine Einzelfallbewertung erforderlich (s. Erläuterungen im Excel-Tool [4]). Von besonderer Relevanz sind die PAK mit hohem toxikologischem Potenzial: Benzo(b)fluoranthren, Benzo(a)pyren und Dibenzo(ah)anthracen.

Weitere Hinweise zur beschriebenen Prüfung des PAK-Musters und zur Ermittlung des resorptionsverfügbaren Anteils können der sächsischen Arbeitshilfe (s. o.) entnommen werden.

Bei Fragestellungen zu den zuvor genannten Aspekten, insbesondere zu Einzelfallbeurteilungen bei Abweichungen vom typischen PAK-Muster, steht Dezernat G3 „Boden und Altlasten“ des HLNUG beratend zur Verfügung.

5 Literatur

- [1] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716)
- [2] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 3 Absatz 4 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465)
- [3] Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2023): „Bewertung von Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch“
(https://www.boden.sachsen.de/download/Bewertung_von_PAK_2023_11_17.pdf)
- [4] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2025) : „Erläuterungen zur Anwendung der Prüfwerte für Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) für den Wirkungspfad Boden-Mensch nach Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)“ (<https://www.hlnug.de/themen/altlasten/altlastenschwerpunkte/anwendung-der-pruefwerte-fuer-polyzyklische-aromatische-kohlenwasserstoffe-pak>)

„Wiederherstellung des Naturraums durch Renaturierung einer Industriebrache“

Daniel Fröhlich, HIM GmbH Bereich Altlastensanierung -HIM-ASG-

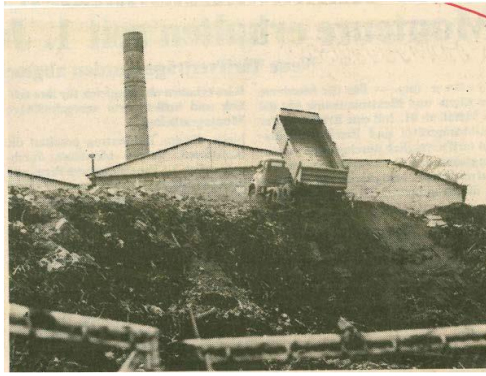
Die Fa. KVG (Kabelverwertungsgesellschaft) hat außerhalb der Ortslage von Butzbach-Ebersgöns in Hessen Altkabel verwertet. Es erfolgte eine Sortierung und Metallrückgewinnung mittels mechanischer Abtrennung und später durch Verbrennung der Kabelummantelungen. Das Unternehmen wurde bis 1996 betrieben, danach erfolgte die Liquidation.

Vor dem Nutzungszeitraum der Fa. KVG (ab ca. 1965) war auf dem Gelände ein Unternehmen mit ähnlichem Unternehmenszweck ansässig (Fa. Südwest-Metall). Davor, mind. ab 1945, war ein Steinbruchbetrieb (Fa. Westermann) ansässig, dessen Abbaugrube noch südlich des KVG-Werksgebietes in Form eines Steinbruchs mit Grundwasseraufdeckung erhalten ist. Abgebaut wurden lokal anstehende Massenkalk (Abb. 1).



Abb. 1: Luftbild des KVG-Gelände 1953 zur Zeit des Muschelkalkabbaus (Quelle: Geoportal Hessen)

Das Betriebsgelände steht auf einer künstlich hergestellten Berganlehnung (Abb. 2 u. 3), welche nach Nordosten bzw. Osten sukzessive zunimmt und die natürliche Geländeoberfläche überragt. Neben dem entstandenen Abraum des Muschelkalkabbaus wurden auch Fremdadfälle abgekippt.



Quelle: Butzbacher Zeitung



Quelle: Google Earth

Abb. 2 u. 3: Undatiertes Foto und KVG-Gelände 2009

Bis zu 12 m mächtige Auffüllungen am Standort bestehen aus Erdaushubmassen, in die Produktionsreste wie Aschen, Schlacken und Kabelreste eingelagert sind. Schwermetall-, PAK- und MKW-Belastungen liegen oberflächennah als Immissionen der zurückliegenden Kabelverschmelzung vor.

Nach dem Bau von fünf Grundwassermessstellen im Jahr 2014 zeigten sich beim nachfolgenden Monitoring analytische Auffälligkeiten für die standorttypischen Parameter PAK, MKW und Schwermetalle, analog zu den Bodenbelastungen des Altstandortes. Zur Bewertung der Standortsituation wurde ergänzend eine Sickerwasserprognose vorgenommen.

Um die potenziell aktiven Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Grundwasser zu unterbrechen, wurde ein Sanierungskonzept inkl. Rückbau der verbliebenen Gebäude, Profilierung und Abdichtungssystem begleitet von einer Flora-/Fauna-Kartierung mit entsprechender Eingriffs- und Ausgleichsplanung erstellt.

In der zweiten Jahreshälfte 2023 erfolgte der Beginn der Sicherungsmaßnahme, zunächst mit dem selektiven Rückbau der Betriebsgebäude. Im Rahmen einer vorlaufenden Gebäudeschadstoffsanierung und Entrümpelung wurden gefährliche Abfälle wie Asbest und künstliche Mineralfasern (KMF) fachgerecht ausgebaut und entsorgt. Die Gebäude wurden nach und nach abgebrochen, wobei das entstandene, unbelastete Abbruchmaterial vor Ort verblieb. Der für das KVG-Gelände markante Schornstein wurde im November 2023 von einem Spezialunternehmen gesprengt. Im Bereich der Böschungsschultern und auf dem Plateau wurden nach Freigabe der ökologischen Baubegleitung Rodungsarbeiten durchgeführt. Der erste Bauabschnitt endete im Dezember 2023.

Aufgrund naturschutzrechtlicher Auflagen wurde zwischen Januar und April 2024 die Bauarbeiten pausiert. In diesem Zeitraum erfolgte lediglich die Anlieferung von Profilierungsmaterial für den Bau des Abdichtungssystems.

Ab Mai 2024 wurde zunächst eine flächige Gesamtüberdeckung mit dem angelieferten Profilierungsmaterial hergestellt. Darauf folgte der Einbau einer Tondichtungsbahn sowie einer Drainagematte bis über die Böschungsschultern (Abb. 4 u. 5). Die verwendeten Materialien zeichnen sich durch ihre sehr lange Lebensdauer aus. Darüber erfolgte ein Auftrag von standortangepasstem Bodensubstrat (Oberboden). Mit dem angelieferten Bodenmaterial wurde ein Dachprofil hergestellt, auf dem das Niederschlagswasser optimal über die eingebaute Drainagematte abgeleitet werden kann. Weiterhin wurden verbliebene Absturzkanten entfernt und im Bereich des Böschungsfußes Kabelablagerungen überdeckt.

Im Herbst 2024 wurde in die abschließende Rekultivierungslage ein standortangepasstes Regiosaatgut eingesät. An den Böschungsschultern wurden zudem passende Gehölze angepflanzt. Für die bessere Ausbreitung des Gewöhnlichen Rosskümmels wurden einige Flächen zusätzlich gekalkt.

Der Anwuchs wurde im Frühling 2025 im Rahmen einer ersten Zustandskontrolle der ökologischen Baubegleitung durchgeführt. Das Regiosaatgut ist zum größten Teil aufgegangen. Zum Zeitpunkt der Begehung konnten keine invasiven Arten festgestellt werden. Erosionsrinnen im Bereich der Böschungen wurden keine angetroffen. Das renaturierte Gelände fügt sich damit nahtlos in den bestehenden Naturraum und das Landschaftsbild ein.

Das Grundwassermonitoring soll in den nächsten Jahren fortgesetzt werden. In den untersuchten Messstellen wurden keine Schadstoffbelastungen festgestellt. Zudem soll für die Pflegemaßnahmen der KVG-Fläche ein Bewirtschaftungskonzept erstellt werden. Jährliche Mäharbeiten sowie Pflegeschnitte an den Gehölzen sind hierbei eingeplant.



Abb. 4 u. 5: Bau des Abdichtungssystems aus Drainagematte (schwarz) und Tondichtungsbahn (weiß) in Blickrichtung West (links) und Ost (rechts) im Sommer 2024 (Quelle: D. Fröhlich, HIM-ASG).



Abb. 6: Detailaufnahme des Aufbaus des Abdichtungssystems (Quelle: D. Fröhlich, HIM-ASG)

Hintergrundbelastungen von Böden mit PFAS – Ergebnisse der hessischen Boden-Dauerbeobachtung

Katrin Lügger, HLNUG Dezernat „Boden und Altlasten“

1 Einleitung

Die Boden-Dauerbeobachtung hat das Ziel, den aktuellen Bodenzustand zu beschreiben, mögliche Veränderungen langfristig zu überwachen und Prognosen für zukünftige Entwicklungen abzuleiten [1]. Zu diesem Zweck wurden in Hessen bereits 1992 die ersten Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) eingerichtet. Bis heute gibt es hessenweit 68 BDF auf repräsentativen land- und forstwirtschaftlich genutzten Standorten, auf denen in regelmäßigen Zeitabständen wiederholt Bodenproben entnommen und auf eine Vielzahl an bodenchemischen und -physikalischen Parametern untersucht werden. Die ausgewählten Standorte stellen überwiegend bewusst keine Kontaminationsschwerpunkte dar, sondern dienen der Untersuchung der allgemein verbreiteten Hintergrundbelastung. Einige BDF liegen jedoch innerhalb von Überschwemmungsbereichen größerer Flüsse – an diesen Flächen ist durch den zusätzlichen Eintrag potenziell belasteter Hochwassersedimente eine höhere Schadstoffbelastung zu erwarten.

Seit 2022 wurde das reguläre Untersuchungsspektrum der Boden-Dauerbeobachtung um die Analytik auf Per- und Polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) erweitert. PFAS – in den Medien auch oft als „Ewigkeitschemikalien“ betitelt – sind eine Sammelbezeichnung für langlebige, ausschließlich anthropogen hergestellte organische Verbindungen, die nach aktuellem Kenntnisstand mehr als 10.000 Einzelsubstanzen umfassen. Sie werden seit Jahrzehnten aufgrund ihrer hohen thermischen und chemischen Stabilität sowie ihrer wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften in vielen industriellen Prozessen verwendet und sind in zahlreichen Verbraucherprodukten enthalten. PFAS gelangen auf unterschiedlichen Eintragspfaden in die Umwelt und auch in die Böden, die einerseits eine wichtige Senke für diese Schadstoffgruppe darstellen, andererseits aber im Hinblick auf eine Auswaschung ins Grundwasser oder eine Aufnahme durch Pflanzen auch als Quelle fungieren können [2].

2 Methodik

Eine BDF besteht in Hessen in der Regel aus einer Kernfläche von 30 m x 30 m, auf der nach einem einheitlichen Schema in einem Untersuchungsturnus von 5 bis 10 Jahren wiederholt repräsentative Flächenmischproben bis in eine Bodentiefe von mindestens 30 cm gewonnen werden. Auf BDF unter Waldnutzung werden zusätzlich Proben der organischen Humusaufgaben entnommen. Abbildung 1 zeigt schematisch das BDF-Probennahmekonzept: Im Regelfall werden über die Diagonalen der Kernfläche 18 Einzelproben entnommen. Bei einer Wiederholungsbeprobung erfolgt jeweils eine Drehung der Diagonalen um eine bestimmte Gradzahl, damit nicht bereits gestörte Bereiche der Fläche beprobt

wässrige Eluatphase abtrennbar wäre. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wichtig war die einheitliche Trocknung der Proben bei 40 °C vor der Elution.

Insgesamt hat das TZW auf diese Weise bis jetzt 46 hessische BDF auf PFAS untersucht – dabei handelt es sich um 12 Wald-BDF, 15 Grünland-BDF und 17 Acker-BDF sowie 2 BDF unter Weinbaulicher Nutzung, die im Folgenden zusammen mit den Acker-BDF ausgewertet werden.

3 Ergebnisse

An allen bisher untersuchten BDF-Standorten konnte sowohl im Feststoff als auch im Eluat mindestens ein PFAS-Einzelstoff oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen werden. Im Feststoff wurden in allen Oberboden-Proben PFBA, PFOA und PFOS gemessen, in vielen Fällen auch weitere Carbonsäuren (PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFNA, PFDA, PFUnDA), vereinzelt konnten die langkettigen Carbonsäuren PFDODA, PFTrDA und PFTeDa, die Sulfonsäuren PFBS und PFHxS sowie die Ersatzstoffe/Vorläuferverbindungen PFOSA und H4PFOS nachgewiesen werden. Nur 7 der insgesamt 23 untersuchten Einzelstoffe wurden nicht gefunden. In den Humusaufgabe-Proben der Wald-BDF ähnelten die Nachweisraten der Einzelstoffe denen der mineralischen Oberböden. Nur in drei Proben der Laubaufgabe konnten im Feststoff keinerlei PFAS nachgewiesen werden.

In den wässrigen Eluaten der Oberboden-Proben waren die Nachweisraten noch höher als im Feststoff, bedingt auch durch die deutlich niedrigere Bestimmungsgrenze. In allen bis fast allen Proben konnten die Carbonsäuren von PFBA bis PFNA sowie die Sulfonsäuren PFBS, PFHxS und PFOS gemessen werden. Manchmal konnten auch die sehr langkettigen Carbonsäuren (PFDA, PFUnA, PFDODA und PFTrDA), weitere Sulfonsäuren (PFPeS, PFHpS, PFDS) sowie PFOSA und H4PFOS bestimmt werden.

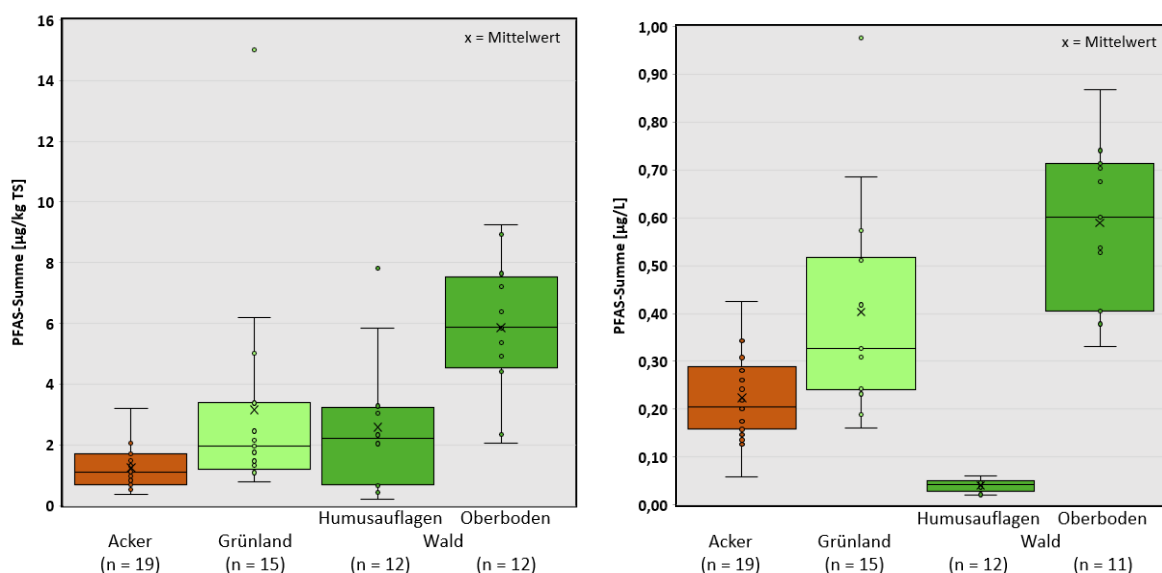


Abb. 3: Box-Whisker-Plots der PFAS-Feststoffgehalte (links) und PFAS-Eluatgehalte (rechts, Elution Oberböden Wasser/Feststoffverhältnis 2:1, Humusaufgaben Wasser/Feststoffverhältnis 10:1) in den Oberböden und Humusaufgaben hessischer BDF, differenziert nach den Nutzungen Acker (inkl. Weinbau), Grünland und Wald

Insgesamt wurden in den bisher untersuchten Oberböden im Feststoff PFAS-Summengehalte zwischen 0,37 und 15,01 µg/kg TS gemessen. Im Vergleich der Nutzungen zeigen die untersuchten Acker-BDF mit einem durchschnittlichen Summenwert von knapp über 1 µg/kg TS die geringsten PFAS-Gehalte, gefolgt von den BDF unter Grünland mit einem mittleren Gehalt von knapp 2 µg/kg TS (jeweils Median). Knapp dreimal so hohe mittlere Gehalte (Median 5,86 µg/kg TS) wurden in den Oberböden der BDF im Wald gemessen, während die Gehalte in den Humusauflagen in einem ähnlichen Bereich wie die Grünland-Oberböden liegen (Abb. 3, links).

Im Eluat wurden in den Oberböden für die PFAS-Summe Konzentrationen zwischen 0,0579 und 0,9763 µg/L gemessen. Analog zu den Feststoffanalysen wurden in den Proben der Acker-BDF mit einem Median von 0,2045 µg/L durchschnittlich die niedrigsten Werte gemessen, gefolgt von den Grünland-BDF mit 0,327 µg/L. Die Eluatkonzentrationen der Wald-Oberböden waren mit einer mittleren Konzentration von 0,6 µg/L deutlich höher. Im Vergleich dazu lagen die in den Humusauflagen gemessenen Eluatkonzentrationen mit einem Median von 0,043 µg/L eine Größenordnung niedriger. Bedingt wird das durch die abweichende Methodik bei der Elution (Wasser/Feststoff-Verhältnis von 10:1 statt 2:1) (Abb. 3, rechts).

Die mit Abstand höchste PFAS-Summe in Feststoff und Eluat wurde auf der Grünland-BDF in Biebesheim am Rhein gemessen, die bei Hochwasserereignissen regelmäßig überflutet wird (s. Ausreißer in Abb. 3). Ebenfalls vergleichsweise hohe Feststoff- und Eluatgehalte wurden in den Böden der beiden benachbart gelegenen Wald-BDF in Schotten im Vogelsbergkreis gefunden. Ein weiterer Waldstandort in der Nähe von Bad Soden-Salmünster im Main-Kinzig-Kreis sowie ein Niedermoor-Standort im Altlauf des Neckars bei Gernsheim zeigte ähnlich hohe Gehalte im Feststoff. Im Eluat waren es neben zwei Wald-BDF im Landkreis Waldeck-Frankenberg sowie einem in Frankfurt-Schwanheim noch zwei weitere Grünlandstandorte in Überschwemmungsbereichen des Mains und der Fulda, die erhöhte PFAS-Belastungen zeigten.

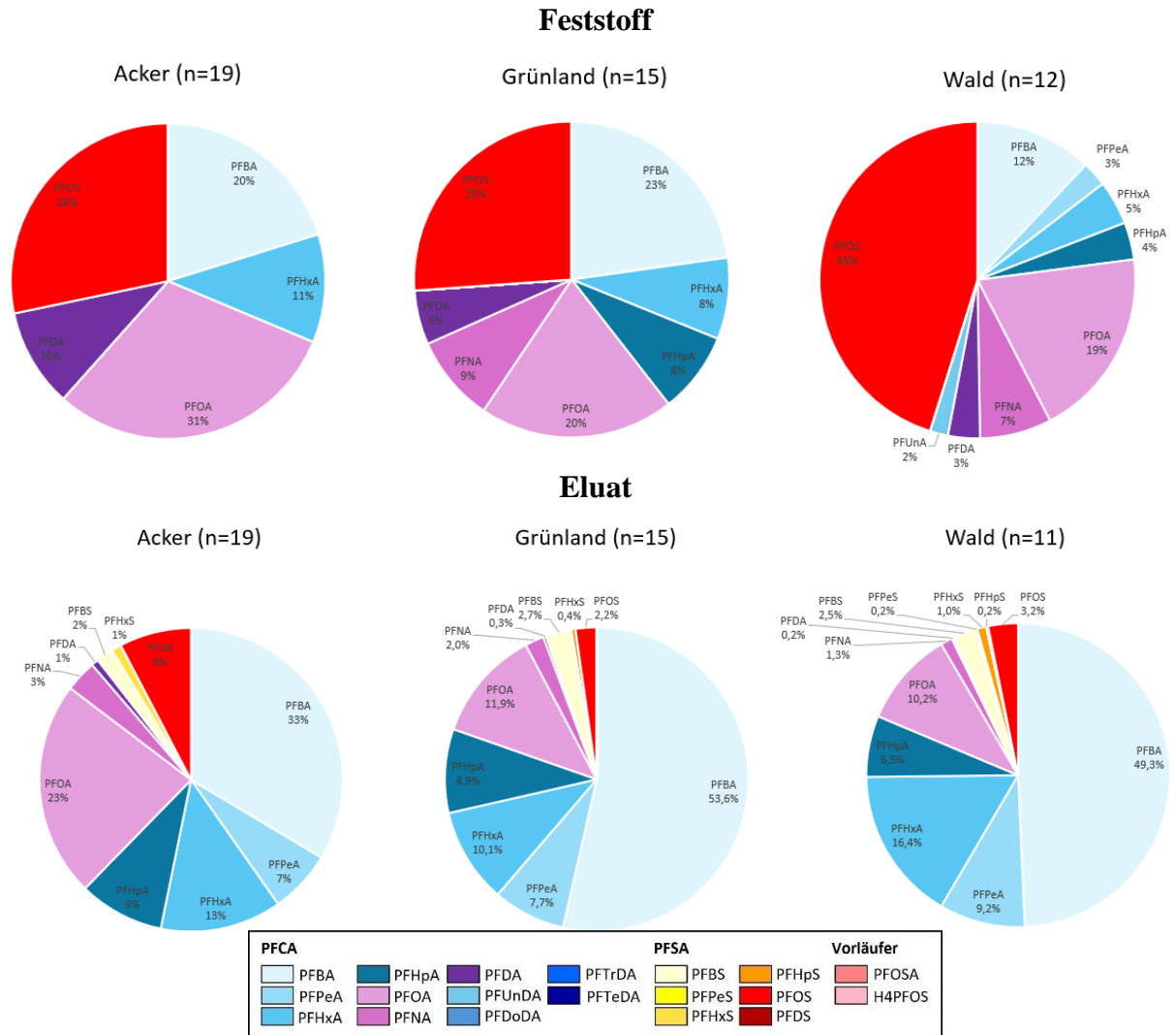


Abb. 4: Anteile der PFAS-Einzelstoffe an der PFAS-Summe für Feststoff und Eluat (Wasser/Feststoffverhältnis 2:1), differenziert nach der Nutzung (Oberböden, Median).

Vergleicht man das Stoffspektrum der in Feststoff und Eluat gemessenen PFAS-Einzelstoffe unterscheiden sich diese erwartungsgemäß deutlich (Abb. 4), da im Falle der Eluate nur die wasserlöslichen Anteile der PFAS gemessen werden. Generell besitzen kurzkettige PFAS eine höhere Wasserlöslichkeit die mit zunehmender Kettenlänge abnimmt, wobei Carbonsäuren im Vergleich zu Sulfonsäuren derselben Kettenlänge mobiler sind [6]. Während im Feststoff die Anteile von PFOS, PFOA und PFBA dominant waren und die Anteile weiterer messbarer Carbonsäuren (PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFNA, PFDA, PFUnA) deutlich weniger zur Summe beitrugen, war deshalb im Eluat in erster Linie das kurzkettige PFBA dominant, gefolgt von den weiteren Carbonsäuren bis PFOA, die in allen Proben nachgewiesen werden konnten. Die längerkettigen Carbonsäuren PFNA und PFDA sowie die Sulfonsäuren PFBS, PFHxS und auch das im Feststoff dominante PFOS waren zwar in vielen Proben messbar, aber in deutlich geringeren Konzentrationen, so dass ihr jeweiliger Anteil an der PFAS-Summe überwiegend kleiner als 5 % war.

4 Diskussion und Bewertung

Die Ergebnisse zeigen, dass unabhängig von der vorliegenden Nutzung PFAS an allen bisher untersuchten BDF-Standorten in Humusauflagen und Böden gefunden werden konnten. Dabei konnten sie – bedingt durch die im Vergleich zu bisherigen hessischen Messprogrammen [7] um einen Faktor 10 niedrigere Bestimmungsgrenze im Feststoff – nicht nur im Eluat, sondern auch im Feststoff an allen Standorten nachgewiesen werden. Das ubiquitäre Vorkommen dieser Schadstoffgruppe in den Böden, was bereits bei Untersuchungen in anderen Bundesländern festgestellt wurde [8, 9, 10], kann somit auch für Hessen nochmals bestätigt werden. Dabei deutet die gute Vergleichbarkeit der Stoffspektren darauf hin, dass an den meisten Standorten – mit Ausnahme der Auenstandorte, die zusätzlich während Überschwemmungsereignissen stofflich beaufschlagt werden – die diffuse, atmosphärische Deposition der Haupteintragspfad für PFAS in die Böden sein dürfte.

Tab. 1: PFAS-Prüfwerte der BBodSchV [11] für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser am Ort der Probennahme und im Sickerwasser am Ort der Beurteilung sowie Gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) [4]

Einzelstoff	Prüfwert [µg/L]	GOW [µg/L]
PFBA	10	
PFPeA		3
PFHxA	6	
PFHpA		0,3
PFOA	0,1	
PFNA	0,06	
PFDA		0,1
PFBS	6	
PFHxS	0,1	
PFHpS		0,3
PFOS	0,1	
PFOSA		0,1
H4PFOS (6:2 FTSA)		0,1

Für die Bewertung von PFAS-Feststoffgehalten gibt es bisher keinerlei Beurteilungsmaßstäbe. In der novellierten Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) [11] wurden aber für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser Prüfwerte für insgesamt sieben PFAS-Einzelstoffe im Eluat eingeführt (Tab. 1). Im Leitfaden zur PFAS-Bewertung [4] wird empfohlen, darüber hinaus für weitere Einzelstoffe die Gesundheitlichen Orientierungswerte (GOW) heranzuziehen. Diese Eluatwerte sollen nach Empfehlungen im Leitfaden hilfsweise und vorerst auch zur Beurteilung der Verwertbarkeit von Bodenmaterial angewendet werden.

In den bisherigen BDF-Untersuchungen wird der Prüfwert für PFOA von 0,1 µg/L an insgesamt 7 der 46 untersuchten BDF-Standorte im Oberboden und/oder in den darunter folgenden Proben überschritten. Es handelt sich dabei um zwei Wald-BDF, drei Grünland-BDF in der Fulda-, Main- und Rheinaue sowie zwei Acker-BDF, von denen auf einer als weitere potenzielle Eintragsquelle eine Klärschlammausbringung bekannt ist. Die höchste PFOA-Konzentration wurde dabei mit 0,86 µg/L in einer Tiefe von 20–30 cm an der im Überschwemmungsbereich des Rheins gelegenen BDF gemessen und überschreitet den Prüfwert um mehr als das Achtfache. Außerdem wird in den beiden Proben von 10–30 cm auch der Prüfwert für PFOS deutlich überschritten. Weitere Prüfwerte und auch GOW-Werte werden in den bisherigen Messungen nicht erreicht.

5 Ausblick

Auch wenn die bisherigen Auswertungen bereits einen guten Überblick über die ubiquitäre Hintergrundbelastung der hessischen Böden mit PFAS geben, ist zur Ableitung valider nutzungsdifferenzierter hessischer Hintergrundwerte nach den Vorgaben der LABO [12] die Untersuchung der bisher noch fehlenden BDF sowie einiger weiterer Grünland- und Wald-Standorte notwendig, um eine statistisch hinreichende Datengrundlage zu gewährleisten.

Zur Evaluierung der hessischen Messungen und Erweiterung der Datenbasis können zukünftig auch die Ergebnisse des vom Umweltbundesamt (UBA) durchgeführten Forschungsprojektes zur Ableitung bundesweiter PFAS-Hintergrundwerte in landwirtschaftlich genutzten Oberböden herangezogen werden. Im Rahmen dieses, auch vom HLNUG unterstützten Messprogrammes wurden insgesamt 27 Acker- und Grünlandstandorte in Hessen beprobt. Bei mehr als der Hälfte dieser Standorte handelte es sich um Flächen der Boden-Dauerbeobachtung, so dass in diesen Fällen die Ergebnisse verglichen werden können. Erste Auswertungen zum Projekt stellte das UBA auf der internationalen Tagung „PFAS in soil – forever pollution, forever concern?“ im Frühjahr dieses Jahres in Berlin vor [13].

Die Berechnung von PFAS-Hintergrundwerte insbesondere aus Feststoffanalysen ist eine wichtige Voraussetzung für die zukünftige Ableitung entsprechender Feststoff-Vorsorgewerte. Diese werden unter anderem für eine gesetzliche Regelung zur schadlosen Verwertung von Bodenmaterial dringend benötigt. Zur Ableitung weiterer bisher noch fehlender Prüfwerte im Wirkungspfad Boden-Mensch und im Wirkungspfad Boden-Pflanze wurde jeweils eine länderübergreifende Arbeitsgruppe unter Leitung des UBA eingerichtet.

Literaturverzeichnis

- [1] BARTH, N., BORHO, W., CORDSEN, E., HELLER, C., HÖPER, H., LUDWIG, B., MARX, M., MEESENBURG, H., SPÖRLEIN, P. & WELLER, M. (2022): Einrichtung, Betrieb und Auswertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen. – In: König, W. & Utermann, J. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. – 3. Band: 9060, 151 S.; Berlin (Erich Schmidt Verlag).

- [2] UBA – Umweltbundesamt (2025): Discussion paper “PFAS in soil – Time to act together”. An outcome of the international conference “PFAS in soil – forever pollution, forever concern?” held in Berlin, March 2025.
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2875/dokumente/pfasinsoil_conference_2025_discussionpaper_final.pdf; Stand: 22.09.2025]
- [3] LÜGGER, K. & HELLER, C. (2024): Boden als Zeitzeuge – die Bodenprobenbank des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). – Boden und Altlasten – Nachrichten aus Hessen – Ausgabe 2024: 14-19; Wiesbaden.
- [4] BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2022): Leitfaden zur PFAS-Bewertung – Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials. – 56 S.; Bonn.
- [5] FBU – Fachbeirat Bodenuntersuchungen (2024): Empfehlungen des FBU zum methodischen Vorgehen bei der Bestimmung von niedrigen PFAS-Gehalten in Böden.
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/359/dokumente/fbu_2024_bestimmung_pfas_im_boden_20240426.pdf; Stand: 22.09.2025].
- [6] REINHARDT, M. & HELD, T. (2018): PFC-Belastungen in Mittel- und Nordbaden. Modellstudie zur Untersuchung des Eintrags von PFC aus belasteten Böden in das Grundwasser – Schlussbericht.
[https://rpk.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/RP-Internet/Karlsruhe/Abteilung_5/Referat_52/Stabsstelle_PFC/_DocumentLibraries/Documents/0_pfc_forsch_modellstudie.pdf; Stand: 22.09.2025]
- [7] LÜGGER, K., DIEHL, N., KLEIN, B. & STEINICKE, C. (2024): Per- und Polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in hessischen Auenböden. – Boden und Altlasten – Nachrichten aus Hessen, Ausgabe 2024: 20–34.
[https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/altlasten/Boeden_Altlasten_Newsletter_2024_Web.pdf; Stand: 22.09.2025]
- [8] LUBW -Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.) (2021): Sachstandsbericht: PFAS – in Böden von Bodendauerbeobachtungsflächen. Ergebnisse aus drei Untersuchungsphasen. – Karlsruhe.
[https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10215-Ergebnisse_aus_drei_Untersuchungsphasen.pdf; Stand: 22.09.2025]
- [9] LLUR – Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (2022): Fachbericht zu den Bodenmaterialuntersuchungen auf Gehalte an per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Schleswig-Holstein 2020. – Flintbek. [https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/B/boden/Downloads/fachberichtPFAS.pdf?__blob=publicationFile&v=2; Stand: 22.09.2025]
- [10] LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2024): Hintergrundgehalte und -werte von PFAS in Böden ländlicher Gebiete in Nordrhein-Westfalen. – LANUV-Fachbericht 150, 66 S., Recklinghausen.
- [11] BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- [12] LABO – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2017): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. – 4. überarbeitete und ergänzte Auflage.
[https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Fassung_HGW_Bericht_02_2017.pdf; Stand: 22.09.2025]
- [13] GEHRENKEMPER, L., SCHMIDT, S. & ZAHL, R. (2025): PFAS content occurring in agricultural top soils representative for rural areas in Germany. – Vortrag auf der Tagung “PFAS in soil - forever pollution, forever concern?” des UBA am 25.–26. März 2025 in Berlin.
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2875/dokumente/pfas_gehrenkemper_mersmann.pdf; Stand: 22.09.2025]

LABO-Arbeitshilfe zur Bewertung von LCKW und BTEX im Grundwasser hinsichtlich einer möglichen Belastung der Innenraumluft geplanter Gebäude

Volker Zeisberger, HLNUG Dezernat „Boden und Altlasten“

Einführung

Bei der Altlastenbearbeitung kann folgende Situation auftreten: Durch eine Altlast werden leichtflüchtige Schadstoffe freigesetzt, die eine Grundwasserverunreinigung verursachen. Typische leichtflüchtige Schadstoffe sind die sogenannten BTEX-Aromaten wie Benzol, Toluol und Xylol sowie leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW). Das verunreinigte Grundwasser breitet sich aus und unterströmt ein Grundstück, das bebaut werden soll. Dann könnten leichtflüchtige Schadstoffe aus dem Grundwasser ausgasen und über die Bodenluft in die Innenraumluft der neu errichteten Gebäude gelangen. Bei geplanten Baumaßnahmen ist daher zu prüfen, ob gesunde Wohn- bzw. Arbeitsverhältnisse trotz der Grundwasserverunreinigung gewahrt werden können.

Zu dieser Thematik fehlen im deutschsprachigen Raum bisher konkrete Hilfestellungen. Daher wurde von der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) die Erstellung der Arbeitshilfe „Bewertung von leichtflüchtigen Schadstoffen im Grundwasser hinsichtlich einer möglichen Belastung der Innenraumluft von geplanten Gebäuden“ [1] veranlasst. Die fachlichen Rahmenbedingungen wurden vom Altlastenausschuss (ALA) der LABO festgelegt. Erstellt wird die Arbeitshilfe durch eine Arbeitsgruppe des ALA-Gesprächskreises „Schadstoffbewertung“ unter Obmannschaft des HLNUG.

In der Arbeitshilfe werden sogenannte „Hinweiswerte“ für die häufigen Schadstoffe BTEX und LCKW abgeleitet. Unterschreiten die im Grundwasser gemessenen BTEX-/LCKW-Konzentrationen diese Hinweiswerte, kann eine Beeinträchtigung der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Außerdem werden Hinweise gegeben, wie bei günstigen Randbedingungen (biologisch abbaubare Schadstoffe, großer Grundwasserflurabstand) vorgegangen werden kann.

Vorgehensweise bei ungünstigen Fallkonstellationen

Im ersten Teil der Arbeitshilfe wird das Vorgehen bei einem worst-case-Szenario beschrieben. Hierbei werden folgende Annahmen getroffen:

- Die leichtflüchtigen Schadstoffe BTEX/LCKW liegen im obersten Bereich des Grundwassers vor (nur dann können Schadstoffe aus dem Grundwasser in die Bodenluft ausgasen).
- Beim Übergang von BTEX/LCKW aus dem Grundwasser in die Bodenluft stellt sich ein Verteilungsgleichgewicht ein, das durch die Henry-Konstante (K_{Henry}) beschrieben wird. Ist die BTEX/LCKW-Konzentration im Grundwasser bekannt, errechnet sich mittels der Henry-Konstante die maximal mögliche Schadstoffkonzentration in der Bodenluft.
- Der Grundwasserflurabstand (Abstand zwischen der Bodenplatte des geplanten Gebäudes und der Grundwasseroberfläche) ist gering, so dass eine Konzentrationsminderung in der Bodenluft durch Verdünnungsprozesse vernachlässigbar ist.
- Beim Übergang von der Bodenluft in die Innenraumluft findet eine Konzentrationsminderung um den Faktor 1 000 statt. Dieser sogenannte Transferfaktor ist in bundesweiten Arbeitshilfen etabliert [2].

Bei der worst-case-Fallgestaltung reichern sich BTEX/LCKW unterhalb der Bodenplatte eines Gebäudes an (vgl. Abbildung 1 mittlerer Bereich). Dagegen ist im rechten Teil der Abbildung 1 erkennbar, dass in unversiegelten Bereichen keine Anreicherung von BTEX/LCKW stattfindet.

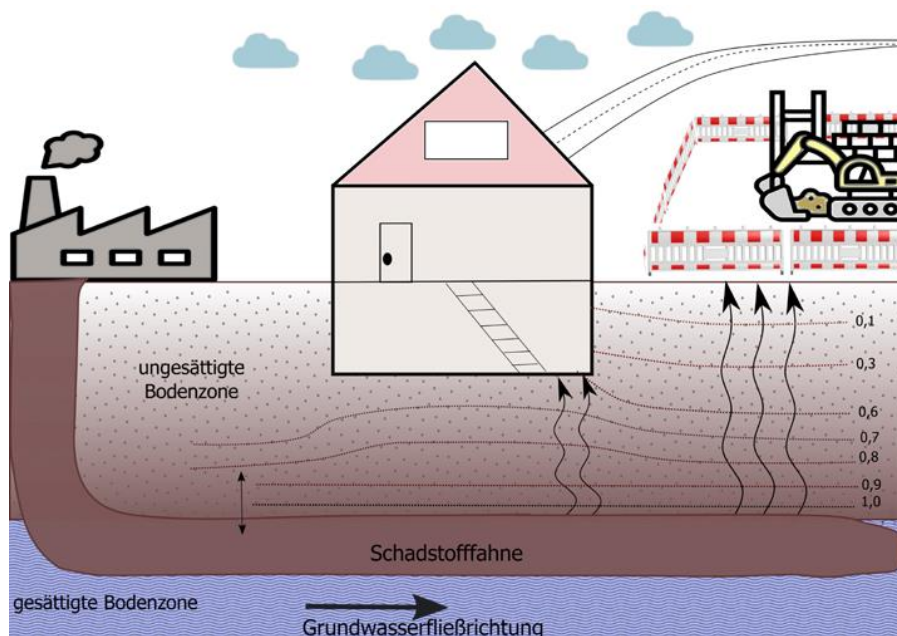


Abb. 1: Expositionsszenario Grundwasser-Bodenluft-Innenraumluft bei Schadstofffahnen im Grundwasser; Bildmitte: Anreicherung von Schadstoffen (BTEX/LCKW) unterhalb des Gebäudes ([1] verändert).

Für das worst-case-Szenario können tolerable Grundwasser-Konzentrationen für BTEX/LCKW aufgrund der nachfolgenden Überlegungen hergeleitet werden:

- Im ersten Schritt sind tolerable Innenraumluft-Konzentrationen zu ermitteln, wie sie beispielsweise vom Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) veröffentlicht wurden [3].
- Diese Werte werden mit dem Transferfaktor 1 000 (s. o.) multipliziert. Als Zwischenergebnis erhält man tolerable Bodenluft-Konzentrationen.
- Im letzten Schritt wird über das Verteilungsgleichgewicht zwischen Bodenluft und Grundwasser (unter Verwendung der jeweiligen Henry-Konstante) eine tolerable Grundwasser-Konzentration für einzelne BTEX/LCKW errechnet.

Die tolerablen Grundwasser-Konzentrationen werden in der Arbeitshilfe als „Hinweiswerte“ bezeichnet. Bei Unterschreitung dieser Werte (siehe Tabelle 1) kann eine Beeinträchtigung der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Tab. 1: Hinweiswerte für das Grundwasser [$\mu\text{g/L}$], bei deren Unterschreitung eine Beeinträchtigung der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann.

Leichtflüchtige Stoffe	Hinweiswerte für Grundwasser [$\mu\text{g/L}$]
BTEX	
Benzol	40
Toluol	2 000
Ethylbenzol	1 000
Xylole	900
Styrol	600
LCKW	
Dichlormethan	1 000
Trichlormethan	30
Tetrachlormethan	5
1,2-Dichlorethen	40
Chlorethen (Vinylchlorid)	3
cis-1,2-Dichlorethen	100
Trichlorethen	100
Tetrachlorethen	200

Für die Bauplanung ist von besonderer Bedeutung, dass auch bei vergleichsweise hohen Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser eine Bebauung möglich ist, sofern die o. g. Hinweiswerte unterschritten werden. Dies soll am Beispiel des Schadstoffs Benzol erläutert werden: Bereits bei einer Grundwasser-Konzentration von 1 $\mu\text{g/l}$ Benzol liegt aus wasserrechtlicher Sicht eine nachteilige Veränderung des Grundwassers bzw. ein Grundwasserschaden vor [4]. Solange jedoch die Benzol-Konzentration 40 $\mu\text{g/l}$ unterschreitet (Hinweiswert aus Tabelle 1), kann eine Beeinträchtigung der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Vorgehensweise bei günstigen Fallkonstellationen

Das oben beschriebene worst-case-Szenario kann zu einer deutlichen Überschätzung der Beeinträchtigung von gesundem Wohnen und Arbeiten führen. Daher wird im zweiten Teil der LABO-Arbeitshilfe das Vorgehen bei günstigen Fallkonstellationen beschrieben. Diese liegen insbesondere in folgenden Fällen vor:

- Die Schadstoffe sind in der ungesättigten Bodenzone gut abbaubar (z. B. BTEX) und/oder
- der Flurabstand des Grundwassers (Abstand Bodenplatte zur Grundwasseroberfläche) ist groß und/oder
- die versiegelte Gebäudefläche ist klein.

Die Einflussgrößen Abbaubarkeit, Flurabstand und Gebäudefläche wurden in Arbeitshilfen aus den USA [5] und aus Australien [6] statistisch ausgewertet, wobei Feldmessungen von Grundwasser-, Bodenluft- und Innenraumluftproben sowie numerische Modellierungen berücksichtigt wurden. Die umfangreiche Datenbasis ermöglicht eine Einschätzung, ob unter bestimmten Randbedingungen die gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse gewahrt werden können. In der LABO-Arbeitshilfe wird zwischen den beiden Schadstoffgruppen BTEX und LCKW unterschieden.

Am Beispiel einer Benzol-Grundwasserverunreinigung wird im Folgenden die Vorgehensweise skizziert. Bei den aerob abbaubaren BTEX-Schadstoffen wie Benzol ist entscheidend, ob ausreichend Luftsauerstoff im Bereich zwischen Kellersohle und Grundwasser vorhanden ist. Bei ausreichender Sauerstoffversorgung nehmen die Benzol-Konzentrationen (linkes Bild) von unten nach oben sehr rasch ab, da Sauerstoff (rechtes Bild) für den Schadstoffabbau ausreichend zur Verfügung steht.

- Die Benzol-Konzentration im Grundwasser beträgt im Beispielfall 200 µg/l, dargestellt durch den waagrechten blauen Pfeil
- Das Verhältnis ‚Gebäudebreite‘ zu ‚Abstand Bodenplatte zum Grundwasser‘ weist einen Wert von 9 auf (dies ist beispielsweise bei einer ‚Gebäudebreite‘ von 18 m und einem ‚Abstand Bodenplatte zum Grundwasser‘ von 2 m der Fall, da $18 \div 2 = 9$), dargestellt durch den senkrechten blauen Pfeil
- Die beiden Pfeile treffen sich im grünen Feld. Unter diesen Randbedingungen sind die gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse wahrscheinlich nicht beeinträchtigt.

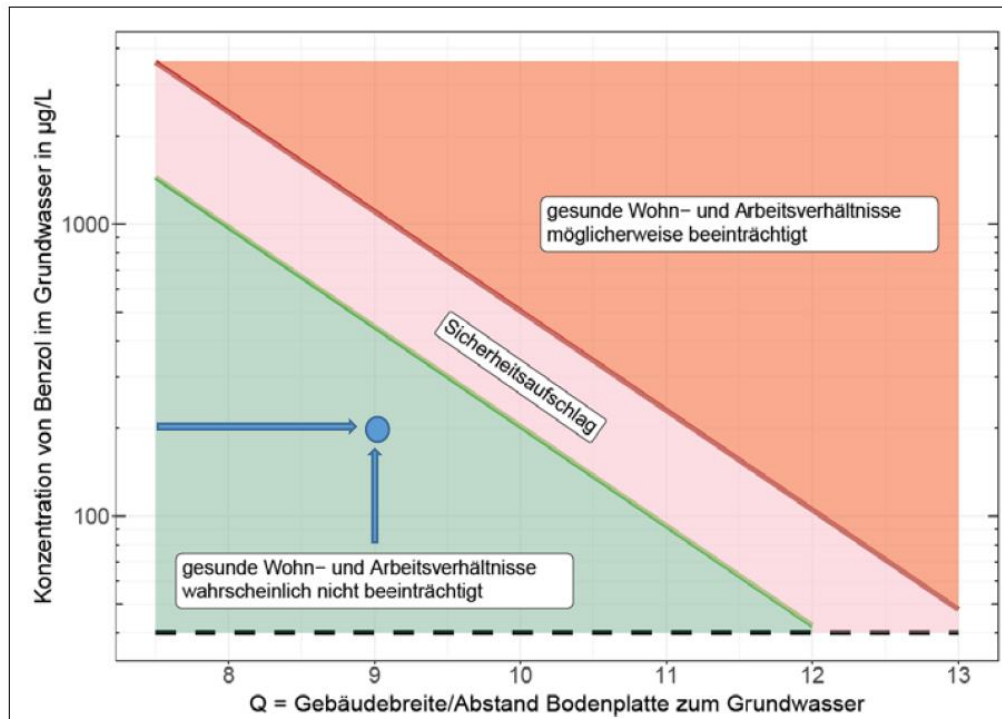


Abb. 2: Grafik hinsichtlich der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse betreffend das Expositionsszenario Grundwasser-Bodenluft-Innenraumluft. Das Beispiel gilt für eine Benzol-Konzentration von 200 µg/l und für ein Q von 9; in diesem Fall sind die gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse wahrscheinlich nicht beeinträchtigt. Die Grafik basiert auf [1] und [6].

Literatur

- [1] LABO (2024): Arbeitshilfe „Bewertung von leichtflüchtigen Schadstoffen im Grundwasser hinsichtlich einer möglichen Belastung der Innenraumluft von geplanten Gebäuden *Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) - Veröffentlichungen / Altlasten*
- [2] LABO (2008): Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug. Ständiger Ausschuss Altlasten der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, Stand: 01.09.2008 inkl. Ergänzung Juni 2009, https://www.labo-deutschland.de/documents/34_Infoblatt_Altlasten_01092008_e69_34f_2.pdf
- [3] UBA (2012): Richtwerte für die Innenraumluft: erste Fortschreibung des Basisschemas – Mitteilung der Ad-hoc Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumluftthygiene und der Obersten Landesbehörden. In: Bundesgesundheitsblatt Umweltbundesamt. 2012 · 55; Springer Verlag
- [4] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2016): Ableitung von Geringfügigkeits-schwellenwerten für das Grundwasser (Aktualisierte und überarbeitete Kurzfassung) https://www.lawa.de/documents/geringfuegigkeits_bericht_seite_001-028_1552302313.pdf
- [5] US-EPA (2015): Technical Guide For Addressing Petroleum Vapor Intrusion At Leaking Underground Storage Tank Sites. Abgerufen am 01.10.2024 von [Technical Guide for Addressing Petroleum Vapor Intrusion at Leaking Underground Storage Tank Sites | US EPA](https://www.epa.gov/petroleum-vapor-intrusion/technical-guide-for-addressing-petroleum-vapor-intrusion-at-leaking-underground-storage-tank-sites)
- [6] Australia CRC Care (2013): Petroleum hydrocarbon vapour intrusion assessment - australian guidance. Technical Report 23 <https://crccare.com/wp-content/uploads/2022/12/CRCCARETechreport23-PetroleumhydrocarbonvapourintrusionassessmentAustralianguidance2.pdf>
- [7] US-EPA (2012): EPA's Vapor Intrusion Database: Evaluation and Characterization of Attenuation Factors for Chlorinated Volatile Organic Compounds and Residential Buildings. Abgerufen am 01.10.2024 von <https://www.epa.gov/vaporintrusion/epas-vapor-intrusion-database-evaluation-and-characterization-attenuation-factors>

Handbuch Altlasten „Sickerwasserprognose“, 3. Auflage

Volker Zeisberger, HLNUG Dezernat „Boden und Altlasten“

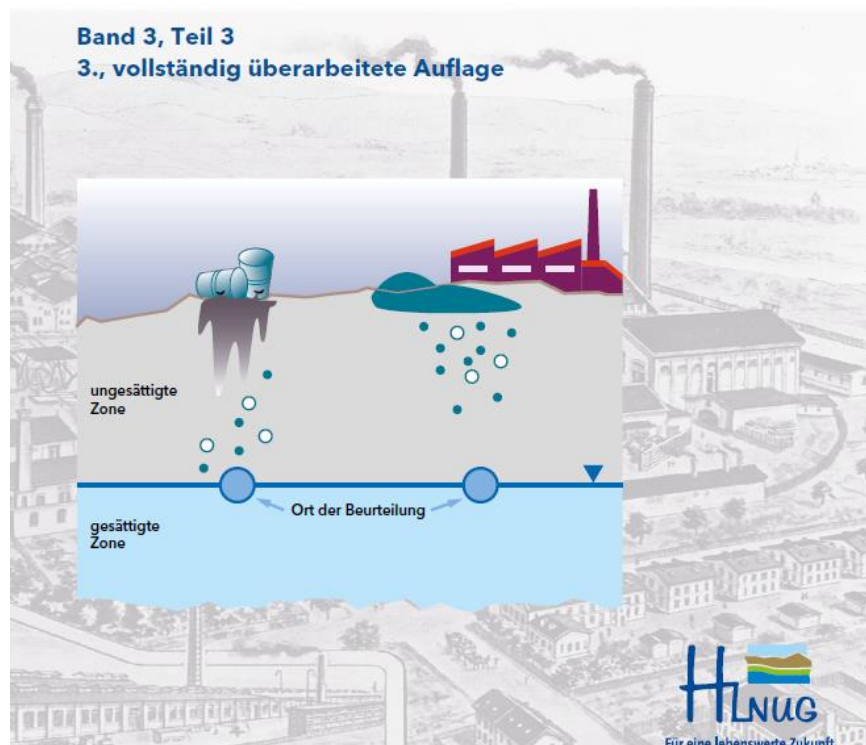
Mit der Novellierung der BBodSchV und Veröffentlichung der LABO-Arbeitshilfe „Sickerwasserprognose“ [1] wurde eine Überarbeitung des hessischen Handbuchs Altlasten „Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser – Sickerwasserprognose (2. Auflage 2002)“ als notwendig erachtet. Für die (in Kürze) vorliegende vollständig überarbeitete 3. Auflage des Handbuchs Altlasten [2] gilt: Vorrangig ist die bundesweit abgestimmte LABO-Arbeitshilfe anzuwenden. Das hessische Handbuch Altlasten, das sich seit mehr als 20 Jahren im Vollzug bewährt hat, soll daher in der aktuellen Fassung vor allem ergänzend, insbesondere für orientierende Untersuchungen (OU) nach § 12 Abs. 1 BBodSchV, angewendet werden.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie



Handbuch Altlasten

Sickerwasserprognose



Die vorliegende Neuauflage des Handbuchs Altlasten fasst die wesentlichen Inhalte der LABO-Arbeitshilfe kurz zusammen. Anschließend werden Bewertungsansätze, die sich im hessischen Vollzug bewährt haben und bereits in der 2. Auflage beschrieben sind, erläutert. Diese Bewertungsansätze sind:

- Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone bei OU (Szenarien)
- Abschätzung der Grundwassergefährdung aufgrund von Bodenuntersuchungen bei OU (Bewertungsmatrix)
- Berechnung des Verhältnisses „eluierbarer Anteil“ zum „Gesamtgehalt“.

Darüber hinaus enthält das Handbuch ein Berechnungsbeispiel für die Schadstofffracht und die Dauer des Schadstoffaustrags.

- [1] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Boden (LABO) (2024): Arbeitshilfe zur Sickerwasserprognose
https://www.labo-deutschland.de/documents/AH_Sickerwasserprognose_LABO.pdf
- [2] Handbuch Altlasten Band 3 Teil 7 (2025): “Sickerwasserprognose”; das Handbuch erscheint voraussichtlich im November 2025
<https://www.hlnug.de/themen/altlasten/arbeitshilfen/band-3-erkundung-von-altflaechen/teil-3>

Referenten HLNUG-Altlastenseminar 2025**Tag 1****Juliane Kieseewetter**

Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat
Referat III 6 – Vorsorgender Bodenschutz, Bodenschutzrecht und Altlasten
Mainzer Straße 80
65189 Wiesbaden

Tel.: 0611/8151372

E-Mail: juliane.kieseewetter@landwirtschaft.hessen.de

Volker Zeisberger

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dezernat G3 – Boden und Altlasten
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden

Tel.: 0611/6939748

E-Mail: volker.zeisberger@hlnug.hessen.de

Michael Sieber

HIM GmbH
Bereich Altlastensanierung
- HIM-ASG -
Waldstraße 11
64584 Biebesheim

Tel.: 06258/8951027

E-Mail: michael.sieber@him.de

Anja Wilken

Sensatec GmbH
Friedrichsorter Straße 32
24159 Kiel

Tel.: 0431/38900911

E-Mail: a.wilken@sensatec.de

Dr. Benjamin Faigle

Züblin Umwelttechnik GmbH
Maulbronner Weg 32
71706 Markgröningen

Tel.: 07145/9324251

E-Mail: benjamin.faigle@zueblin.de

Dr. Walter Lenz

HG Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH
 Europastraße 11,
 35394 Gießen

Tel.: 0641/9442214

E-Mail: walter.lenz@buero-hg.de

Joachim Feldges

HG Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH
 Europastraße 11,
 35394 Gießen

Tel.: 0641/9442231

E-Mail: joachim.feldges@buero-hg.de

Mareen Radies

Arcadis Germany GmbH
 Europaplatz 3
 64293 Darmstadt

Tel.: 06151/3880

E-Mail: mareen.radies@arcadis.com

*Tag 2***Sandra Philippov**

Regierungspräsidium Kassel
 Dezernat 31.1 Grundwasserschutz, Wasserversorgung, Altlasten, Bodenschutz
 Am Alten Stadtschloss 1
 34117 Kassel

Tel.: 0561/1064265

E-Mail: sandra.philippov@rpks.hessen.de

Fabian Achten

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
 Dezernat G3 – Boden und Altlasten
 Rheingaustraße 186
 65203 Wiesbaden

Tel.: 0611/6939744

E-Mail: fabian.achten@hlnug.hessen.de

Dr. Thorsten Spirgath

Spicon GmbH
Weinmeisterhornweg 48
13593 Berlin
Tel.: 030/67964816
E-Mail: thorsten@spirgath.de

Florian Schaller

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dezernat G3 – Boden und Altlasten
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden
Tel.: 0611/6939764
E-Mail: florian.schaller@hlnug.hessen.de

Matthias Adam

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dezernat G3 – Boden und Altlasten
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden
Tel.: 0611/6939710
E-Mail: matthias.adam@hlnug.hessen.de

Daniel Fröhlich

HIM GmbH
Bereich Altlastensanierung
- HIM-ASG -
Waldstraße 11
64584 Biebesheim
Tel.: 06258/895 3711
E-Mail: daniel.froehlich@him.de

Katrin Lügger

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dezernat G3 – Boden und Altlasten
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden
Tel.: 0611/6939717
E-Mail: katrin.luegger@hlnug.hessen.de

ⁱ Nanogramm I-TE (International Toxic Equivalents) pro Kilogramm = Maßeinheit, die die Gesamtgiftigkeit von Dioxinen und Furanen in einem Kilogramm Material angibt, berechnet nach international standardisierten Bewertungsfaktoren.