

5
2
0
2



Kongresshalle Leipziger Messe Fotograf Martin Jehnichen

ITVA ALTLASTENSYMPOSIUM

02.-04. April 2025

Kongresshalle am Zoo
Leipzig

STAATSMINISTERIUM
FÜR UMWELT UND
LANDWIRTSCHAFT



Freistaat
SACHSEN

ITVA



Vorwort

HERZLICH WILLKOMMEN

Sehr geehrte Damen und Herren,

herzlich willkommen zu unserem jährlichen Symposium, diesmal in der wunderschönen Stadt Leipzig in einem besonderen historischen Ambiente.

Ihr Interesse am ITVA-Symposium 2025 war riesig – wir sind bis auf den letzten der 520 Plätze ausgebucht. Das freut uns umso mehr, denn es zeigt uns, dass in Zeiten wie diesen ein persönlicher Austausch wieder mehr in den Fokus rückt. Vielleicht liegt es aber auch an der Themenauswahl. Wir beschäftigen uns mit aktuellen Herausforderungen und bieten Lösungsansätze an, diesmal mit vielen Beispielen aus der Praxis.

Mein persönlicher Dank geht an das kreative Programm-Komitee, das Ihre Wünsche und Anregungen aus den Fragebögen des Vorjahres umsetzt, aktuelle Themen zur Diskussion stellt und daraus ein Gesamtprogramm formt.

Ebenso danke ich den ReferentInnen, den ModeratorInnen und den TeilnehmerInnen der Diskussionsrunde für ihre wichtigen Beiträge zum Symposium. Das ist wirklich nicht selbstverständlich und noch dazu mit ordentlich Arbeit verbunden.

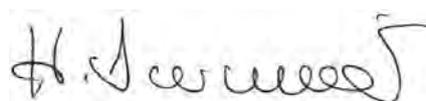
Diese ehrenamtliche Arbeit, der Beitrag der ausstellenden Firmen mit Messestand, Rollup oder Anzeige im Tagungsband tragen dazu bei, dass wir die Gebühren in diesem Jahr stabil halten konnten, trotz erheblicher Preissteigerungen drum rum.

Danken möchte ich außerdem dem Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft für die Kooperation und dem Unternehmen CDM Smith SE für die tatkräftige Unterstützung vor Ort.

Zu guter Letzt geht mein Dank an den gesamten ITVA-Vorstand, den Beirat, an die Fachausschüsse, Arbeitskreise, Regionalgruppen und an den JITVA, an unsere Geschäftsstelle in Berlin und das Orga-Büro in Hannover.

Ohne Sie alle wäre das ITVA-Symposium nicht das, was es ist.

Ihr



Prof. Dipl.-Ing. Harald Burmeier
Erster Vorsitzender des ITVA e.V.



Veranstaltet von
Ingenieurtechnischer Verband für
Altlastenmanagement
und Flächenrecycling e.V. (ITVA)

Askanischer Platz 4
10963 Berlin
Tel.: +49 (0)30 48 63 82 80
Fax: +49 (0)30 48 63 82 82
E-Mail: info@itv-altlasten.de
www.itv-altlasten.de

In Kooperation mit

**STAATSMINISTERIUM
FÜR UMWELT UND
LANDWIRTSCHAFT**



**Freistaat
SACHSEN**



ITVA - Altlastensymposium 2025
02. - 04.04.2025 Leipzig
mit Unterstützung SMUL Freistaat Sachsen

STAATSMINISTERIUM
FÜR UMWELT UND
LANDWIRTSCHAFT



Mittwoch, 02. April 2025

19.30 Uhr Get-together mit Imbiss und Fachausstellung im Foyer Kongresshalle am Zoo Leipzig

Donnerstag, 03. April 2025

8.00 Uhr Registrierung, Begrüßungskaffee

9.00 Uhr Eröffnung

Prof. Dipl.-Ing. Harald Burmeier, Erster Vorsitzender des Ingenieurtechnischen Verbandes für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Berlin

9.05 Uhr Begrüßung

Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft

9.15 Uhr Eröffnungsvortrag

Dr. Christoph Schulte, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Rechts- und Vollzugsfragen

Moderation: Dr. Thomas Gerhold, avocado rechtsanwälte, Köln

9.45 Uhr Fragen und Antworten zur Ersatzbaustoffverordnung (EBV)

Manuela Rieneck

Niedersächsisches Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover

10.10 Uhr Verfassungsrechtliche Grenzen der Haftung des Grundstückseigentümers

Dr. Matthias Peine, avocado rechtsanwälte, Berlin

10.35 Uhr Grundzüge der Kostenverteilung bei der Kampfmittelräumung unter besonderer Beachtung des proaktiv tätigen Grundstückseigentümers

Dr. Felix Holländer, Franßen & Nusser Rechtsanwälte PartGmbH, Berlin

11.00 Uhr Kaffeepause, Fachausstellung

Erkundungspraxis

Moderation: Dr. Karsten Menschner, CDM Smith SE, Leipzig

11.25 Uhr Massenspektrometrie basierte hochauflösende vor-Ort-MIP-Charakterisierungstechnologie mit kontinuierlicher Echtzeitüberwachung einzelner Schadstoffarten – Erfahrungen nach einem Jahr Anwendung von Fugro MIP-OMS

Dr. Eugen Martac, Fugro Germany Land GmbH, Berlin

11.50 Uhr Bewertung des biologischen Schadstoffabbaus und seiner Stimulierbarkeit an einem großflächig kontaminierten Standort anhand der Kombination innovativer Überwachungsmethoden

Dr. Annika Beckmann, HPC AG, Merseburg

12.15 Uhr Kampfmittelräumung Dethlinger Teich - Vorbereitungen und Stand der Arbeiten

Charlotte Goletz, Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover

Christian Poggendorf, BIG Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover

12.40 Uhr Mittagspause, Fachausstellung

Sanierungspraxis

Moderation: Jörg Frauenstein, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

- 14.10 Uhr Optimierung einer langlaufenden Pump-and-Treat Maßnahme im Lausitzer Revier, Industriepark Schwarze Pumpe**
Karsten Handro, Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV), Senftenberg
- 14.35 Uhr In-situ Sanierung von komplexen Cyaniden**
Praxiserfahrungen eines innovativen Verfahrens am Standort eines ehemaligen Gaswerkes
Aglaia Nagel, Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover
Anja Wilken, Sensatec GmbH, Kiel
- 15.00 Uhr Hessens größte ungesicherte Altablagerung: Nachhaltiges Sicherungskonzept (Altdeponie Eisert)**
Dr. Ulrich Langer, HIM GmbH, - HIM-ASG -, Biebesheim
- 15.25 Uhr Kaffeepause, Fachaustellung**

Aktuelle Akkreditierungspraxis - ein Erfahrungsaustausch

Moderation: Karsten Helms, Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover

- 15.45 Uhr Impulsvorträge und Diskussion**
Expertinnen und Experten diskutieren über ihre Erfahrungen mit der Akkreditierungspraxis
Dr. Heike Manke und Dr. Sebastian Kitzig, DAkKS Berlin; Dipl.-Geol. Karsten Heine, NLBL Hannover; Dr. Charlotte Boltz, HPC AG Harburg/Schwaben; Dr. Felix Geldsetzer, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) Augsburg;
Dipl.-Geol. Klaus Bücherl, V18 e.V. Regensburg
- 16.45 Uhr Ende der Vorträge**
- 17.00 Uhr Stadtführung (bis ca. 19 Uhr)**
- 17.30 Uhr Junger ITVA - Treffen der JITVA-Mitglieder (Bach-Saal)**
- 19.30 Uhr Abendveranstaltung im Großen Saal mit Buffet (Richard-Wagner-Saal)**

Freitag, 04. April 2025

Vorsorgender Bodenschutz / Naturschutz

Moderation: Dr. Susanne Döhler, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft u. Geologie, Dresden

- 09.00 Uhr Bodenkundliche Baubegleitung – Fluch und Segen**
Dr. Ulrike Meyer, UMWELTKONZEPT DR. MEYER, Berlin
- 09.20 Uhr Ausbau der Höchstspannungsnetze - Bodenkundliche Baubegleitung im Rahmen der Energiewende**
Dr. Benjamin Schieber, TABERG Ingenieure GmbH, Trier

Nachhaltigkeit in der Sanierung

Moderation: Dr. Uwe Boester, ahu GmbH, Aachen

- 09.40 Uhr Building Information Modeling (BIM) bei Rückbau und Sanierung, Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit von Bauprojekten durch Laser-Scanning und Photogrammetrie**
Ilja Prinz, CDM Smith SE, Mannheim
- 10.00 Uhr Altlastensanierung und Energiewende – In-situ Enteisung/Entmanganung (ISEE) ermöglicht energetische Nutzung von gereinigtem Grundwasser zur Gebäude- und Prozessklimatisierung auf einem ehemaligen Raffineriestandort**
Clarissa Kellner, Züblin Umwelttechnik GmbH, Nürnberg



ITVA - Altlastensymposium 2025
02. - 04.04.2025 Leipzig
mit Unterstützung SMUL Freistaat Sachsen

STAATSMINISTERIUM
FÜR UMWELT UND
LANDWIRTSCHAFT



Forschung und Entwicklung

Moderation: Anke Wiener, Züblin Umwelttechnik GmbH, Markgröningen

10.20 Uhr Modellversuch zur Nutzung kontaminierter Aquifere für eine Wärmebewirtschaftung mit ATES Aquifer Thermal Energy Storage-Anlagen (KONATES) – mikrobiologische und isotochenchemische Untersuchungen

Dr. Carsten Vogt, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig

10.40 Uhr Entwicklung der komponentenspezifischen Isotopenanalyse von PFAS für deren Quellenidentifizierung und Abbaubewertung

Dr. Kevin Kuntze, Isodetect GmbH, Leipzig,

11.00 Uhr Kaffeepause, Fachausstellung

Neues zu PFAS

Moderation: Dr. Annegret Biegel-Engler, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

11.25 Uhr Elimination von PFAS durch ein On-Site-Bodenwaschverfahren

Harald Oeder, GEOlogik Wilbers & Oeder GmbH, Münster

11.45 Uhr Identifizierung & Differenzierung von PFAS-Quellen im Grundwasser mittels Multi-Vektor-Analyse auf Basis künstlicher Intelligenz (MVA-AI)

Dr. Frank Karg, HPC INTERNATIONAL, Duisburg

12.05 Uhr Neue Technologien zur Entfernung von PFAS aus Wasser – aber bitte nachhaltig!

Dr. Katrin Mackenzie, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig

12.35 Uhr Schlusswort

Prof. Dipl.-Ing. Harald Burmeier, Erster Vorsitzender des Ingenieurtechnischen Verbandes für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Berlin

12.40 Uhr Lunch im Foyer

13.40 Uhr ITVA-Mitgliederversammlung (nur für Mitglieder)

Programmänderungen vorbehalten

Abstracts

03. April 2025

Eröffnungsvortrag

Dr. Christoph Schulte, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Rechts- und Vollzugsfragen

Moderation: Dr. Thomas Gerhold, avocado rechtsanwälte, Köln

1.

Fragen und Antworten zur Ersatzbaustoffverordnung (EBV)

Manuela Rieneck

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover

2.

Verfassungsrechtliche Grenzen der Haftung des Grundstückseigentümers

Dr. Matthias Peine, avocado rechtsanwälte, Berlin

3.

Grundzüge der Kostenlastverteilung bei Kampfmittelaltlasten unter besonderer Würdigung des proaktiv tätigen Grundstückseigentümers

Dr. Felix Holländer, Franßen & Nusser Rechtsanwälte PartGmbH, Berlin

Altlasten und Bodenschutz

Christoph Schulte und Jörg Frauenstein

1 Altlastensanierung im Wandel

Mit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert wurden Umweltbelastungen durch Abgase, Abwasser und Abfälle aus verschiedenen industriellen und gewerblichen Branchen in den Boden eingetragen. Prägend für Deutschland waren Montanindustrie, Chemische Industrie und die Metallver- und -bearbeitende Industrie. Damit verbunden war der Einsatz von Grundstoffen und neuartigen organischer Verbindungen, die in ihren Wirkungen auf den Menschen und die Umwelt noch weitgehend unverstanden und unerforscht waren.

Der damalige Stand der Technik und unzureichende technische Anforderungen an Industrieanlagen sowie deren an die Abluft- und Abwasserreinigung führten dazu, dass Chemikalien in die Umwelt gelangten und sich auf und in Böden ablagerten. Handhabungsverluste, ungesicherte Halden, Leckagen an Tanks und Rohrleitungen, Lagern sowie Unfälle bei Lagerung und Transport trugen erhebliche Schadstoffmengen in die Umwelt ein.

Die Verschmutzungen der Umweltmedien erreichte ganz unterschiedliche räumliche Ausmaße von wenigen Quadratmeter wie z.B. bei Chemischen Reinigungen oder Tankstellen bis hin zu Standorten mit mehreren tausend Quadratmetern. Selbst kompetente Behörden der Umweltverwaltung und des Vollzuges waren vielfach, auch wegen fehlender Regelungen und materieller Anforderungen, nicht in der Lage diesen Trend zu stoppen und die aufgegebenen Altstandorte und -ablagerungen wurden zu Altlasten.

Aus dem altlastenbezogenen Handlungsdruck legte die Bundesregierung 1985 eine Bodenschutzkonzeption vor, die 1999 mit dem Inkrafttreten von Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) in eine bundeseinheitliche Gesetzgebung mündete und vorrangig auf den nachsorgenden Bodenschutz gerichtet war.

2 Bodenschutzrecht national

Die Zweckbestimmung für den Bodenschutz, die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen ergibt sich aus § 1 BBodSchG. Schädliche Bodenveränderungen sind abzuwehren und der Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen so zu sanieren, dass die Gefahrenschwelle dauerhaft unterschritten wird. Während die Vorsorge auf einen langfristigen Schutz und Erhalt der Bodenfunktionen abzielt, geht es bei der Nachsorge im Wesentlichen darum, in einem räumlichen, zeitlichen und kausal überschaubaren Zusammenhang konkret erkennbare Gefahren abzuwehren. Dieser Ansatz erfordert ökologische Konzessionen an den wiederherstellbaren Bodenzustand. Ein nachhaltiger Schutz des „guten“ Bodenzustands ist nur mit Mitteln des vorsorgenden Bodenschutzes zu erreichen. Dazu sind die medialen Anforderungen des Bodenschutzes in die betroffenen Rechtsbereiche (insbesondere die Bauleitplanung, die Land- und Forstwirtschaft und den Naturschutz) auf Vorsorgeniveau zu integrieren.

Im nationalen Bodenschutzrecht werden die materiellen Maßstäbe der Gefahrenbewertung durch Prüfwerte und Maßnahmenwerte konkretisiert. Die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) enthält dafür nutzungsbezogene Prüfwerte für Schadstoffe

zur Beurteilung der Wirkungspfade Boden – Mensch, Boden – Grundwasser und Boden – Pflanze sowie Maßnahmenwerte für Schadstoffe zur Beurteilung der Wirkungspfade Boden – Mensch und Boden – Pflanze. Die zur Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte herangezogenen Methoden und Maßstäbe sind öffentlich zugänglich und gelten als methodische Grundlage für die Ableitung auch neuer Werte.

Die Altlastenbearbeitung in Deutschland basiert auf einem Stufenkonzept, das sich bereits vor Inkrafttreten der BBodSchG in einzelnen Bundesländern als zweckmäßig herauskristallisiert hatte und dessen stete Weiterentwicklung sich im Vollzug als robust erwiesen und bewährt hat. Auf Grundlage vorhandener Informationen und gezielter Untersuchungsmaßnahmen wird der Altlastenverdacht hinsichtlich Existenz, Ausmaß und Verortung, Konzentration und Gehalte und des Verhaltens von gefährlichen Stoffen sowie deren Wirkungen auf relevante Transferpfade und Schutzgüter und Rezeptoren sukzessive verifiziert. Erst mit der abschließenden Gefährdungsabschätzung erfolgt in der Regel die behördliche Feststellung einer Altlast, die grundsätzlich ein Sanierungserfordernis begründet.

Die Auswahl von Sanierungsmaßnahmen erfolgt (nach-)nutzungsbezogen und unter strikter Beachtung des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes. Sind möglichen Sanierungsmaßnahmen (Dekontamination und Sicherung) als nicht verhältnismäßig einzuschätzen, können auch der überwachte natürliche Schadstoffabbau, sowie Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen zur Anwendung gelangen.

In Abhängigkeit geeigneter Maßnahmen oder -kombinationen kann der finanzielle und zeitliche Aufwand bis zum Erreichen der festgelegten Sanierungsziele (und für eine ggf. erforderliche Nachsorge) erheblich variieren und bedürfen regelmäßig einer Einzelfallbetrachtung.

Die Pflicht zur Gefahrenabwehr gem. § 4 Absatz 3 BBodSchG basiert auf dem Verursacherprinzip. Das Tragen der Sanierungskosten, wofür grundsätzlich Handlungs- und Zustandsstörer in Betracht kommen können, ist eine zentrale Frage und somit häufig auch ein entscheidendes Hemmnis bei der Umsetzung notwendiger Maßnahmen, da nicht immer ein Sanierungspflichtiger ermittelt und zur Kostenübernahme herangezogen werden können.

Mit dem Inkrafttreten der Mantelverordnung 2023, die mit der neuen Ersatzbaustoffverordnung (EBV) und einer Novellierung der BBodSchV lange überfällige Regelungsinhalte implementiert. Der Artikel 6 BBodSchV soll die Schnittstelle von Bodenschutz zu Abfallrecht den Erhalt hoher Verwertungsquoten in den Recyclingströmen, einen natürlichen Ressourcenschutz und den Umgang mit Materialien in und auf Böden sicherstellen und gleichzeitig einer Schadstoffanreicherung in Boden und Grundwasser entgegenwirken.

Erstmals wird mit der Novellierung der physikalische Bodenschutz verankert und regelt die zu beachtenden Vorsorgeanforderungen zur Vermeidung und Verminderung von physikalischen Einwirkungen auf Böden. So wird die ursprüngliche Regelung zur Gefahrenabwehr bei Bodenerosion durch Wasser aufgegriffen und erweitert diese um die Gefahrenabwehr bei Winderosionen. Die BBodSchV enthält zudem rechtsverbindliche Vorgaben zur Durchführung einer bodenkundlichen Baubegleitung bei größeren Bauvorhaben.

3 Stand der Altlastenbearbeitung

In Deutschland zählen die Kataster in den Bundesländern 356.793 altlastverdächtige Flächen und 18.975 Altlasten. 160.072 Mal konnte der Altlastenverdacht ausgeräumt werden und 37.383 Altlasten wurden saniert. Gleichwohl verlangt die verbliebene Anzahl der Flächen und Standorte mit einem Kontaminationsverdacht oder schädlichen Bodenveränderungen weiterhin erhebliche Anstrengungen und finanzielle Ressourcen.

Mit der rechtlichen Verankerung der Altlastensanierung hat sich in Deutschland ein leistungsfähiger Dienstleistungsmarkt für die Altlastenbearbeitung, Bodensanierung und -infrastruktur mit einer Kapazität stationärer Bodenbehandlungsanlagen von 7.479.700 t/a über

eine leistungsfähige Sanierungsinfrastruktur entwickelt. Bei einer im Vergleich zur letzten Erhebung festzustellenden Zunahme der genehmigten Anlagenkapazität um ca. 31% reduzierte sich gleichzeitig der jährliche Massendurchsatz gegenüber 2016 um ca. 17,4 %, hochgerechnet 2.709.200 Mio. t/a. Für die thermische Bodenbehandlung dürfte nach unserer Auffassung und in Anbetracht der gegenwärtigen Anlagenverfügbarkeit künftig ein Kapazitätsengpass bevorstehen. Deutlich sichtbar wird eine zunehmende Zentralisierung, so betreiben etwa 5 Anlagenbetreibende mehr als 3 Anlagen und kleinere Betreibende stellen den Betrieb ihrer Anlage ein. Daneben werden projektbezogen mobile und semimobile Anlagen errichtet und betrieben, meist in Konfiguration und Regie von erfahrenen Ingenieurbüros.

Zudem haben sich Interessens- und Fachverbände etabliert, die Sanierungs- Know How bereitstellen sowie beratend und gutachterlich tätig werden. Durch ein Netz kompetenter Sachverständiger, Ingenieurdienstleister und eine entsprechende Sanierungsinfrastruktur ist das „Altlastenproblem“ fachlich weitgehend beherrschbar.

4 Green Deal und EU-Bodenstrategie 2030

Mit dem europäischen Green Deal hat die Europäische Union eine Wachstumsstrategie entwickelt, die Emissionen senken und gleichzeitig Arbeitsplätze schaffen soll. Es wurde vorgeschlagen, einen grünen und inklusiven Übergang für Europa zu entwickeln, der das Wohlergehen der Menschen verbessern und für künftige Generationen einen gesunden Planeten zu sichern soll, so die Präsentation von Ursula von der Leyen, Präsidentin der Europäischen Kommission und Frans Timmermans, Exekutiv-Vizepräsident der Europäischen Kommission bei der Vorstellung im Jahr 2019.

Die Schaffung eines klimaneutralen Europas und der Schutz unseres natürlichen Lebensraums soll sich positiv auf die Menschen, den Planeten und die Wirtschaft auswirken. Die EU soll bis 2050 die Klimaneutralität erreicht haben durch die Eindämmung der Umweltverschmutzung das menschliche Leben und die Tier- und Pflanzenwelt schützen Unternehmen dabei unterstützen, im Bereich saubere Produkte und Technologien weltweit führend zu werden einen gerechten und inklusiven Übergang gewährleisten.

Die 2021 von der Europäischen Kommission verabschiedete EU-Bodenstrategie für 2030 formuliert die Vision, bis 2050 alle Böden in der EU in einen gesunden Zustand zu versetzen. Das schließt die terrestrischen Ökosysteme ein und zielt im Kontext der Klimaanpassung darauf ab, Böden und deren Ökosysteme widerstandsfähiger und resilienter zu machen und den Verbrauch natürlicher Ressourcen spürbar einzuschränken und die Kreislaufwirtschaft zu stärken. Der gesunde Bodenzustand umfasst den chemischen, biologischen und physikalischen Zustand und einen möglichst dauerhaften Erhalt der Bodenfunktionen mit seinen Ökosystemleistungen.

Die Ziele der EU-Bodenstrategie werden in dem Entwurf zum ‚Soil Monitoring and Resilience Law‘ (Richtlinie zur Bodenüberwachung und – resilienz) aufgegriffen, die im Juli 2023 von der Europäischen Kommission vorgelegt wurde. Darin werden der Aufbau eines kohärenten Bodenmonitorings in Europa als wissenschaftliche Datenquelle, Maßnahmen zur kontinuierlichen Verbesserung der Bodengesundheit hin zu gesunden Böden bis 2050 und die Verringerung durch Sanierung von Kontaminationen in Böden schwerpunktmäßig adressiert. Der Austausch zum Vorschlag der Kommission zur Europäischen Bodenrichtlinie ist weit fortgeschritten und befindet sich derzeit im Trilog-Verfahren zwischen Europäischen Parlament, dem Rat und der Kommission.

Das Ziel der Bodenstrategie, bis 2050 einen Netto-Null-Flächenverbrauch zu erreichen, wird ebenso adressiert und soll vornehmlich über eine wirksame Reduzierung einer Bodenversiegelung oder deren -entsiegelung erreicht werden. Das Tempo der Umsetzung der Ziele der Europäischen Bodenrichtlinie wird von den Anstrengungen der Mitgliedstaaten

abhängig sein, nachhaltige Bodennutzung zu implementieren und die Verfügbarkeit von gesunden und fruchtbaren Böden für kommende Generationen zu gewährleisten.

5 Quo Vadis Bodenschutz - Zukunftsfelder:

Die 20. Legislaturperiode hatte den Bodenschutz wieder sichtbarer in Szene setzen wollen, die Vorsorge stärken, die Verschlechterung des Bodenzustandes in seiner Funktion als Schadstoffsenke insbesondere für „neue“ Schadstoffe umkehren, die Ökosystemleistung der Böden bewahren und Bodenschutz mit Klimaschutz und -anpassung verknüpfen. Mit der Errichtung des nationalen Bodenmonitoringzentrums am Umweltbundesamt sind Schnittstellen zur Umweltprobenbank und Spurenstoffzentrum gegeben. Damit kann es gelingen, die Folgen und Effekte von Klimafolgen und -anpassung für die Böden im Blick zu halten, flächenhafte und diffuse Bodenbelastungen zu ermitteln und zu überwachen und Anforderungen einer europäischen Bodenschutzregelungen und den damit verknüpften Berichtspflichten in Europa besser nachkommen zu können.

Bodenmonitoring wird für die Mehrzahl von stofflichen wie nichtstofflichen Belastungen der Böden eine Frühwarnfunktion wahrnehmen können und liefert zudem Erkenntnisse zur räumlichen und stofflichen Betroffenheit und der Vulnerabilität.

Die Gründung und Aufbau des nationalen Bodenmonitoringzentrums ist ein wichtiger Schritt zu einer verstärkten Vernetzung der Akteure und ihrer Aktivitäten zur Erhebung des Bodenzustands. Damit soll die Aussagekraft zum Bodenzustand und zu seinen Veränderungen auf Bundesebene vorangebracht werden und auf eine wissenschaftliche Datenbasis gestellt werden. Das Bodenmonitoringzentrum hat im Dezember 2024 offiziell seine Arbeit aufgenommen und wird Fortschritte bei der Überwachung und Bewertung von nichtstofflichen Bodenbedrohungen und eher flächenhaften Kontaminationen ermöglichen.

In der 20. Legislaturperiode wurde auch offenbar, dass zwischen einem ganzheitlichen Bodenschutz und den komplexen Nutzungserwartungen an Böden und Flächen Konkurrenz existieren, die gegeneinander abzuwägen sind. So kann beispielsweise der Flächenbedarf zur Bereitstellung ausreichender Kapazitäten erneuerbarer Energien ohne konkrete Planung mit der Erreichung der Ziele zur Eindämmung des Flächenverbrauchs kollidieren.

Insofern wurde bereits eine Weiterentwicklung und Fortschreibung des nationalen Bodenschutzrechts diskutiert und inhaltlich strukturiert, um Klimaschutz und Klimaanpassung, den Erhalt von Biodiversität und die Sicherung der Ernährungssicherheit wirksam zu etablieren. Diese komplexen Herausforderungen an den Schutz des Bodens sind nur auf Vorsorgenniveau zu erreichen. Mit der 2022 verabschiedeten Nationalen Moorschutzstrategie, der jüngsten Novellierung der Bodenschutzverordnung (BBodSchV), der nationalen Wasserstrategie, des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz sind bereits erste Meilensteine umgesetzt oder vorangetrieben.

Innovation und Fortschritt in der chemischen Industrie führen zur Entwicklung neuer organischer Stoffe und Stoffgruppen mit umweltgefährdenden Eigenschaften. Persistente Chemikalien, wie die PFAS, Mikroplastik, Pflanzenschutzmittel und Antibiotika können mit den bestehenden methodischen Grundlagen des stofflichen Bodenschutzes nicht mehr zielführend und vollzugstauglich geregelt werden. Mit der Kreislaufwirtschaft werden nicht oder nur schwer abbaubare Stoffe mit jedem Durchlauf akkumuliert. Ohne eine aktive Reduzierung dieser Stofffraktionen läuft das System wegen der Erhöhung der Schadstoffgehalte Gefahr zu kollabieren. Denn mit zunehmendem Erkenntnisfortschritt wird eine periodische Überprüfung und Fortschreibung der Wertesetzung erforderlich.

Um eine ökonomisch und ökologisch akzeptable Lösung des Altlastenproblems voranzubringen, braucht es insbesondere:

- eine nachnutzungsorientierte Sanierung von großräumigen und komplexen Schadensfällen, industriellen (Mega-)Standorten und prioritären Schadstoffquellen. Die Sanierung mit konventionellen Ansätzen und klassischen Sanierungsmaßnahmen gerät zunehmend an ihre Grenzen oder ist mit verhältnismäßigen Mitteln in überschaubaren Zeiträumen praktisch kaum zu bewältigen.
- die Sanierung von komplexen Grundwasserschäden in innerstädtischen Bereichen, insbesondere durch die Ableitung geeigneter Sanierungsziele und optimaler Konfigurationen von Schadstoffquellen- und Fahnen-sanierungsmaßnahmen.
- die Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung sowohl in der Überwachung und beim Monitoring als auch mit einer Initiierung von Abbauprozessen.
- die Weiterentwicklung innovativer, maßgeschneiderter und nachhaltiger Sanierungsansätze hin zu dauerhaften Sanierungserfolgen insbesondere auch für Emerging Pollutants und flächenhafte oder diffuse Kontaminationen.
- Eine Weiterentwicklung des Standes der Technik für Sanierungsverfahren und -konzepte, die auch auf eine Massenreduzierung der zu behandelnden Fraktionen hinauslaufen kann.
- Schnittstellenadäquate Bewertungs- und Maßnahmenkaskaden beispielsweise im Regelungsbereich der Industrieemissionsrichtlinie (IED) und beim Ein- und Aufbringen von Materialien in und aus Böden.
- die verstärkte Nutzung des Informations- und Datentransfers bezüglich der Industrieanlagen- und Gebäudeausgestaltung, verwendeter, lokalisierbarer und recyclingfähiger Stoffe und technologisch bedingter Kontaminationsquellen (BIM).
- die Ausschöpfung der gesetzlichen Möglichkeiten für das Management bei komplexeren Bodenbelastungsgebieten und angepasste Lösung bei großflächigen Kontaminationen mit persistenten Schadstoffen.

Dem Gebot, den Flächenverbrauch spürbar zu reduzieren, ist bei Maßnahmen des Bodenschutzes immer auch die Folgenutzung der Flächen (Flächenrecycling) in der Planungsphase zu berücksichtigen. Die Nutzung der Grünen Wiese, besonders schutzwürdiger Böden sind massiv zu erschweren und eine Entsiegelungsoffensive zu fördern.

Das komplexe Medium Boden braucht intelligente Lösungen, die Vor- und Nachsorge zusammendenkt und optimiert.

Anschriften der Autorinnen/Autoren

Dr. Christoph Schulte und Jörg Frauenstein
Umweltbundesamt, Abteilung II 2
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau
Telefon: 0340 2103 3162
E-Mail: Christoph.schulte@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Ihr Beratungsunternehmen

für die Verbesserung von Qualität, Sicherheit,
Gesundheits- und Umweltschutz



Bei WESSLING Consulting Engineering sind 250 Mitarbeiter*innen an zehn Standorten in Deutschland tätig – verbunden durch die vielfältige und anspruchsvolle Aufgabe und Überzeugung, einen wichtigen Beitrag für die Gesellschaft zu leisten.

Das Unternehmen bietet Kund*innen aus Industrie, Handel, Gewerbe und öffentlicher Hand umfassende Beratungs- und Planungsleistungen in den Bereichen Baugrund, Altlasten, Flächenrecycling sowie Boden- und Grundwassersanierung.

Fragen und Antworten zur Ersatzbaustoffverordnung

Manuela Rieneck

1 Einleitung

Am 01.08.2023 ist die sogenannte Mantelverordnung als Artikelgesetz mit folgenden Bestandteilen in Kraft getreten:

- Artikel 1 - Einführung der Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV)
- Artikel 2 - Überarbeitung Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)
- Artikel 3 - Änderung Deponieverordnung (DepV),
- Artikel 4 - Änderung Gewerbeabfallverordnung sowie
- Artikel 5 - Inkrafttreten, Außerkrafttreten.

Die ErsatzbaustoffV ist der wichtigste Bestandteil dieser sogenannten Mantelverordnung. Mit der seit dem 01.08.2023 geltenden Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV) wurden erstmalig bundeseinheitliche und rechtsverbindliche Anforderungen an die Herstellung mineralischer Ersatzbaustoffe (mit Güteüberwachung) und den Einbau dieser in technische Bauwerke festgelegt. Ziel ist die Qualität der mineralischen Ersatzbaustoffe zu verbessern, die Recyclingquoten zu steigern und damit Primärrohstoffe einzusparen sowie den ohnehin knappen Deponieraum zu entlasten.

Mineralische Ersatzbaustoffe im Anwendungsbereich der ErsatzbaustoffV sind u. a. Recycling-Baustoffe aus Bau- und Abbruchabfällen, Schlacken aus der Metallherzeugung und Aschen aus thermischen Prozessen.

Die Herstellung der mineralischen Ersatzbaustoffe erfolgt dabei durch Aufbereitungsanlagen, in denen die Stoffe behandelt, insbesondere sortiert, getrennt, zerkleinert, gesiebt, gereinigt oder abgekühlt werden. Die ErsatzbaustoffV unterscheidet hierbei nach mobilen und stationären Aufbereitungsanlagen.

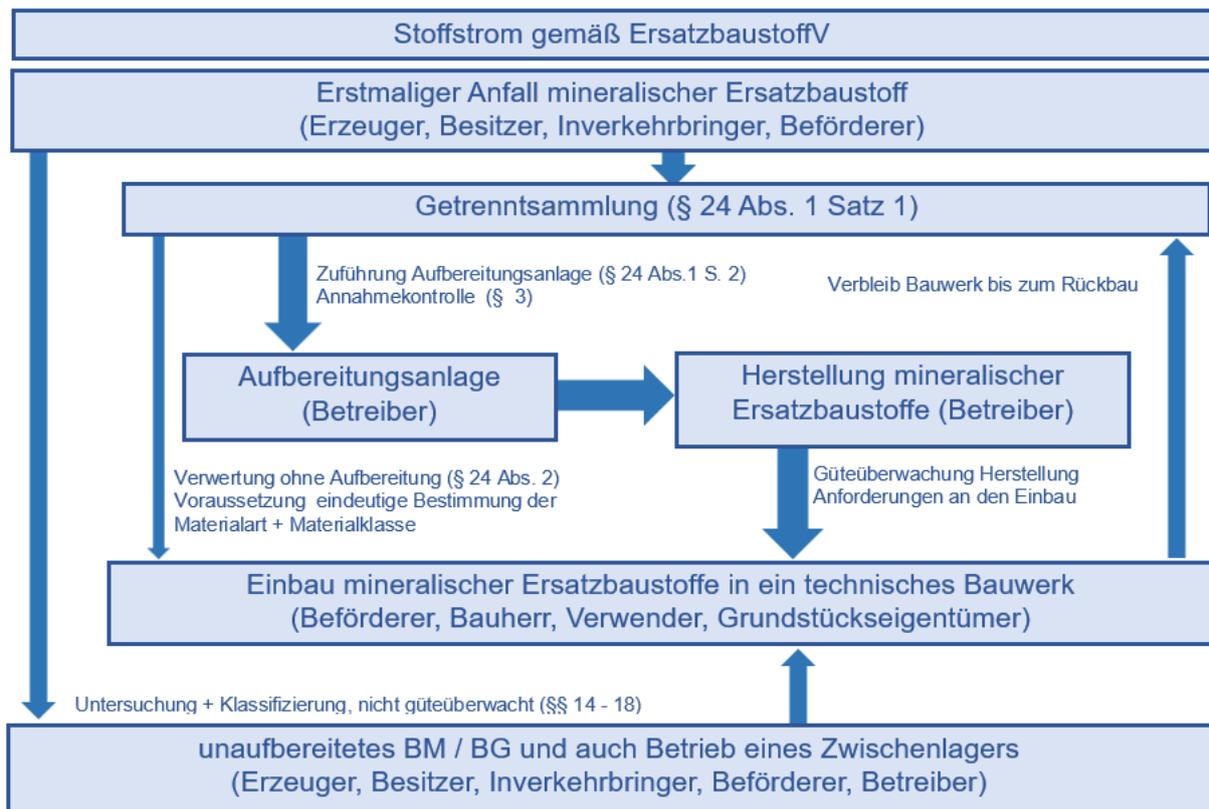
Einbauseitig sind technische Bauwerke vor allem im Tiefbau, wie Straßen, Schienenverkehrswege, befestigte Flächen, Leitungsrinnen, Lärm- und Sichtschutzwällen betroffen. Die ErsatzbaustoffV gibt zum einen für die jeweiligen Ersatzbaustoffe, die in Materialklassen eingestuft werden, Materialwerte in Bezug auf bestimmte Schadstoffe vor, deren Einhaltung im Rahmen einer Güteüberwachung zu gewährleisten ist. Zum anderen sieht sie an diese Grenzwerte angepasste Einbauweisen vor, die vom Verwender beim Einbau in das technische Bauwerk entsprechend den örtlichen Gegebenheiten zu beachten sind.

Durch die Einführung der ErsatzbaustoffV wurde das in einigen Ländern geltende technische Regelwerk „Mitteilungen 20 - Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln – Stand 06.11.2003“ (LAGA M 20) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft (LAGA) in Teilen ungültig. Dies betrifft auch die Länder, die nicht die

LAGA M 20 eingeführt hatten, sondern die ihre eigenen technischen Regelwerke für eine stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen angewendet haben und diese nun ebenso in Teilen bzw. komplett ungültig geworden sind.

In der untenstehenden Abbildung ist zur Veranschaulichung der Stoffstrom gemäß der ErsatzbaustoffV grob dargestellt.

Abbildung: Stoffstrom gemäß ErsatzbaustoffV



Die ErsatzbaustoffV sollte als Chance für eine bundeseinheitliche Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen gesehen werden. Es ist jedoch zu konstatieren, dass aufgrund der Komplexität der ErsatzbaustoffV bei der Umsetzung in der Praxis viele Fragen auftreten.

Die ErsatzbaustoffV regelt z. B. keine Vorsorgeuntersuchungen auf der Baustelle, sondern greift erst bei der Annahme bei einem Aufbereiter. Dies führt in der Praxis oft zu Unsicherheiten auf der Baustelle, vor allem bei der Abgrenzung zu den unterschiedlichen Rechtsbereichen (ErsatzbaustoffV, BBodSchV, DepV, eventuell noch LAGA M 20), da der mineralische Ersatzbaustoff ja je nach Verwertungszweck entsprechend analysiert werden muss und auch andere Anforderungen (umwelt- und bautechnisch) an die jeweilige Verwertung gestellt werden. Es sind neben der ErsatzbaustoffV auch noch andere Verwertungsmöglichkeiten denkbar, wie z. B. eine Verwertung nach BBodSchV, eine Verwertung im Bereich der Haldenabdeckungen im Bergbau oder ein Einsatz in Bauprodukten. Durch die Einführung der ErsatzbaustoffV ist keine einheitliche Analytik bzgl. des Eluates mehr gegeben, sodass die

Eluatwerte nicht mehr vergleichbar sind. Dies betrifft das Wasser-/Feststoffverhältnis (W/F)), dass bei den einzelnen Regelwerken (LAGA M 20 (W/F 10:1), DepV (W/F 10:1), BBodSchV (W/F 2:1) und ErsatzbaustoffV (W/F 2:1)) unterschiedlich ist. Da auf der Baustelle im Vorfeld oft nicht klar ist, was mit dem anfallenden mineralischen Ersatzbaustoff „passieren“ soll - Verwertung und wie oder doch die Beseitigung - führt dies oft zu Doppel-Analysen. Dies führt oft zu fehlerhaften oder auch unpräzisen Ausschreibungen von Bauleistungen.

Weiterhin führen die umfangreichen Dokumentationen bei der Güteüberwachung und beim Einbau (Vor- und Abschlussanzeigen) zu einem erhöhten Aufwand bei der Herstellung als auch beim Einbau der mineralischen Ersatzbaustoffe. Dies kann bei der Güteüberwachung vor allem für mobile Aufbereitungsanlagen ein Hemmnis darstellen.

Dies hat zur Folge, dass Projektplanungen im Vorfeld aufwendiger werden, der Aufwand zur Erstellung von Baugrundgutachten sich erhöht hat und die Kosten der umweltrelevanten Untersuchungen erheblich gestiegen sind. Letzteres ist u. a. auch in größeren Probenmengen begründet, da ein Blumenstrauß von chemischen Analysen durchgeführt werden muss, um wie bereits oben erwähnt, alle Verwertungswege (Einbau in ein technisches Bauwerk, Verfüllung, bodenähnliche Anwendung, Deponie) offen zu halten.

Ein weiterer Punkt, z. B. bei der Lagerung mineralischer Ersatzbaustoffe, ist die noch nicht angepasste Verordnung über die Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV). Hier wird die Einstufung als wassergefährdend und als nicht wassergefährdend noch nach der LAGA M 20 vorgenommen.

2 FAQ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)

Um all die auftretenden Fragestellungen bei der Umsetzung in der Praxis konstruktiv mit allen Beteiligten zu lösen, hat die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) eine LAGA Ad-hoc-Arbeitsgruppe ErsatzbaustoffV eingerichtet, welche sich dieser Fragestellungen angenommen hat und noch annimmt.

Aufgrund der vielfältigen und komplexen Fragestellungen arbeitet die LAGA Ad-hoc-Arbeitsgruppe gerade an der Version 3 einer „FAQ ErsatzbaustoffV“. Version 2 ist auf der LAGA-Homepage veröffentlicht (https://www.laga-online.de/documents/fragen-und-antworten-zur-ersatzbaustoffverordnung-version-2_1695283839.pdf). So wie sich der Sachstand aktuell darstellt, wird die LAGA Ad-hoc-Arbeitsgruppe ErsatzbaustoffV, auch eine Version 4 erarbeiten.

Die LAGA Ad-hoc-Arbeitsgruppe ErsatzbaustoffV hat in der Version 3 viele neue und darüber hinaus auch alte Fragestellungen erneut diskutiert.

Einige Fragestellungen, die die Bereiche des Bodenschutzes und des Gewässerschutzes betreffen, wurden an die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) und die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) weitergeleitet. Die Antworten der LABO

sind in die Version 3 eingeflossen. Die Antworten der LAWA stehen noch aus und werden voraussichtlich in die Version 4 einfließen.

Folgende Fragestellungen wurden neu in die Version 3 aufgenommen bzw. es wurden Anpassungen gegenüber der Version 2 vorgenommen:

- Was ist beim Import bzw. Export mineralischer Ersatzbaustoffe hinsichtlich der ErsatzbaustoffV zu beachten?
- Was ist unter einem Deich im Sinne der ErsatzbaustoffV zu verstehen?
- Fällt Flüssigboden bzw. Boden mit Zusatz von Bindemitteln im Rahmen der Errichtung eines technischen Bauwerkes in den Anwendungsbereich der ErsatzbaustoffV?
- Wie ist die Verwendung von Festgestein am Anfallort zu bewerten und was ist dabei zu beachten?
- Was ist eine Aufbereitung i. S. d. ErsatzbaustoffV?
- Fallen aus mineralischen Ersatzbaustoffen hergestellte Pflastersteine in den Geltungsbereich der ErsatzbaustoffV?
- Ist in der ErsatzbaustoffV zwischen Hausmüllverbrennungsrückständen und -schlacken zu differenzieren?
- Für Ziegelmaterial sind in der ErsatzbaustoffV keine Materialwerte definiert. Was bedeutet das für die Güteüberwachung von Ziegelmaterial?
- Welchem Material ist ausgebautes Natursteinschotter zuzuordnen?
- Können Vermieter von mobilen Aufbereitungsanlagen eine Betriebsbeurteilung ausstellen und diese der Firma, an die die Anlage vermietet wurde, übergeben?
- Können alternative Untersuchungsverfahren verwendet werden?
- Ist nach einem Wechsel der Überwachungsstelle die Erstellung eines neuen Eignungsnachweis (EgN) erforderlich bzw. sind bestehende EgN zu aktualisieren?
- Wann ist eine Zulassung im Einzelfall möglich?
- Welchen Umfang soll ein Prüfzeugnis zum EgN, zur werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) sowie zur Fremdüberwachung (FÜ) haben?
- Müssen Probenahmeprotokolle grundsätzlich im Prüfzeugnis zum Eignungsnachweis und zur Fremdüberwachung enthalten sein?
- Die DIN 19528 (2009) wurde durch die DIN 19528 (2023) ersetzt. Was bedeutet das für die Probenvorbereitung nach § 8 Abs. 4 ErsatzbaustoffV?
- Welche Relevanz hat der Grobanteil bei analytischen Untersuchungen und der Einstufung von Bodenmaterial mit bis zu 10 Vol.-% mineralischer Fremdbestandteile?
- Wie ist mit dem Feuchtegehalt in mineralischen Ersatzbaustoffen umzugehen bzw. wie sind hier die Materialwerte zu deuten?
- Wie sind die Parameter pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit zu bewerten?
- Wer darf die Probenahme nach § 14 Abs. 1 ErsatzbaustoffV durchführen?
- Wann kann bei Haufwerksuntersuchungen nach § 14 Abs. 1 ErsatzbaustoffV die Anzahl an Laborproben reduziert werden?
- Kann die 4 aus 5 Regelung auch auf nicht aufbereitetes Bodenmaterial bzw. Baggergut angewendet werden?

- Was ist zu beachten, wenn eine Baumaßnahme die örtliche Zuständigkeit mehrerer Behörden berührt?
- Wie erfolgt die Bewertung von Bodenmaterial und Baggergut hinsichtlich der Eluat-Parameter Quecksilber und Thallium?
- Was ist unter Bodenverfestigung bzw. Baugrundverbesserung zu verstehen?
- Wie sind Düsenstrahl- und Hochdruckinjektionsverfahren zur Baugrundverbesserung bzw. Bodenverfestigung einzustufen, bei denen Flugaschen zum Einsatz kommen?
- Wie ist mit dem Feuchtegehalt in mineralischen Ersatzbaustoffen umzugehen bzw. wie sind hier die Materialwerte zu deuten?
- Wann ist eine Einzelfallzulassung nach § 21 Abs. 2 oder 3 ErsatzbaustoffV erforderlich?
- Anhang 2 - Empfehlung für den Mindestinhalt von Prüfzeugnissen sowie der Dokumentation im Rahmen der Güteüberwachung nach ErsatzbaustoffV

Da die Version 3 noch nicht veröffentlicht ist und gerade die Anmerkungen z. B. der Verbände diskutiert werden, können die Antworten zu diesem Zeitpunkt noch nicht im Detail wiedergegeben werden. Es können sich noch Änderungen der Fragen selbst ergeben bzw. könnten Fragen aufgrund der Komplexität eventuell noch gestrichen werden, um sie dann in einer folgenden Version 4 zu beantworten. Die Diskussion im Gremium zeigt immer wieder die Komplexität der Fragestellungen in Bezug auf die Umsetzung der ErsatzbaustoffV.

Zu den Anforderungen, die sich mit der Bestimmung der Grundwasserdeckschicht nach § 19 Abs. 8 ErsatzbaustoffV auseinandersetzen, wurden im LAGA-FAQ der Version 2 bereits erste Ausführungen gemacht. In der Zwischenzeit haben sich diesbezüglich jedoch weitere Fragen aus der Praxis ergeben, zu denen eine bundeseinheitliche Antwort angestrebt wird.

Daher wurden, wie oben erwähnt, von der LAGA Ad-hoc-Arbeitsgruppe ErsatzbaustoffV diese Fragestellungen an die LAWA weitergegeben. Diese sind noch nicht beantwortet. Wann und wie die Fragen beantwortet werden, dazu können keine belastbaren Aussagen getroffen werden.

Dies betrifft z. B. folgende Fragestellungen:

- Kann der höchste zu erwartende Grundwasserstand anhand statistischer Daten ermittelt werden?
- Welche weiteren Anforderungen bestehen an die Datengrundlage?
- Wie kann vorhandenes Kartenmaterial gewertet werden? Es bestehen Unterschiede im „wording“ zwischen Grundwasserschutz und ErsatzbaustoffV.
- Welche Anforderungen bestehen bei einem kleinen Bauvorhaben (Einfamilienhaus) an Kartenwerke (Bodenkunde, Wasserwirtschaft) in Kombination mit Kartierungen (Baugrund, Boden)?
- Ist für die Bemessung des Grundwasserabstands bei Vorhandensein von Tiefengrundwasser (unterhalb einer stauenden Bodenschicht / eines Grundwassernichtleiters) und Schichtenwasser (oberhalb einer stauenden Bodenschicht / eines Grundwassernichtleiters) ausschließlich auf das Tiefengrundwasser abzustellen oder auch auf das Schichtenwasser als eigener Grundwasserkörper?

- Sofern (auch bei nicht vorkommendem Schichtenwasser) auf das Tiefengrundwasser abzustellen ist, ist dann der gespannte Grundwasserspiegel (unterhalb der stauenden Bodenschicht) oder der Druckwasserspiegel (i.d.R. innerhalb oder oberhalb der stauenden Bodenschicht) maßgebend?
- Welche Anforderung ist an die Grundwasserdeckschicht bei Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in WSG II oder HSG II zu beachten?
- Welcher Verordnung unterliegen Mulden als Versickerungsanlagen mit durchwurzelbarer Bodenschicht?
- Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen im Überschwemmungsgebiet?

Weitere Punkte, die bei der Anwendung der ErsatzbaustoffV noch nicht abschließend geklärt sind und in der Praxis immer zu Diskussionen führen, sind der Umgang mit dem Grobbodengehalt bei der Klassifizierung der Bodenart der Grundwasserdeckschicht gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung, 5. Auflage bzw. der DIN 18196 (Kartieranleitung eher bodenkundlicher und die DIN ingenieurwissenschaftlicher Ansatz).

Dies betrifft auch, ob die Herstellung von Asphaltgemischen aus z. B. Schlacken in den Regelungsbereich der ErsatzbaustoffV fällt oder nicht.

Gegenüber der „FAQ ErsatzbaustoffV“ Version 2 erfolgten noch redaktionelle Anpassungen sowie die Streichung der Übergangsfristen der ErsatzbaustoffV, da diese nicht mehr von Relevanz sind.

Aktuell werden, wie oben erwähnt, die Anmerkungen der Verbände bearbeitet. Zum genauen Zeitpunkt der Veröffentlichung der „FAQ ErsatzbaustoffV“ Version 3 auf der LAGA-Homepage kann noch keine Aussage getroffen werden.

3 Bundesebene

Da es sich mit der ErsatzbaustoffV um eine Verordnung handelt, der ein sehr umfangreiches wissenschaftliches Konzept zugrunde liegt, hat sich der BMUV mit dem Artikel 5 (Inkrafttreten, Außerkrafttreten) der sogenannten Mantelverordnung verpflichtet die Regelungen in der Praxis zu überprüfen.

Gemäß diesem Artikel 5 führt die Bundesregierung eine Evaluierung ErsatzbaustoffV sowie ein Monitoring der ErsatzbaustoffV und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) durch.

Darüber hinaus hat sich die Bundesregierung in der Begründung zur sogenannten Mantelverordnung für anzeigepflichtige mineralische Ersatzbaustoffe gemäß § 22 ErsatzbaustoffV verpflichtet, für die Erfassung dieser den Ländern gemäß § 23 ErsatzbaustoffV ein elektronisches Ersatzbaustoffkataster zur Verfügung zu stellen.

Zur Umsetzung hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) mit dem Umweltbundesamt (UBA) drei ReFoPlan-Vorhaben initiiert.

Artikel 5 Absatz (2) - Evaluierung der ErsatzbaustoffV (April 2024 - Juli 2027)

Gemäß Artikel 5 Absatz (2) soll die Bundesregierung auf Grundlage der abfallwirtschaftlichen Entwicklung bis zum 01.08.2025 die Auswirkungen des Vollzugs der Regelungen auf die Verwertung mineralischer Abfälle überprüfen und die sich daraus ergebenden Folgerungen gegebenenfalls durch Anpassungen in der Verordnung umsetzen.

In einem ersten Schritt erfolgt eine Ermittlung des Status Quo durch Aufarbeitung der verfügbaren Daten, um damit einen Vergleich zwischen den Materialströmen vor und nach Inkrafttreten der ErsatzbaustoffV durchführen zu können.

In einem weiteren Schritt ist wieder ein Planspiel 2.0 geplant (fokussierte Erkenntnisse und Vergleich mit dem Planspiel aus dem Jahr 2017).

Es geht um die Identifizierung von aktuellen und zukünftigen Mengenverschiebungen und den zugrundeliegenden Einflussfaktoren, wie z. B. durch verstärkte Ablagerungen auf Deponien oder durch verstärkte Verwertungs- oder Recyclingoptionen durch den Vollzug der ErsatzbaustoffV.

Dies soll durch Auswertung der realen Katasterdaten (Echtdatenerhebung) und Modellierung der nicht anzeigepflichtigen Mengenströme erfolgen. Dazu sind zusätzliche Informations- u. Datenquellen zu identifizieren, zu qualifizieren bzw. zu verarbeiten.

Letztendlich geht es um die „Praxistauglichkeit“ der ErsatzbaustoffV hinsichtlich der Herstellung und Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen und den sich dann daraus ergebenden Anpassungsbedarf der ErsatzbaustoffV.

Artikel 5 Absatz (3) - Monitoring (01.06.2023 - 31.10.2026, Eigenforschungsvorhaben des UBA)

Gemäß Artikel 5 Absatz (3) führt die Bundesregierung ein wissenschaftlich begleitetes Monitoring durch, das insbesondere folgende Punkte beinhaltet, wie z. B.

- eine Bestandsaufnahme,
- die Evaluierung der Werteregelungen des Fachkonzeptes der ErsatzbaustoffV in Bezug auf die bodenbezogenen Fragestellungen,
- die Evaluierung der Werteregelungen der BBodSchV anhand neuer vorliegender Daten zur Stofffreisetzung und eventueller Einbeziehung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse,
- die tatsächliche Nutzung von mineralischen Ersatzbaustoffen unter Berücksichtigung der in bautechnischen Normen und Regelwerken festgelegten geeigneten Bauweisen sowie regionaler Verfügbarkeiten und Märkte,
- die Entwicklung der Deponiemengen der anfallenden mineralischen Abfälle,
- die Wiederverwendungspotentiale der Ersatzbaustoffe mit höheren Schadstoffgesamtgehalten im second-life sowie die Ableitung von Indikatoren und Parametern, um die zukünftige Entwicklung des Recyclings und der Verwertung mineralischer Ersatzbaustoffe in einem fortlaufenden Monitoring zu verfolgen,

- evtl. neue bislang fehlende medienschutzbasierte Einbauwerte,
- Überprüfung der Einzelregelungen bei den Materialwerten,
- Prüfung und eventuelle Anpassung weiterer Ersatzbaustoffe (z.B. PFAS, Entstehung „neuer Ersatzbaustoffe“ durch Dekarbonisierung der Industrie) sowie
- Abgleich von U-Methoden und Harmonisierung Untersuchungsmethoden der verschiedenen Rechtsbereiche (ErsatzbaustoffV, BBodSchV und DepV).

Ziel ist es also, dass wissenschaftlich abgeleitete Fachkonzept der ErsatzbaustoffV mit Praxisdaten (z.B. aus der Güteüberwachung) mit Fokus auf die Bodenschutzaspekte, zu überprüfen. Nachzulesen auf der Internetseite des UBA unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/bodenforschung-im-uba>.

Entwicklung eines bundeseinheitlichen Softwaretools zur Erfassung und Verwaltung der Verwendung von Ersatzbaustoffen (Laufzeit: 01.01.2024 - 31.03.2026)

Gemäß § 23 ErsatzbaustoffV sind alle anzeigepflichtigen mineralischen Ersatzbaustoffe von der zuständigen Behörde in einem Kataster zu dokumentieren. Ziel ist eine Erfassung der technischen und umweltbezogen relevanten Daten bereits beim Einbau und im Falle eines Rückbaus des technischen Bauwerks, um so eine schadlose und ordnungsgemäße Verwendung, Verwertung oder Entsorgung zu gewährleisten. Die elektronische Erfassung der Vor- und Abschlussanzeige soll auf Grundlage eines geodaten- und browserbasierten Softwaretools erfolgen. Das Softwaretool wird den Ländern vom BMUV zur Verfügung gestellt. Zurzeit wird noch die Frage diskutiert, ob dies dezentral oder zentral erfolgen soll und wie die Finanzierung des Softwaretools erfolgen soll.

Umsetzung der ReFoPläne

Die Umsetzung soll durch intensive Vernetzung mit allen Anwendenden (vor allem den Vollzugsbehörden) und weiteren Stakeholdern, wie z.B. der LABO, der LAWA, der LAGA, der Deutschen Bahn, des Eisenbahnbundesamtes, der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen sowie Vertretern verschiedener Verbände erfolgen. Alle Daten, die im Rahmen der Entwicklung des Fachkonzeptes zur ErsatzbaustoffV anfallen, (Elutions- und Transfersversuche) sollen ausgewertet werden. Es ist wichtig, die Erfahrungsberichte der Vollzugsbehörden und der anderen Beteiligten zu sammeln und auszuwerten.

Darüber hinaus müssen bzw. sollten, die Fragen, die die Ad-hoc-Arbeitsgruppe ErsatzbaustoffV bisher in den FAQ zur ErsatzbaustoffV beantwortet haben, dringend in diesem Prozess mit berücksichtigt werden.

4 FAZIT

Die vom Gesetzgeber mit der ErsatzbaustoffV gewünschte bundesweite Vereinheitlichung bei der Verwertung mineralischer Ersatzbaustoffe mit den sich daraus ergebenden Anforderungen ist ein guter Ansatz, um die Stoffströme der mineralischen Ersatzbaustoffe gezielter und effizienter zu verwerten und in den Wirtschaftskreislauf zurückzuführen. Dies dient auch der Unterstützung zur Einsparung von Primärrohstoffen und Deponieflächen.

In der Praxis führt die Umsetzung der ErsatzbaustoffV jedoch noch aufgrund der Komplexität zu großen Unsicherheiten und vielen Diskussionen.

Auf allen Ebenen (mit den Ländern, mit der Bauindustrie, mit den Vollzugsbehörden, mit den Vertretern der Verbände etc.) werden intensive Gespräche geführt, die sich mit der Umsetzung der ErsatzbaustoffV und deren Verbesserung beschäftigen.

Hier gilt es, daran zu appellieren, damit die Umsetzung und ein bundeseinheitliches Vorgehen wirklich gelingen kann, dass alle Beteiligten gut zusammenarbeiten sollten.

Literaturverzeichnis

Bund (2021): Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung - ErsatzbaustoffV) ErsatzbaustoffV, Ausfertigungsdatum: 09.07.2021 Vollzitat: "Ersatzbaustoffverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 186) geändert worden ist" Stand: Geändert durch Art. 1 V v. 13.7.2023 I Nr. 186

LAGA (2003): Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)

Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20 - Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln - Stand: 06.11.2003

Anschrift der Autorin

Manuela Rieneck

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz
Referat 36 - Kreislauf- u. Abfallwirtschaft, Altlasten, Ressourcenmanagement

Archivstraße 2
30169 Hannover

Tel.: 0511/120-3164

email: Manuela.Rieneck@mu.niedersachsen.de

www.umwelt.niedersachsen.de



AGROLAB GROUP

Your labs. Your service.

AGROLAB beim ITVA-Altlastensymposium: Expertise für eine saubere Umwelt

- ▶ **Umfangreiches Untersuchungsspektrum**
- ▶ **Moderner, redundanter Gerätepark**
- ▶ **Bundesweite Probenlogistik**
- ▶ **Akkreditierungen**
- ▶ **Kompetente, fachliche und individuelle Betreuung**
- ▶ **ALOORA Online-Portal**

Kontaktieren
Sie uns!



agrolab.com/de/finden-sie-ihren-ansprechpartner

AGROLAB: Ihr Experte für Umweltanalytik in Europa. Mit modernster Labortechnik und über 30 Standorten bieten wir umfassende Lösungen für die Analyse von Boden, Grundwasser, mineralischen Feststoffen, einschließlich Asbest, PFAS und anderen Schadstoffen.

Verfassungsrechtliche Grenzen der Haftung des Grundstückseigentümers

Matthias Peine

1 Einleitung

25 Jahre nach der Grundsatzentscheidung des Bundesverfassungsgerichts (BVerfG) vom 16.02.2000¹ zur Begrenzung der Haftung des Grundstückseigentümers als Zustandsverantwortlichen für die Sanierung von Altlasten sind nach wie vor Rechtsfragen in diesem Zusammenhang ungeklärt.

Jüngst hat das Bundesverwaltungsgericht (BVerwG) mit Urteil vom 07.11.2024² weitere Rechtsfragen im Zusammenhang mit der Festsetzung der beitragsmäßigen Haftungsobergrenze beantwortet.

2 Ausgangslage

In dem viel beachteten Beschluss aus dem Jahr 2000 hatte das BVerfG erstmals die Haftung des Grundstückseigentümers als Zustandsverantwortlichen im Lichte der Eigentumsgarantie aus Art. 14 GG begrenzt.

Zunächst hat das BVerfG festgestellt, dass es keinen verfassungsrechtlichen Bedenken begegne, die sicherheitsrechtlichen Vorschriften über die Zustandsverantwortlichkeit dahingehend auszulegen, dass der Eigentümer eines Grundstücks allein wegen dieser Rechtsstellung verpflichtet werden könne, von dem Grundstück ausgehende Gefahren zu beseitigen, auch wenn er die Gefahrenlage weder verursacht noch verschuldet habe.³

Die Haftung der Zustandsverantwortlichkeit des Eigentümers ist aber durch den Grundsatz der Verhältnismäßigkeit begrenzt.⁴ Im Rahmen der Verhältnismäßigkeitsprüfung ist die Belastung des zustandsverantwortlichen Eigentümers zu berücksichtigen und mit den betroffenen Gemeinwohlbelangen abzuwägen. Nach dem Beschluss des BVerfG sind folgende Aspekte zu berücksichtigen⁵:

Anhaltspunkt für die Zumutbarkeit ist der finanzielle Aufwand im Verhältnis zum Verkehrswert des Grundstücks nach Durchführung der Sanierung.

Für eine Unzumutbarkeit spricht,

- wenn die Gefahr, die von dem Grundstück ausgeht, aus Naturereignissen, aus der Allgemeinheit zuzurechnenden Ursachen oder von nicht nutzungsberechtigten Dritten herrührt.

¹ BVerfG, Beschl. v. 16.02.2000 – 1 BvR 242/91, BVerfGE 102, 1-25.

² BVerwG, Urte. v. 07.11.2024 – 10 C 12.23.

³ BVerfG, a.a.O., Rn. 49.

⁴ BVerfG, a.a.O., Rn. 54.

⁵ BVerfG, a.a.O., Rn. 56 ff.

- wenn das zu sanierende Grundstück den wesentlichen Teil des Vermögens des Pflichtigen bildet und die Grundlage seiner privaten Lebensführung einschließlich seiner Familie darstellt.

Für eine Zumutbarkeit spricht,

- wenn der Eigentümer das Risiko der entstandenen Gefahr bewusst in Kauf genommen hat.
- wenn und soweit Risikoumstände beim Erwerb eines Grundstücks oder bei der Nutzungsgewährung an Dritte zwar erkennbar waren oder im Verlauf der Nutzung hätten erkannt werden können, der Eigentümer aber in fahrlässiger Weise die Augen davor verschlossen hat. Insoweit ist der Grad der Fahrlässigkeit zu berücksichtigen und ob der Eigentümer Vorteile aus dem eingegangenen Risiko gezogen hat.

Auch in Fällen, in denen eine Kostenbelastung über den Verkehrswert hinaus zumutbar ist, kann die zu tragende Kostenlast nicht an der gesamten wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit des Eigentümers gemessen werden. Grundsätzlich ist es dem Eigentümer nicht zumutbar, unbegrenzt für die Sanierung einzustehen, das heißt auch mit Vermögen, das in keinem rechtlichen oder wirtschaftlichen Zusammenhang mit dem sanierungsbedürftigen Grundstück steht. Der Zugriff auf Vermögen, welches mit dem Grundstück in einem funktionalen Zusammenhang steht oder eine Einheit bildet, kann zulässig sein.⁶ Als Beispiel nennt das BVerfG, dass das Grundstück Bestandteil eines land- oder forstwirtschaftlichen Betriebes oder sonstigen Unternehmens ist. Ist die Fortführung des Unternehmens oder Betriebs durch die Kostenlast gefährdet, dürfte dies unverhältnismäßig sein.

Ist die Kostentragung des Grundstückseigentümers begrenzt, muss die Behörde über diese entscheiden. Nur in Ausnahmefällen darf die Sanierungsverfügung mit dem Vorbehalt einer gesonderten Entscheidung über die Kostentragung verbunden werden.⁷

3 Beitragsmäßige Festlegung der Haftungsobergrenze

Als durch die Entscheidung des BVerwG vom 07.11.2024 geklärt anzusehen ist die Frage, ob eine beitragsmäßige Festlegung der Haftungsgrenze bereits in einer Sanierungsanordnung enthalten sein muss.

Das BVerwG hat bestätigt, dass die Sanierungsanordnung die im jeweiligen Einzelfall maßgebliche Begrenzung der Kostenbelastung des Zustandsverantwortlichen festlegen muss. Hintergrund ist, dass der Betroffene sinnvoll entscheiden können muss, ob er gegen die Anordnung vorgeht oder nicht.⁸ Damit hat das BVerwG die Entscheidung des Bayerischen Verwaltungsgerichtshofs (VGH München) vom 26.09.2023 aufgehoben. Der VGH München war davon ausgegangen, dass es mit Art. 14 Abs. 1 GG nicht vereinbar sei, bereits in einer bodenschutzrechtlichen Sanierungsanordnung gegenüber einem Zustandsverantwortlichen den Verkehrswert, der für den Grundstückszustand nach Abschluss der angeordneten oder erstrebten Sanierung prognostiziert wird, als Belastungsobergrenze beitragsmäßig festzulegen, wenn eine gesteigerte Ungewissheit über die Sanierungsdauer oder den Sanierungserfolg bestünde.⁹

⁶ BVerfG, a.a.O., Rn. 62.

⁷ BVerfG, a.a.O., Rn. 65.

⁸ BVerwG, Ur. v. 07.11.2024 – 10 C 12.23, BeckRS 2024, 38720, Rn. 11.

⁹ VGH München, Ur. v. 26.09.2023 – 24 B 22.167, BeckRS 2023, 26243 Rn. 39.

Für den Fall, dass mit Bezug auf ein Grundstück eine weitere Sanierungsanordnung ergeht, bedarf es der neuerlichen Festsetzung einer auf diese Anordnung bezogenen Haftungsobergrenze auf der Grundlage der dann gegebenen Sach- und Rechtslage.¹⁰

Nur in Ausnahmefällen muss laut BVerwG keine Entscheidung über die Höhe des Haftungsrisikos in der Sanierungsanordnung getroffen werden. Ein solcher Ausnahmefall liegt vor, wenn der Verwaltung die Gründe der Unzumutbarkeit einer Belastung in Höhe des Verkehrswerts im Zeitpunkt der Sanierungsanordnung nicht oder nicht vollständig bekannt sind, so dass über die Kostentragung zu diesem Zeitpunkt noch nicht abschließend entschieden werden kann. In diesen Ausnahmefällen ist entsprechend dem Beschluss des BVerfG die Sanierungsverfügung mit dem Vorbehalt einer gesonderten Entscheidung über die Kostentragung zu verbinden.¹¹

Ordnet die Behörde die Sanierung unter dem Vorbehalt einer gesonderten Entscheidung über die Kostentragung an, handelt es sich bei dem Vorbehalt nicht um eine aufschiebende Bedingung.¹² Dies hat zur Folge, dass die Sanierungsanordnung, wenn sie für sofort vollziehbar erklärt wurde, vollstreckbar ist. Führt der Grundstückseigentümer die angeordneten Maßnahmen durch, hat er einen Erstattungsanspruch in Höhe der über der Opfergrenze liegenden Kosten gegenüber der Behörde.

4 Sonderfall: Gemeinden als Grundstückseigentümer

Höchstrichterlich ist die Frage, ob bei Gemeinden als Grundstückseigentümern auch eine Haftungsbegrenzung auf den Grundstückswert erforderlich ist, bislang nicht geklärt.

Gegen eine Haftungsbegrenzung spricht laut dem VG Ansbach, dass die Position einer Gemeinde im Hinblick auf Art. 14 GG nicht mit der einer Privatperson vergleichbar sei.¹³ Dies gilt laut dem Bayerischen Verfassungsgerichtshof (VerfGH Bayern) jedenfalls dann, wenn das Grundstück der Gemeinde der Erfüllung öffentlicher Aufgaben diene. Ist dies der Fall, befänden die Gemeinden sich als Teil der öffentlichen Gewalt nicht in einer Situation, die typischerweise von den Grundrechten geschützt würde. Sie könnten deshalb im Rahmen der Erfüllung dieser Aufgaben grundrechtlichen Schutz durch Art. 103 Abs. 1 BV als Abwehrrecht gegen hoheitliche Eingriffe nicht beanspruchen.¹⁴

Nach anderer Ansicht kann sich für eine Gemeinde aus dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit eine Haftungsbegrenzung der Höhe nach und damit eine Deckelung der Sanierungskosten auf der Rechtsfolgenseite ergeben, wenn der Schutzbereich von Art. 28 Abs. 2 GG tangiert sei.¹⁵

5 Bestimmung des Verkehrswertes

Weiterhin ist durch das Urteil des BVerwG geklärt, dass die Ermittlung des Verkehrswerts des Grundstücks auf der Grundlage der Sach- und Rechtslage im Zeitpunkt der letzten

¹⁰ BVerwG, a.a.O., Rn. 13.

¹¹ BVerwG, a.a.O., Rn. 11.

¹² VGH Mannheim, Urt. v. 13.04.2021 – 10 S 1071/20, BeckRS 2021, 8515 Rn. 20 ff.

¹³ VG Ansbach, Beschl. v. 09.11.2023 – 9 S 23.798, BeckRS 2023, 39716 Rn. 103.

¹⁴ BayVerfGH, Entscheidung v. 0203.2001 – Vf. 1-VII-99, BeckRS 2001, 21056.

¹⁵ VG Darmstadt, Urt. v. 30.10.2013 – 6 K 1717/11.DA, BeckRS 2014, 51780 Rn. 39; so wohl auch VGH München, Urt. v. 05.04.2006 – 23 BV 05.1433, BeckRS 2008, 33312 Rn. 37 zur Haftung einer Gebietskörperschaft.

behördlichen Entscheidung erfolgt. Erforderlich ist eine prognostische Bestimmung des Verkehrswerts im Zeitpunkt des Abschlusses der angeordneten Sanierung.¹⁶

Die Ermittlung des Verkehrswerts erfolgt nach Maßgabe der §§ 192 ff. BauGB und der Verordnung über die Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Immobilien und der für die Wertermittlung erforderlichen Daten (Immobilienwertermittlungsverordnung – ImmoWertV).¹⁷ Insoweit hat das BVerwG das Urteil des VGH München bestätigt. Nach § 194 BauGB ist der Verkehrswert der Marktwert und wird durch den Preis bestimmt, der in dem Zeitpunkt, auf den sich die Ermittlung bezieht, im gewöhnlichen Geschäftsverkehr nach den rechtlichen Gegebenheiten und tatsächlichen Eigenschaften, der sonstigen Beschaffenheit und der Lage des Grundstücks ohne Rücksicht auf ungewöhnliche oder persönliche Verhältnisse zu erzielen wäre. Gemäß § 2 Abs. 3 ImmoWertV ist ausschließlich das konkrete und nicht nur ein vergleichbares Grundstück zu betrachten.¹⁸ Folglich sind sowohl eine nach der angeordneten Sanierung gegebenenfalls fortbestehende (Rest-)Kontamination des Grundstücks als auch ein etwaiger merkantiler Minderwert im Sinne eines „Imageschadens“ bei der Verkehrswertermittlung zu würdigen.¹⁹ Maßgeblich für die Wertermittlung ist weiterhin jede planungsrechtlich gegenwärtig oder auch absehbar zulässige Nutzung des Grundstücks und nicht nur die konkrete gegenwärtige Nutzung.²⁰ Auch eine Bebauung des Grundstücks ist zu berücksichtigen; § 2 Abs. 3 Satz 2 Nr. 10 ImmoWertV. Dingliche Belastungen durch Grundpfandrechte und einen Bodenschutzlastvermerk (vgl. § 25 Abs. 6 BBodSchG) beeinflussen den Wert des Grundstücks nicht.²¹

Auch wenn eine dingliche Belastung bei der Bestimmung des Grundstückswerts nicht zu berücksichtigen ist, kann sie aber dennoch bei Ermittlung der persönlichen Leistungsfähigkeit des Grundstückseigentümers gewürdigt werden.²²

Im Falle einer Teilsanierung ist der Verkehrswert anhand des Grundstückszustandes nach der Teilsanierung zu bestimmen.²³

6 Überschreitung der Höhe des Verkehrswertes bei fahrlässigem Handeln

Wie zuvor dargestellt, ist es bei fahrlässigem Handeln möglich, den Grundstückseigentümer für eine Sanierung in Anspruch zu nehmen, deren Kosten den Grundstückswert übersteigen.

Insofern wird von der Rechtsprechung teilweise bereits eine verminderte Schutzwürdigkeit angenommen, wenn ein Grundstück in Kenntnis einer Bodenverunreinigung erworben wird, der Käufer aber den Angaben des Verkäufers zu der voraussichtlichen Sanierungsdauer und den Sanierungskosten vertraut hat.²⁴

Andererseits wird von der Rechtsprechung eine Untersuchungsobliegenheit des Grundstücks auch bei Kenntnis einer gefahrgeneigten Nutzung verneint, weil eine Verletzung einer bestehenden Obliegenheit eine Erhöhung der Haftung zur Folge hätte. Dies würde wiederum

¹⁶ BVerwG, a.a.O., Rn. 16.

¹⁷ BVerwG, a.a.O., Rn. 16.

¹⁸ VGH München, Urt. v. 26.09.2023 – 24 B 22.167, a.a.O., Rn. 47.

¹⁹ BVerwG, a.a.O., Rn. 16; VGH München, Urt. v. 26.09.2023 – 24 B 22.167, a.a.O.

²⁰ VGH München, Urt. v. 26.09.2023 – 24 B 22.167, a.a.O., Rn. 48.

²¹ BVerwG, a.a.O.

²² BVerwG, a.a.O.

²³ VGH BW, Urt. v. 08.03.2013 – 10 S 1190/09, Rn. 69, juris.

²⁴ OVG NRW, Beschl. v. 25.02.2015 – 16 B 1166/14, Rn. 19, juris.

ein Handeln in „vorwerfbarer“ Unkenntnis mit dem Handeln in positiver Kenntnis unterschiedslos gleichsetzen.²⁵

Zu konstatieren ist somit, dass die Rechtsprechung hinsichtlich des Grades der Fahrlässigkeit, so wie es das BVerfG fordert, nicht differenziert, sondern dahingehend tendiert, entweder eine Zumutbarkeit der Haftung über den Grundstückswert für zulässig zu halten oder eine Fahrlässigkeit abzulehnen.

Für Grundstückskäufer stellt dieser Befund ein erhebliches Risiko dar. Es bleibt unklar, ob und inwieweit eigene Untersuchungen zu veranlassen sind. Ist eine Bodenverunreinigung bekannt, sind eigene Untersuchungen dringend zu empfehlen.

Aus Sicht des Käufers ist es daher geboten, beim Kauf eines Grundstücks eigene Informationen über die Belastung und die Sanierungsdauer bzw. Sanierungskosten einzuholen und ggf. eigene Untersuchungen zu veranlassen. Wird der Sachverhalt durch den Käufer im Rahmen des Grundstückskauf nicht vollständig aufgeklärt, besteht die Gefahr eines fahrlässigen Handelns mit weitreichenden Folgen.

7 Zumutbarkeit der Erstreckung der Haftung auf das gesamte Vermögen

In Fällen, in denen ausnahmsweise eine Haftung über den Grundstückswert und der Einsatz sonstigen Vermögens zulässig erscheint, hat die Verwaltung eine Abwägungsentscheidung nach den Maßstäben des Beschlusses des BVerfG zu treffen. Die Behörde hat insbesondere zu prüfen, ob und in welchen Grenzen es dem Grundstückseigentümer zugemutet werden kann, sein sonstiges Vermögen zur Sicherung in Anspruch zu nehmen.²⁶

Teilweise wird in der Rechtsprechung aber auch gefordert, dass es Aufgabe des Grundstückseigentümers ist, substantiiert darzulegen, bis zu welcher Grenze eine Kostenbelastung zumutbar ist. Wird durch die mit der Sanierung verbundene Kostenbelastung die Fortführung des Unternehmens oder Betriebs gefährdet, ist dies darzulegen.²⁷

Praktisch relevante Fragen, wie zum Beispiel in welchen Fällen weiteres Vermögen in einem funktionalen Zusammenhang mit dem belasteten Grundstück steht und inwieweit eine Inanspruchnahme dieses Vermögen zumutbar ist, sind bislang nicht von der Rechtsprechung weiter konkretisiert worden.

8 Fazit

Auch 25 Jahre nach dem Beschluss des BVerfG sind nach wie vor viele Fragen offen. Das BVerfG hat aber nunmehr mit seinem Urteil zwei gewichtige Fragen (erneut) höchstrichterlich geklärt und damit zu mehr Rechtssicherheit, insbesondere bei der Bestimmung des Grundstückswerts durch die Anwendung der ImmoWertV, beigetragen.

Anschrift des Autors

Dr. Matthias Peine
avocado rechtsanwälte
Voßstraße 20
10117 Berlin

Telefon: 030-8848080
E-Mail: m.peine@avocado.de
Internet: www.avocado.de

²⁵ VGH München, Urt. v. 26.09.2023 – 24 B 22.167, a.a.O., Rn. 33.

²⁶ VG Meiningen, Beschl. v. 29.11.2013 – 5 E 570/13 Me, Rn. 54, juris.

²⁷ OVG NRW, a.a.O., Rn. 20.

Grundzüge der Kostenlastverteilung bei Kampfmittelaltlasten unter besonderer Würdigung des proaktiv tätigen Grundstückseigentümers

Felix Holländer

1 Einleitung

Während des Zweiten Weltkrieges wurden ca. 1,5 Mio. Tonnen Sprengstoff über dem nationalsozialistischen Deutschland abgeworfen. Die Bomben der Alliierten wiesen dabei eine vergleichsweise hohe Ausfallrate von bis zu 20 Prozent auf. Auf dieser Grundlage wird davon ausgegangen, dass sich unmittelbar nach dem Krieg bis zu 300.000 Tonnen nicht explodierter Kampfmittel auf dem vorherigen Gebiet des nationalsozialistischen Deutschlands befanden.¹ In Bezug auf das heutige Bundesgebiet befinden sich laut Schätzungen aktuell noch ca. 100.000 Tonnen dieser sog. Blindgänger im Boden.² Allein für Hamburg wird z.B. angenommen, dass noch ca. 3000 nicht detonierte Bomben vergraben sind.³ Weil auch die Zahl der jährlichen Räumungen auf einem hohen Niveau liegt – deutschlandweit liegt sie bei ca. 5000 im Jahr – sind Fragen nach der rechtlichen Verantwortlichkeit für Gefahrenerkundung, Untersuchung, Sondierung und Räumung ungebrochen praktisch relevant. Angesichts voranschreitender Korrosionsprozesse der Bomben, die zu einer Erhöhung der Gefahrenlage führen können, ist sogar von einer zunehmenden Relevanz auszugehen.⁴

Vor diesem Hintergrund soll im Folgenden eine nähere Beschäftigung mit dem in diesem Zusammenhang regelmäßig interessierenden Thema der Kostentragungspflicht erfolgen. Ein Hauptaugenmerk soll auf der Frage nach der rechtlichen Verantwortlichkeit für das Tragen von Kosten liegen, die bei der Beseitigung von Blindgängern anfallen. Hierzu soll im Ausgangspunkt die Kostenlastverteilung zwischen Bund und Ländern sowie zwischen Ländern und Kommunen in den Blick genommen werden. Sodann soll angesichts einer jüngeren verwaltungsgerichtlichen Entscheidung ein Blick auf die Konstellation eines proaktiv

¹ *B. Melican*, "They haven't lost their potency": Allied bombs still threaten Hamburg, 23. April 2018, in: Guardian, abrufbar unter <https://www.theguardian.com/cities/2018/apr/23/allied-bombs-still-threaten-hamburg-ww2> (abgerufen am 27. Februar 2025).

² Verein zur Förderung fairer Bedingungen am Bau e.V. u.a., Merkblatt Kampfmittelfrei Bauen, 2. Aufl. 2023, (S. 4) abrufbar unter: https://www.bauindustrie.de/fileadmin/-bauindustrie.de/Themen/Wirtschaft_Recht/Merkblatt_KAMPFMITTELFREI_BAUEN.pdf (abgerufen am 27. Februar 2025).

³ *B. Melican*, "They haven't lost their potency": Allied bombs still threaten Hamburg, 23. April 2018, in: Guardian, abrufbar unter <https://www.theguardian.com/cities/2018/apr/23/allied-bombs-still-threaten-hamburg-ww2> (abgerufen am 27. Februar 2025).

⁴ Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, Ausarbeitung Kampfmittelaltlasten in Deutschland – ein Überblick, 2022, S. 9, abrufbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/909216/a5448dd84ac14a5b36fb93f400a4dff1/WD-2-032-22-pdf-data.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025).

Holländer:

Grundzüge der Kostenlastverteilung bei Kampfmittelaltlasten unter besonderer Würdigung des proaktiv tätigen Grundstückseigentümers

tätigen (privaten) Grundstückseigentümers geworfen werden, der Beseitigungsmaßnahmen „auf eigene Faust“ durchführen lässt und im Anschluss die Kostenerstattung begehrt.⁵

2 Grundzüge der Kostenlastverteilung

2.1 Kostenlastverteilung zwischen Bund, Ländern und Kommunen

Im ersten Schritt soll darauf eingegangen werden, wie die Kostenlast im Staatsaufbau verteilt ist.⁶ Für das Verhältnis zwischen Bund und Ländern ist dabei im Ausgangspunkt Art. 104a Abs. 1 GG maßgeblich. Hiernach tragen Bund und Länder gesondert die Ausgaben, die sich aus der Wahrnehmung ihrer Aufgaben ergeben, soweit das Grundgesetz nichts anderes bestimmt. Damit folgt die *Ausgabenlast* der (sich aus den Kompetenznormen des Grundgesetzes ergebenden) *Aufgabenverantwortung*.⁷

Damit deutet Art. 104a Abs. 1 GG zunächst in Richtung der Länder: Die Räumung von aus dem Zweiten Weltkrieg stammenden Kampfmitteln ist eine Aufgabe der Gefahrenabwehr, welche grundsätzlich den *Ländern* obliegt.⁸ In dieser kompetenzrechtlichen Zuordnung der Materie an die Länder liegt im Übrigen die vielfach beklagte Zerfaserung des deutschen Kampfmittelrechts begründet: Maßnahmen der Kampfmittelbeseitigung werden regelmäßig auf Grundlage der Polizei- und Ordnungsgesetze der Länder sowie landesspezifischer Kampfmittelverordnungen ausgeführt. Zudem ist im föderalen Deutschland – anders als in den meisten anderen europäischen Ländern⁹ – nicht *eine* spezialisierte militärische Einheit zuständig, sondern je nach Bundesland eine andere Behörde.

Die in Art. 104a Abs. 1 GG angelegte Abhängigkeit der Kostenverantwortung von der Aufgabenverantwortung gilt jedoch nur, „soweit dieses Grundgesetz nichts anderes bestimmt“. Eine solche andere Bestimmung liegt mit Art. 120 Abs. 1 S. 1 GG vor: Die Vorschrift regelt, dass der *Bund* die Aufwendungen für Besatzungskosten und die sonstigen inneren und äußeren Kriegsfolgelasten nach näherer Bestimmung von Bundesgesetzen trägt. Diese Bestimmung weist die Aufwendungen für Kriegsfolgelasten¹⁰ – und damit auch die Kosten für

⁵ Es erfolgt eine Konzentration auf *onshore* Kampfmittelaltlasten. *Offshore* Kampfmittelaltlasten bleiben außer Betracht.

⁶ Inhalt und Struktur dieses Kapitels orientieren sich an: Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, Ausarbeitung Fragen zur Beseitigung von Luftminen, 2018, S. 5 ff., abrufbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/560910/9c51a28bcf43dd847af1b13b7ebb7ba4/WD-3-096-18-pdf-data.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025).

⁷ U. Vosgerau, Stellungnahme zum Gesetzesentwurf (u.a. Entwurf eines Gesetzes zur finanziellen Entlastung der Kommunen und der neuen Länder), 2020, S. 2, abrufbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/790440/ce7f2564f3c211d61e212cda8c700956/Dr-Ulrich-Vosgerau.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025); Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, Ausarbeitung Fragen zur Beseitigung von Luftminen, 2018, S. 5 f., abrufbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/560910/9c51a28bcf43dd847af1b13b7ebb7ba4/WD-3-096-18-pdf-data.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025).

⁸ BVerwG, Urteil vom 14. Juni 2006 – 3 A 6/05 –, juris Rn. 9; Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, Ausarbeitung Fragen zur Beseitigung von Luftminen, 2018, S. 3 f., abrufbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/560910/9c51a28bcf43dd847af1b13b7ebb7ba4/WD-3-096-18-pdf-data.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025).

⁹ B. Melican, “They haven’t lost their potency”: Allied bombs still threaten Hamburg, 23. April 2018, in: Guardian, abrufbar unter <https://www.theguardian.com/cities/2018/apr/23/allied-bombs-still-threaten-hamburg-ww2> (abgerufen am 27. Februar 2025).

¹⁰ Nach BVerfGE, Beschluss vom 16. Juni 1959, 2 BvF 5/56, sind hierunter solche Lasten zu verstehen, deren entscheidende - und in diesem Sinne alleinige - Ursache der zweite Weltkrieg ist.

die Beseitigung von Kampfmitteln aus dem Zweiten Weltkrieg – dem Bund zu. Doch auch bei dieser Zuweisung bleibt es nicht. Vielmehr enthält Art. 120 Abs. 1 S. 3 GG eine Einschränkung für Kosten, die aufgrund einer bis zum 1. Oktober 1965 bestehenden Staatspraxis von den Ländern erbracht wurden. *Insoweit* bleibt es bei der Kostentragungspflicht der Länder.

Diese (durch die Aufnahme in Art. 120 Abs. 1 S. 3 GG fixierte) Staatspraxis sieht dabei Folgendes vor: Die Kosten für die Räumung auf bundeseigenen Liegenschaften sind vom Bund zu tragen. Zudem erstattet der Bund den Ländern Kosten für die Bergung und Vernichtung reichseigener Munition und Kampfmittel auf sonstigen, nicht bundeseigenen Flächen. Außerhalb dieser Fälle kommt es zu keiner Erstattung.¹¹

Ein im Mai 2022 vom Bundesrat eingebrachter Gesetzesentwurf zielt darauf ab, die Verantwortung für Rüstungsaltlasten gesetzlich zu regeln und den Bund dabei stärker zu beteiligen. Der Vorschlag sieht u.a. vor, dass der Bund den Ländern auch die Kosten der Räumung alliierter Munition (außerhalb bundeseigener Liegenschaften) erstattet. Die Vorlage entspricht einem Gesetzesentwurf, den der Bundesrat jeweils erfolglos bereits 2011, 2014 und 2018 eingebracht hatte.¹²

Demgegenüber richtet sich die Kostenlastverteilung zwischen Ländern und Kommunen nach der jeweiligen Landesgesetzgebung. Insbesondere scheidet eine Deutung aus, wonach Art. 120 Abs. 1 S. 1 GG auch in diesem Verhältnis eine Zuteilung der Kostenverantwortlichkeit an die Länder vornimmt. Deutlich hat insoweit etwa das VG Düsseldorf ausgeführt, dass es sich bei Art. 120 Abs. 1 GG um eine ausschließlich das *Bund-Länder-Verhältnis* regelnde finanzverfassungsrechtliche Vorschrift handele. Die Rechtsposition von Gemeinden und ihren Aufgabenträgern in Bezug auf die landesinterne Lastenverteilung werde durch Art. 120 GG nicht berührt.¹³

Die Ausgestaltungen der landesinternen Kostenverteilung variieren damit je nach Bundesland. In NRW etwa sind auf Grundlage des Runderlasses „Kostentragung in der Kampfmittelbeseitigung“ beim Fund von Kampfmitteln die Kosten für Bergung, Entschärfung, Sprengung, Abtransport und Vernichtung vom Land zu tragen (Ziffer 2.1). Kosten vor- und nachbereitender oder sonst begleitender Maßnahmen (wie z.B. Kosten für Sicherungsaufgaben und Sicherungsmaßnahmen, wie Durchführung von Absperr- und Evakuierungsmaßnahmen bei Entschärfungen und/oder Sprengungen, Aufstellung von Warnschildern, Sicherung von Baugruben; siehe Ziffer 2.3) werden hingegen nicht erstattet.¹⁴

¹¹ Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, Ausarbeitung Fragen zur Beseitigung von Luftminen, 2018, S. 6 f., abrufbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/560910/9c51a28bcf4-3dd847af1b13b7ebb7ba4/WD-3-096-18-pdf-data.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025); Gesetzesentwurf des Bundesrates bezüglich eines Rüstungsaltlastenfinanzierungsgesetzes, Drucksache 20/2614, 2022, S. 2, abrufbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/20/026/2002614.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025).

¹² Bundesrat, Meldung, „Bundesrat fordert, Rüstungsaltlasten verbindlich zu regeln“, abrufbar unter <https://www.bundesrat.de/DE/plenum/bundesrat-kompakt/22/1021/1021-pk.html?nn=4732016#top-42> (abgerufen am 27. Februar 2025); Gesetzesentwurf des Bundesrates bezüglich eines Rüstungsaltlastenfinanzierungsgesetzes, Drucksache 20/2614, 2022, abrufbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/20/026/2002614.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025).

¹³ VG Düsseldorf, Urteil vom 19. März 2015 – 6 K 7535/13 –, juris Rn. 40 ff.; Drucksache 20/2614, 2022, S. 2.

¹⁴ Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, Ausarbeitung Fragen zur Beseitigung von Luftminen, 2018, S. 8, abrufbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/560910/9c51a28bcf4-3dd847af1b13b7ebb7ba4/WD-3-096-18-pdf-data.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025) mit einer Darstellung der niedersächsischen Rechtslage in Fn. 28.

2.2. Rechtsstellung des (privaten) Grundstückseigentümers

Der private Eigentümer eines Grundstücks, auf dem sich ein Blindgänger findet, kann in vielen Fällen rechtmäßig mittels einer ordnungsbehördlichen Verfügung zur Beseitigung des Blindgängers verpflichtet werden. Die Ermächtigungsgrundlagen finden sich – gemäß der oben unter 2.1. skizzierten Zuständigkeit der Länder – im Landesrecht. Vielfach ist dabei mangels spezieller Befugnisnormen auf die Generalklauseln der Polizei- und Ordnungsgesetze zurückzugreifen.¹⁵ Die tatbestandlichen Voraussetzungen einer Inanspruchnahme auf Grundlage der Generalklauseln sind dabei in der Regel erfüllt. Gerade im Kontext von Baumaßnahmen bereitet die Begründung einer konkreten Gefahr regelmäßig keine Schwierigkeiten. Das Vorliegen einer solchen Gefahr, d.h. einer „Sachlage, die bei ungehindertem Ablauf des objektiv zu erwartenden Geschehens mit hinreichender Wahrscheinlichkeit und in überschaubarer Zukunft den Eintritt eines nicht unerheblichen Schadens für die polizeilichen Schutzgüter [...] zur Folge hat“,¹⁶ dürfte wegen des hohen Schädigungspotenzials der Blindgänger etwa in Bezug auf die körperliche Unversehrtheit (Art. 2 Abs. 2 S. 1 GG) und die Eigentumsrechte Dritter (Art. 14 Abs. 1 S. 1 GG) sowie im Hinblick auf Boden und Grundwasser (Art. 20a GG) sogar den Regelfall darstellen.

Zudem kann in vielen Fällen ohne Ermessensfehler eine Heranziehung des Grundstückseigentümers als Zustandsstörer erfolgen. Dabei kommt es – anders als beim Handlungsstörer – nicht darauf an, dass er selbst einen Verursachungsbeitrag gesetzt hat. Die Zustandsverantwortlichkeit des Grundstückseigentümers dient vielmehr grundsätzlich dem Zweck, unabhängig von der Haftung eines Verursachers effektiv Gefahrenabwehrmaßnahmen durchführen zu können. Sie findet damit in der durch die Sachherrschaft vermittelten Einwirkungsmöglichkeit auf die gefahrenverursachende Sache ihren legitimierenden Grund.¹⁷ Der in den Blick genommene Fall von durch Alliierte abgeworfene Bomben veranschaulicht gerade, dass die alternative Heranziehung des unmittelbaren Verursachers – des Piloten bzw. dessen Rechtsträgers – in der Praxis fast als ausgeschlossen angesehen werden kann und jedenfalls keineswegs effektiv möglich ist.

Der private Grundstückseigentümer profitiert bei seiner Inanspruchnahme jedoch vereinfacht von zwei Begrenzungen.¹⁸ Zum einen halten die landesrechtlichen Regelungen unterschiedliche Beschränkungen zu Gunsten der privaten Grundstückseigentümer bereit. Die Untersuchung des Wissenschaftlichen Dienstes des Bundestages zu „Fragen zur Beseitigung von Luftminen“ kommt insoweit zu dem Ergebnis, dass das Ausmaß der Beschränkungen je nach Landesrecht erheblich variere. Jedenfalls die eigentlichen Kampfmittelbeseitigungsmaßnahmen würden aber wohl übergreifend von staatlichen Stellen übernommen. Der in NRW geltende Runderlass „Kostentragung in der Kampfmittelbeseitigung“ weist hingegen z.B. Mehrkosten wie solche für die gleichzeitige Fortführung von Baumaßnahmen im Gefahrenbereich der Räummaßnahme, den Sachzwang zur Anwendung teurer Spezialverfahren und durch Nachkriegsauffüllung bedingte Kosten dem Dritten zu.¹⁹

¹⁵ Inhalt und Struktur orientieren sich an: Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, Ausarbeitung Fragen zur Beseitigung von Luftminen, 2018, S. 8 f., abrufbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/560910/9c51a28bcf4-3dd847af1b13b7ebb7ba4/WD-3-096-18-pdf-data.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025).

¹⁶ Vgl. nur VG Aachen, Beschluss vom 3. Juli 2017 – 6 L 1044/17 –, juris Rn. 11.

¹⁷ BVerfG, Beschluss vom 16. Februar 2000 – 1 BvR 242/91 –, BVerfGE 102, 1-25, juris Rn. 46.

¹⁸ Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, Ausarbeitung Fragen zur Beseitigung von Luftminen, 2018, S. 9, abrufbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/560910/9c51a28bcf4-3dd847af1b13b7ebb7ba4/WD-3-096-18-pdf-data.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025).

¹⁹ Siehe ebenfalls Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, Ausarbeitung Fragen zur Beseitigung von Luftminen, 2018, S. 9, abrufbar unter

Holländer:

Grundzüge der Kostenlastverteilung bei Kampfmittelaltlasten unter besonderer Würdigung des proaktiv tätigen Grundstückseigentümers

Zum anderen kommen dem privaten Grundstückseigentümer allgemeine Zumutbarkeitserwägungen zugute: Zwar sind dem Eigentümer auferlegte Belastungen, um eine effektive Gefahrenabwehr der von seinem Grundstück auszugehenden Gefahren zu ermöglichen, wie ausgeführt von ihm grundsätzlich hinzunehmen. Er kann aus der Sache auch seinen Nutzen ziehen. Auch dies rechtfertigt es, ihn zur Beseitigung von Gefahren, die von der Sache für die Allgemeinheit ausgehen, zu verpflichten.²⁰ Allerdings kann die Zustandsverantwortlichkeit aus Gründen der Verhältnismäßigkeit nicht grenzenlos sein. Als Anhaltspunkt (und damit explizit nicht als starre Regel) für die Bestimmung der Grenzen dessen, was dem Eigentümer zugemutet werden darf, kommt der Verkehrswert des Grundstücks nach Durchführung der entsprechenden Maßnahmen in Betracht. Wird der Verkehrswert von den Kosten überschritten, entfällt in der Regel das Interesse des Eigentümers an einem künftigen privatnützigen Gebrauch des Grundstücks.²¹ Praktisch dürfte diese aus dem Verfassungsrecht entnommene Begrenzung vor allem dort Relevanz entfalten, wo die jeweilige landesrechtliche Regelung keine Freistellung des privaten Grundstückseigentümers vorsieht.

3 Proaktives Tätigwerden

Für den privaten Grundstückseigentümer, auf dessen Grundstück sich ein Blindgänger befindet, kann sich allerdings nicht nur die Situation ergeben, dass er sich einer ordnungsbehördlichen Verfügung ausgesetzt sieht, mit der er zur Durchführung von verschiedenen Räummaßnahmen verpflichtet wird. In Fällen, in denen er beispielsweise Baumaßnahmen ausführen lässt und an einem schnellen Baufortschritt interessiert ist, könnte er geneigt sein, z.B. Beseitigungsmaßnahmen ohne entsprechende an ihn gerichtete Anordnung durchführen zu lassen.

Welches Vorgehen einem Grundstückseigentümer in einer solchen Situation bei isolierter Betrachtung der Kostenfolge zu empfehlen wäre, hängt von den konkreten Umständen des Einzelfalles ab. Die Rechtslage kann sich dabei je nach dem Bundesland, in dem sich das Grundstück befindet, unterscheiden. In Auseinandersetzung mit einer – nicht zu Blindgängern, sondern zu chemischen Kampfstoffen ergangenen – Entscheidung des Verwaltungsgerichts Berlin²² lassen sich dabei Erwägungen gewinnen, die im Rahmen einer Folgenabschätzung des Eigentümers zu berücksichtigen wären.

Der Entscheidung liegt folgender Sachverhalt zu Grunde: Die Klägerin ist Eigentümerin von Grundstücken, welche sie kaufte, um dort Wohnhäuser zu errichten. Im Rahmen von Bauarbeiten stellte sich heraus, dass der Boden mit chemischen Kampfstoffen kontaminiert war. Diese sind auf Tätigkeiten der Q zurückzuführen, welche mit dem Reichsfiskus (Heer) 1939 einen Kooperationsvertrag hinsichtlich der Erforschung und Entwicklung chemischer Kampfstoffe abgeschlossen hatte. Das LKA lehnte eine (weitere) Erkundung, Verpackung und Entsorgung dieser Kampfstoffe ab. Die Klägerin gab daraufhin selbst alle dafür notwendigen Arbeiten in Auftrag. Die Klägerin forderte die Beigeladene (wohl den Bund bzw. eine Bundesbehörde), sodann den Beklagten (wohl das Land bzw. eine Landesbehörde) zur Kostenübernahme auf, die diese jeweils ablehnten. Die Klägerin erhob daraufhin Klage und macht gegen den Beklagten Kosten für den Transport und die Entsorgung geltend.

<https://www.bundestag.de/resource/blob/560910/9c51a28bcf4-3dd847af1b13b7ebb7ba4/WD-3-096-18-pdf-data.pdf> (abgerufen am 27. Februar 2025).

²⁰ BVerfG, Beschluss vom 16. Februar 2000 – 1 BvR 242/91 –, BVerfGE 102, 1-25, juris Rn. 46.

²¹ Näher BVerfG, Beschluss vom 16. Februar 2000 – 1 BvR 242/91 –, BVerfGE 102, 1-25, juris Rn. 56 ff.

²² VG Berlin, Urteil v. 30. November 2023 – VG 1 K 444/21.

Das Gericht wies die Klage als unbegründet ab. Dabei versagte das Gericht einen Anspruch aus öffentlich-rechtlicher Geschäftsführung ohne Auftrag. Es fehle insoweit an einer Geschäftsführung der Klägerin für den Beklagten. In diesem Kontext prüfte das Gericht unter verschiedensten Anknüpfungspunkten, ob eine primäre Verantwortlichkeit des Beklagten für die vorgenommenen Transport- und Entsorgungstätigkeiten vorgelegen habe – und verneinte dies jeweils: Der Beklagte sei zwar zuständig, Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung abzuwehren. Allerdings seien Polizei und Ordnungsbehörden grundsätzlich nur verpflichtet tätig zu werden, wenn der Störer die Gefahr nicht bereits selbst beseitige. Hingegen sei die Klägerin sowohl Handlungs- als auch Zustandsstörerin.²³ Auch folge keine primäre Verantwortung des Beklagten aus einer speziellen Rechtsgrundlage. In diesem Zusammenhang ließ das Gericht explizit offen, ob eine solche Verpflichtung insb. zur Beseitigung aus der Kampfmittelverordnung Berlin folgen könne. Deren Anwendungsbereich hielt das Gericht für nicht eröffnet, da es sich bei den in Rede stehenden Chemikalien zwar um Kampfstoffe, nicht aber um Kampfmittel handle. Weiter führte das Gericht an, dass sich keine primäre Verpflichtung der Beklagten daraus ergebe, dass der Beklagte *in anderen Fällen* für von ihm, dem Beklagten, vorgenommene Entsorgungen von Kampfmitteln keine Erstattungsansprüche gegen die jeweiligen Grundstückseigentümer geltend mache. Es ergebe sich also kein Anspruch aus einer entsprechende Staatspraxis in Verbindung mit dem Gleichheitsgebot aus Art. 3 Abs. 1 GG. Auch beschäftigte sich das Gericht mit dem oben unter 2.1 genannten Art. 120 Abs. 1 GG. Es bekräftigte insoweit, dass es sich um eine Regelung handle, die als unmittelbare Anspruchsgrundlage allein zwischen Bund und Ländern Wirkungen entfalte. Ansprüche Dritter gegen die öffentliche Hand würden hierdurch nicht begründet. Letztlich lehnt das Gericht einen Anspruch auf Grundlage eines öffentlich-rechtlichen Erstattungsanspruchs ab. Denn der Beklagte sei weder durch die vorgenommenen Tätigkeiten noch durch die Kostenübernahme der Klägerin bereichert.

Wie ausgeführt, hat das Gericht damit explizit offengelassen, ob sich etwas anderes ergeben würde, wenn der Anwendungsbereich der Kampfmittelverordnung Berlin eröffnet wäre. Damit verhält es sich nicht zu dem Fall, in dem ein Grundstückseigentümer proaktiv – ohne vorherige Anordnung der zuständigen Behörden – Beseitigungsmaßnahmen in Bezug auf Blindgänger durchführt und sodann eine Kostenübernahme verlangt. Mit Blick auf § 5 Abs. 3 Kampfmittelverordnung Berlin ließe sich insoweit argumentieren, dass nur für die Bergung eine Verantwortlichkeit des Eigentümers bestehe. Die Durchführung von Beseitigungsmaßnahmen ließe sich in diesem Sinne als Geschäftsführung für das Land Berlin einordnen, deren Kosten zu erstatten wären. Gleichwohl: Spezielle Kostenerstattungsregelungen für entsprechende Fälle bestehen soweit ersichtlich nicht. Der proaktive private Grundstückseigentümer kann insbesondere nicht darauf vertrauen, dass er bei einer späteren Geltendmachung der Kosten gegenüber der öffentlichen Hand automatisch im selben Maße von jenen Begrenzungen profitiert, die ihm zugutekämen, wenn er auf Grundlage einer an ihn gerichteten ordnungsrechtlichen Verfügung tätig würde (siehe zu diesen Begrenzungen oben 2.2).

Wenngleich dies stets auf Grundlage der jeweiligen landesspezifischen Regelungen zu beurteilen wäre, so lässt sich bei isoliertem Blick auf die rechtliche Kostenverteilung doch vorsichtig festhalten: Dem privaten Grundstückseigentümer müsste vielfach von einem vorschnellen Tätigwerden auf eigene Kosten in der Hoffnung oder in dem Glauben auf eine spätere Übernahme abgeraten werden. Das ist misslich, weil in vielen Fällen ein Interesse der Allgemeinheit an einem schnellen Baufortschritt besteht. Auch ein Abwarten auf eine ordnungsbehördliche Verfügung wäre hier nicht interessengerecht. Wünschenswert wären hier klare Kostenerstattungsregeln. Wo es diese (noch) nicht gibt, kann ein kooperatives

²³ Die Rolle als Handlungsstörerin wurde dabei damit begründet, dass die durch die Klägerin in Auftrag gegebenen Bauarbeiten die Gesundheitsgefahren erhöht hätten (Rn. 28).

Holländer:

Grundzüge der Kostenlastverteilung bei Kampfmittelaltlasten unter besonderer Würdigung des proaktiv tätigen Grundstückseigentümers

Vorgehen zwischen dem Grundstückseigentümer und der zuständigen Behörde, ggf. unter Einbeziehung von Kostenübernahmeerklärungen durch die Behörde, zu sachgerechten Lösungen führen.

4 Gesamtschau

Die Kostenlastverteilung für Kampfmittelaltlasten im Verhältnis zwischen Bund und Ländern richtet sich gem. Art. 120 Abs. 1 S. 3 GG nach einer bis zum 1. Oktober 1965 bestehenden (und durch die Regelung des Art. 120 Abs. 1 S. 3 GG fixierten) Staatspraxis. Die Kostenverteilung zwischen Ländern und Kommunen richtet sich nach dem jeweiligen Landesrecht und variiert teilweise. Damit wird ein Schlaglicht auf die durch den Föderalismus bedingte Fragmentierung des Kampfmittelrechts geworfen, die auch hinsichtlich der Rechtsstellung des privaten Grundstückseigentümers anzutreffen ist. Dieser kann als Zustandsstörer regelmäßig rechtmäßig zu Beseitigungsmaßnahmen herangezogen werden, wobei ihm hinsichtlich der Kosten vor allem landesrechtliche Begrenzungen zugutekommen. Die Kosten der genuinen Beseitigungsmaßnahmen werden ihm dabei wohl übergreifend erstattet. Außerhalb davon können sich allerdings Unterschiede je nach Bundesland ergeben. Eine Beschäftigung mit einer jüngeren verwaltungsgerichtlichen Entscheidung zu Kampfstoffen legt nahe, dass dem privaten Grundstückseigentümer jedenfalls mit isoliertem Blick auf die Kostenfolge von einem vorschnellen Tätigwerden auf eigene Kosten in der Hoffnung oder in dem Glauben auf eine spätere Übernahme abgeraten werden müsste. Auch im Sinne eines schnellen Baufortschritts wären hier klare Kostenerstattungsregelungen wünschenswert, die überdies in den Ländern einheitlich ausfallen sollten. Wo diese fehlen, kommt es im besonderen Maße auf die Behörden an – sachgerechte Lösungen können dabei ggf. durch ein kooperatives Vorgehen zwischen Behörden und den privaten Eigentümern erzielt werden.

Anschrift:

Dr. Felix Holländer
Franßen & Nusser Rechtsanwälte
Fasanenstraße 73
10719 Berlin
+49 30 166 38 12 - 20
hollaender@fn.legal
<https://fn.legal/de/>



Erkunden · Sanieren · Überwachen · Dokumentieren

Nutzen Sie unser Know-how ...

... bei der Erkundung und Sanierung von Grundwasserschäden und Altlasten:

- Umgang mit bekannten und neuen Schadstoffen (PFAS, Mikrokunststoffe, organische Spurenstoffe etc.)
- Maßgeschneiderte Monitoringkonzepte und Messtechnik
- Beratung zum Datenmanagement

Sprechen Sie uns an!

Ihre Ansprechpartner

Dipl.-Geol. Tina Neef

Dr. Uwe Boester M.Sc.

Dipl.-Geol. Axel Meßling

ahu GmbH Wasser · Boden · Geomatik

Kirberichshofer Weg 6

52066 Aachen

Tel. +49 (0)241 900011-0

info@ahu.de · www.ahu.de



ahu

Abstracts

Erkundungspraxis

Moderation: Dr. Karsten Menschner, CDM Smith SE, Leipzig

4.

**Massenspektrometrie basierte hochauflösende vor-Ort-MIP
Charakterisierungstechnologie mit kontinuierlicher Echtzeitüberwachung
einzelner Schadstoffarten – Erfahrungen nach einem Jahr Anwendung von Fugro
MIP-OMS**

Dr. Eugen Martac, Fugro Germany Land GmbH, Berlin

5.

**Bewertung des biologischen Schadstoffabbaus und seiner Stimulierbarkeit an
einem großflächig kontaminierten Standort anhand der Kombination
innovativer Überwachungsmethoden**

Dr. Annika Beckmann, HPC AG, Merseburg

6.

Kampfmittelräumung Dethlinger Teich - Vorbereitungen und Stand der Arbeiten

Charlotte Goletz, Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und
Klimaschutz, Hannover

Christian Poggendorf, BIG Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover

Massenspektrometrie basierte hochauflösende vor-Ort-MIP- Charakterisierungstechnologie mit kontinuierlicher Echtzeitüberwachung einzelner Schadstoffarten – Erfahrungen nach einem Jahr Anwendung von Fugro MIP-OMS

Eugen Martac, Fugro Germany Land GmbH, Berlin

Hintergrund

Risikobewertungen und Sanierungsstudien erfordern detaillierte Kenntnisse der lithologischen und hydraulischen Untergrundstrukturen sowie der räumlichen Verteilung von Schadstoffen in Quell- und Fahnenbereichen.

Methoden/Aktivitäten

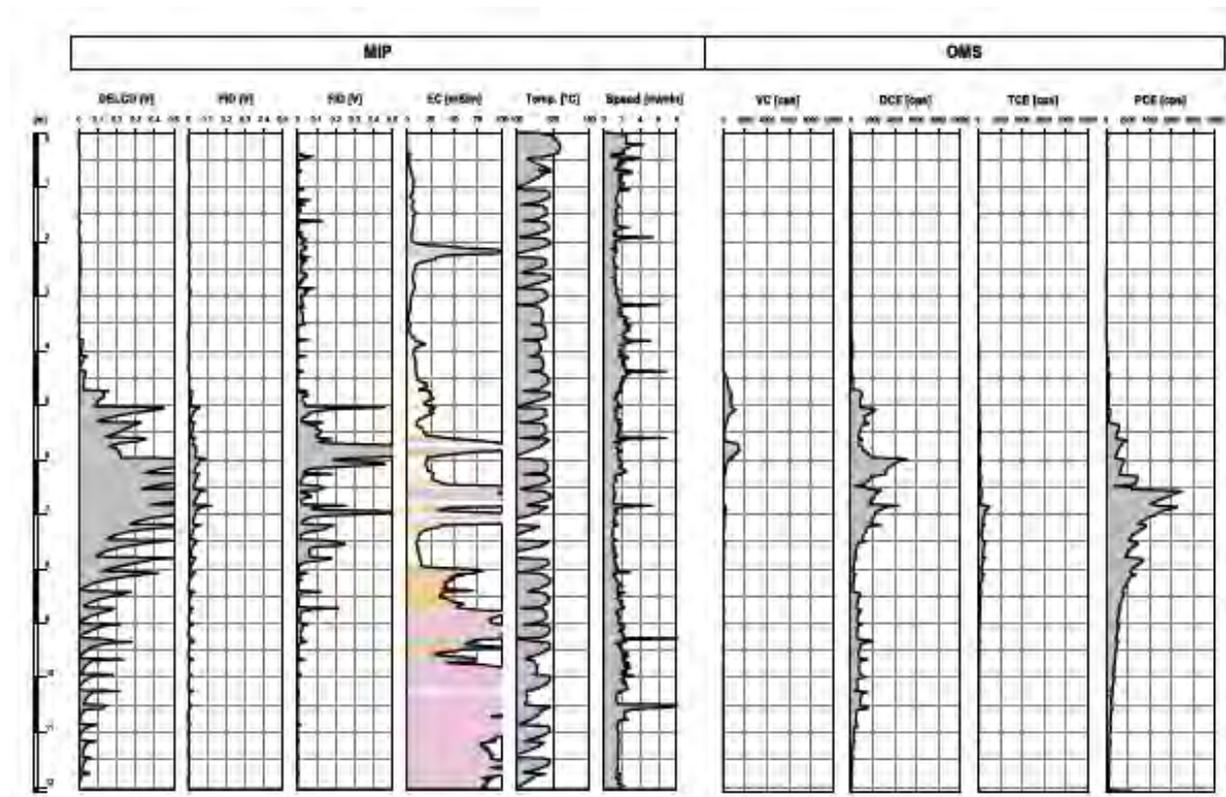
Die Membrane Interphase Probe (MIP)-Technologie ermöglicht die hochauflösende Erkennung flüchtiger organischer Verunreinigungen (VOCs) entlang eines kontinuierlichen Tiefenprofils. Die Kopplung von MIP mit einem On-Site Massen Spektrometer (OMS) stellt einen innovativen Fortschritt dar, der eine hohe Auflösung (1 cm in der Vertikalen) und eine schnelle (bei Beibehaltung der Standard-MIP-Geschwindigkeit von etwa 2 cm/s) *in situ* Analyse einzelner Verbindungen (z. B. PCE, TCE, DCE, VC) ermöglicht. Vergleiche mit den Ergebnissen konventioneller Boden- und Grundwasserproben bestätigen die Ergebnisse.



Durchführung einer hochauflösenden Standortcharakterisierung als solide Basis zur Klärung der räumlichen und funktionalen Zusammenhänge im Quellen- und Fahnenbereich zur Erstellung zuverlässiger 3D Standortmodelle in Bezug auf Lithologie, Hydraulik und Kontamination

Ergebnisse

Neben den typischen MIP-Signalen erwies sich die Möglichkeit, einzelne Verbindungen zu identifizieren und ihre Konzentrationen (mit Nachweisgrenzen bis in den ppb Bereich) in hoher vertikaler Auflösung zu liefern, als schnelle, zuverlässige und kostengünstige Feldmethode zum Screening. Die Identifizierung der Verbindungen basiert auf Referenzmassenspektren, was ebenfalls die Suche nach unbekanntem flüchtigen organischen Verunreinigungen ermöglicht. Die häufigsten VOCs, wie chlorierte Kohlenwasserstoffe und BTEX, können mit einem Standardanalyselauf gut unterschieden werden. Für spezifische Aufgabenstellungen (z.B. bromierte Kohlenwasserstoffe, Tetrahydrofuran) können angepasste Analyseschemata eingesetzt werden.

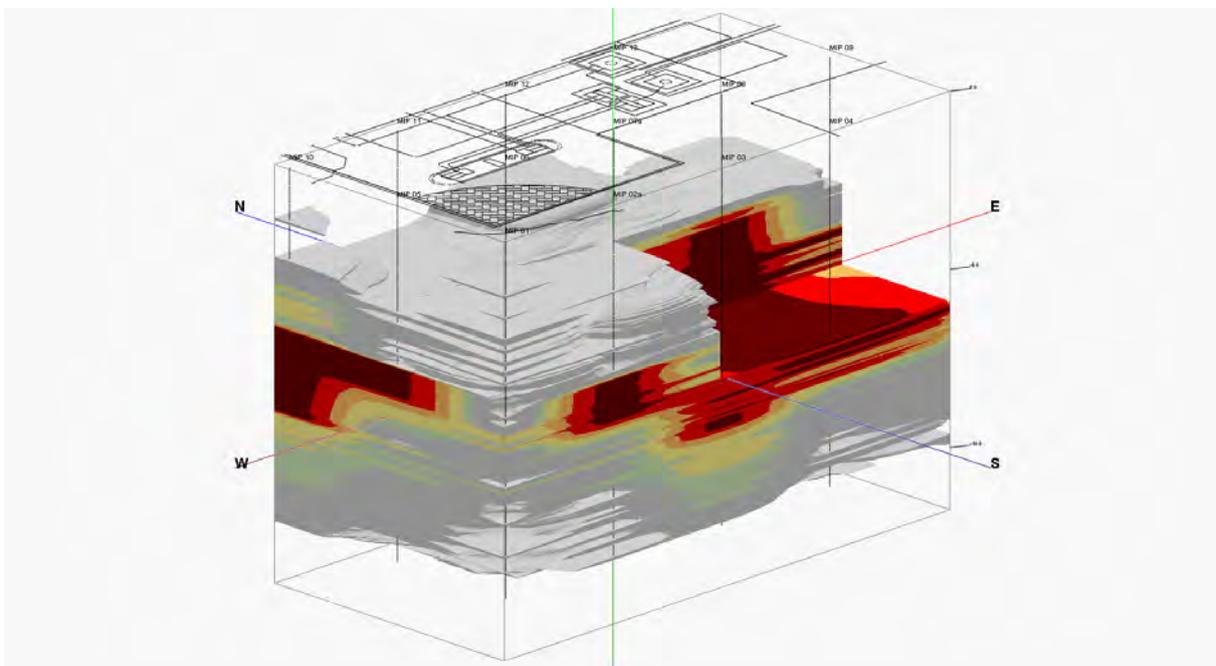


Ergebnisse einer auf Massenspektrometrie basierenden hochauflösenden vor-Ort MIP-OMS Charakterisierung mit kontinuierlicher Echtzeitüberwachung einzelner Schadstoffarten

Fazit: Anwendungsgebiete und Vorteile

Diese Weiterentwicklung der Untersuchungsmethode verdeutlicht die Nützlichkeit zuverlässiger Erstuntersuchungsmethoden für eine effektive Standortuntersuchung. Die groß angelegte Anwendung des geringinvasiven Erstscreensings kann bei der

Steuerung und Fokussierung der nachfolgenden, teureren Methoden der Boden- und Grundwasserprobenahme hilfreich sein. Darüber hinaus liefert es einen erheblichen Mehrwert für eine erfolgsversprechende Gestaltung von Sanierungsstrategien und verkürzt die gesamte Entscheidungskette mit den damit verbundenen Budgeteinsparungen.



Erstellung zuverlässiger 3D Standortmodelle in Bezug auf Lithologie, Hydraulik und Kontamination als solide Basis zur Planung erfolgsversprechender Sanierungsszenarien

Vorteile gegenüber herkömmlicher Untersuchungsmethoden:

- deutliche Senkung der Nachweisgrenzen für alle MIP-nachweisbaren VOCs (z.B. unter 10 ppb für CHC und BTEX)
- dramatische Ausweitung der MIP-Anwendbarkeit auf Fahnenränder bzw. gering kontaminierte Gebiete
- korrekte Tiefenzuordnung für einzelne Schadstoffe an Standorten mit komplexer Kontamination
- Identifizierung von Abbauprodukten und Überprüfung des natürlichen Abbaus
- Bestimmung von VOCs, die mit einem Standard-MIP-System schwer zu erkennen sind, wie bromierte Kohlenwasserstoffe, MTBE oder Tetrahydrofuran (THF)
- erhebliche Kosteneinsparungen und Mehrwert durch Echtzeitentscheidungen vor Ort

Dr. Eugen Martac, Fugro Germany Land GmbH

T +49 (0)7473 95 138-02 | M +49 (0)176 100 159 74 | E e.martac@fugro.com | W fugro.com

A Wolfener Straße 36U, 12681 Berlin, Germany

Bewertung des biologischen Schadstoffabbaus und seiner Stimulierbarkeit an einem großflächig kontaminierten Standort anhand der Kombination innovativer Überwachungsmethoden

Annika Beckmann, Kevin Kuntze und Anko Fischer

1 Einleitung

Bei der nachhaltigen Sanierung von kontaminierten Standorten geht es immer darum, die ökologisch, wirtschaftlich und technisch optimale Strategie zu finden. Solche Sanierungsstrategien sollten den Einsatz natürlicher oder stimulierter Schadstoffabbauprozesse mit einbeziehen. Deren Integration in das konzeptionelle Standortmodell (CSM) muss jedoch sorgfältig geprüft werden. Wenn der natürliche Abbau von Schadstoffen nachgewiesen werden kann, sind möglicherweise kostengünstige und nachhaltige Sanierungsoptionen möglich. Die Charakterisierung und Quantifizierung von natürlichen Abbauprozessen ist daher ein wichtiger Bestandteil von Sanierungsuntersuchungen.

Entscheidungen zur Implementierung der *In-situ*-Biosanierung an kontaminierten Standorten erfordern eine umfassende Charakterisierung der biologischen Abbauprozesse. In unserem Vortrag erläutern wir die kombinierte Anwendung innovativer Überwachungsmethoden, um den biologischen Abbau von Phenol, Alkylphenolen, PAK sowie BTEX in einem Grundwasserleiter nachzuweisen als auch zu quantifizieren (Stabilisotopenanalyse, CSIA; *In-situ*-Mikrokosmen mit isotopisch markierten Verbindungen, BACTRAP®; Metabolitenanalysen; Labormikrokosmenstudie). Mit Hilfe dieses Mehrmethodenansatzes konnten aussagekräftige Parameter für den natürlichen Schadstoffabbau an einem großflächig kontaminierten Standort bestimmt werden (z. B. Mineralisierungsraten, *In-situ*-Abbaugeschwindigkeitskonstanten, Abbaupotenzial). Anhand der gewonnenen Daten konnte gezeigt werden, dass der integrative Ansatz basierend auf der Kombination innovativer Überwachungsmethoden eine solide Grundlage für die Bewertung des *In-situ*-Schadstoffabbaus und für die Auswahl geeigneter Biostimulationsmaßnahmen bietet.

2 Praxisbeispiel von innovativen Überwachungsmethoden an einem großflächig kontaminierten Standort

Beim untersuchten Standort handelt es sich um einen ehemaligen Industriestandort mit komplexen hydrogeologischen Verhältnissen, an dem eine tiefreichende (bis in 60 m Tiefe) Grundwasserverunreinigung durch MKW, PAK, Phenole und BTEX vorliegt. Dabei wurden mehrere Grundwasserleiter geschädigt. Am Standort findet seit den 90er Jahren eine komplexe Grundwasser-Sanierung über Grundwasseraufbereitungsanlage und *In-situ*-Sanierung durch Infiltration von gereinigtem, mit Elektronenakzeptoren angereichertem Wasser statt. Für den Standort erfolgte der Aufbau und die Pflege eines Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodells zur Begleitung der laufenden Grundwassersanierung. Im Rahmen eines schrittweisen Übergangs zu MNA-Maßnahmen wurden Untersuchungen zum mikrobiologischen Abbau durchgeführt.

3 Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungsmethoden

3.1 Metabolitenanalyse

Am mit MKW, PAK, Phenolen und BTEX kontaminierten Standort wurde eine Metabolitenanalyse durchgeführt. Als spezifische Metaboliten des aeroben und anaeroben BTEX-, Phenol- und PAK-Abbaus wurden verschiedene aromatische Säuren und Alkohole untersucht. Durch die Metabolitenanalyse wurden spezifische Metaboliten des mikrobiellen Abbaus von PAK, Phenol und BTEX identifiziert. Im Bereich des westlichen Schadenszentrums am Standort wurden der mikrobielle BTEX-, Phenol- und Naphthalin-Abbau durch Detektion von Benzoesäure, Methylbenzoesäure, Hydroxybenzoesäure und Naphthoesäure nachgewiesen. Weiterhin konnte der mikrobielle BTEX-Abbau im Bereich des fernerer Abstromes dieses Schadenszentrums belegt werden. Keine Indizien für einen mikrobiellen Abbau von BTEX, Phenol und PAK auf Grundlage des Metabolitenmonitorings liegen im unmittelbaren Abstrom dieses Schadenszentrums vor. Aufgrund der meist sauerstofffreien Bedingungen in der Schadstofffahne sowie der Detektion von spezifischen Metaboliten anaerober Stoffwechselprozesse ist von einem überwiegenden Schadstoffabbau unter anoxischen Verhältnissen auszugehen.

3.2 BACTRAP®-Untersuchung

Zum direkten Nachweis des mikrobiellen *In-situ*-Phenol-Abbaus wurden BACTRAP® mit [¹³C₆]-Phenol (isotopische Reinheit: ≥ 99atom%) beladen, um dessen Mineralisierung anhand des Einbaus von ¹³C-Kohlenstoff in die Biomasse zu ermitteln (**Abbildung 1**). Die BACTRAP® wurden in Messstellen jeweils im westlichen Schadenszentrum, im unmittelbaren sowie fernerer Abstrombereich eingebaut. Als spezifische Zellkomponenten der Mikroorganismen wurden Aminosäuren untersucht, welche die Grundbausteine von Proteinen sind. Ein signifikanter mikrobieller Abbau von Phenol konnte in allen untersuchten Messstellen nachgewiesen werden. Für den unmittelbaren und fernerer Abstrombereich betragen die Gesamtgehalte an ¹³C-Kohlenstoff in den Aminosäuren 836 µg ¹³C_{AS/BACTRAP®} bzw. 623 µg ¹³C_{AS/BACTRAP®} und waren 2,4- bzw. 1,8-fach höher als der ¹³C-Kohlenstoffgehalt im Schadenszentrum. Demnach scheint im abstromigen Bereich der Schadstoffquelle eine höhere mikrobielle Umsetzung von Phenol als im Quellbereich stattzufinden.

3.3 Komponenten-spezifische Kohlenstoffisotopenuntersuchungen

Anhand der komponenten-spezifischen Analyse von stabilen Kohlenstoffisotopen (CSIA) kann der *In-situ*-Abbau beispielsweise von LCKW, BTEX und Naphthalin nachgewiesen und quantifiziert werden [2,3]. Isotope eines Elementes besitzen die gleiche Anzahl an Protonen, aber unterscheiden sich in der Anzahl der Neutronen, weshalb sie unterschiedliche Massen besitzen. Kohlenstoff besitzt zwei stabile Isotope, eines mit der Masse 12 (¹²C) und eines mit der Masse 13 (¹³C). Der relative Unterschied von schweren zu leichten Isotopen eines Elementes wird als Isotopenverhältnis oder -signatur bezeichnet (z.B. ¹³C/¹²C) und im Allgemeinen als delta-Notation (δ ‰) angegeben. Infolge des biologischen Abbaus verändert sich das ursprüngliche Isotopenverhältnis (primäre Isotopensignatur) eines Schadstoffs, weil Mikroorganismen die Moleküle mit leichten Isotopen (¹²C) schneller verwerten. Folglich kommt es während der biologischen Umsetzung zu einer Anreicherung von schweren Isotopen (¹³C) beim noch nicht abgebauten Schadstoff (**Abbildung 2**). Dieser Prozess wird als Isotopenfraktionierung bezeichnet.

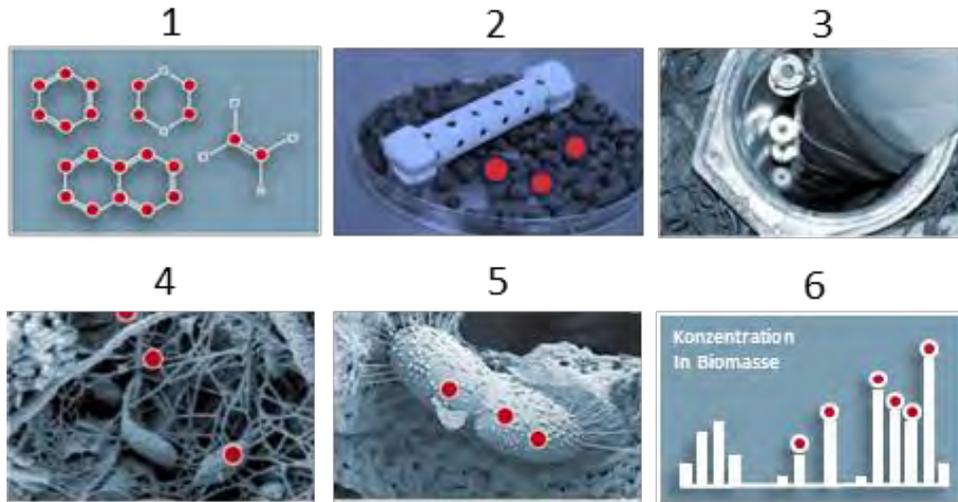


Abb. 1: Übersicht einer BACTRAP-Untersuchung. Nach Auswahl einer ^{13}C -markierten Zielverbindung (1) werden die BACTRAPs beladen (2) und im Grundwasserleiter eingebaut (3). Wenn Schadstoff abbauende Mikroorganismen am Standort aktiv sind, bauen sie den ^{13}C -Kohlenstoff in ihre Biomasse ein (4, 5). Nach Entnahme der BACTRAPs werden Biomoleküle der Mikroorganismen extrahiert und deren ^{13}C -Gehalt ermittelt. Der signifikante ^{13}C -Einbau in den Biomolekülen belegt den *In-situ*-Abbau der ^{13}C -markierten Zielsubstanz (6).

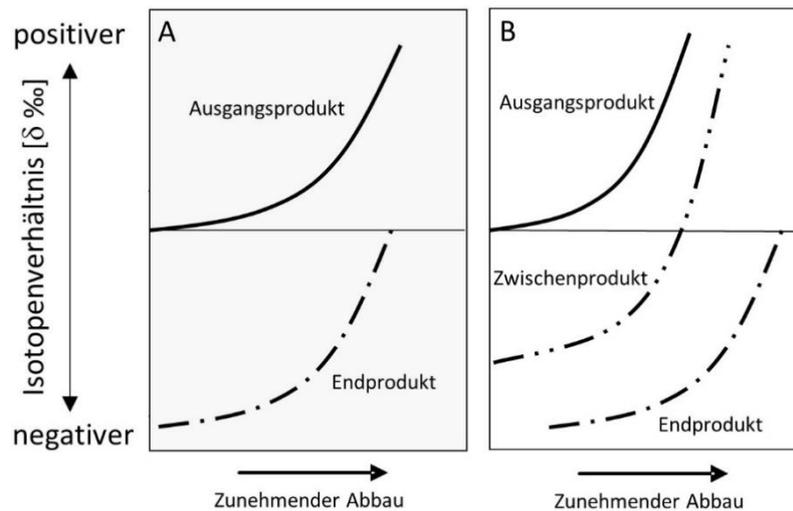


Abb. 2: Schematische Darstellung der Entwicklung der Isotopensignaturen von Primärsubstrat (Ausgangsprodukt) und Abbauprodukt (End- bzw. Zwischenprodukt) während der mikrobiellen Umsetzung. A: Das Abbauprodukt akkumuliert zum Endprodukt. B: Das Abbauprodukt wird seinerseits weiter zu einem Endprodukt abgebaut.

Am Untersuchungsstandort wurde eine komponenten-spezifische Analyse von stabilen Kohlenstoffisotopen (CSIA) durchgeführt, um den *In-situ*-Abbau von BTEX nachzuweisen und zu quantifizieren.

Im Abstrom des Haupteintragsbereiches wurde anhand der Isotopenuntersuchung ein mikrobieller *m/p*-Xylolabbau nachgewiesen. Starke Indizien wurden zudem für den mikrobiellen Abbau von Benzol ermittelt. Für Benzol und *m/p*-Xylol wurden auf Grundlage der erhobenen Isotopendaten *In-situ*-Abbauratenkonstanten ermittelt.

In 2024 fand zudem eine erneute Isotopenuntersuchung im Haupteintragsbereich des Standortes statt, um den Schadstoffabbau im weiteren Abstrombereich (Abstromprofile) zu überprüfen und die MNA Maßnahme zu validieren. Im Rahmen der Untersuchung von 2024 wurde an einzelnen Messstellen im Haupteintragsbereich des Standortes ein Abbau von Toluol, Ethylbenzol, o-Xylol und Naphthalin nachgewiesen bzw. starke Indizien für einen Abbau gefunden. Der Abbau von Benzol und m/p-Xylol scheint im Vergleich zum Abstrom des Haupteintragsbereiches eingeschränkt zu sein. Es ist zu vermuten, dass in diesen Bereichen womöglich unterschiedliche Milieubedingungen vorliegen bzw. ein unterschiedliches intrinsisches mikrobielles Abbaupotenzial vorliegt.

3.4 Labormikrokosmenstudie

Zur Ermittlung des Potenzials für den anaeroben und durch Sauerstoff (O₂) stimulierbaren Schadstoffabbau im Bereich des ferneren Abstrombereichs wurde ein klassischer Labormikrokosmenansatz gewählt, bei welchem der Nachweis der Biodegradation anhand der Bestimmung der Konzentrationsabnahme über die Zeit erfolgt. Regelmäßig wurden die Gehalte von am Standort detektierten Schadstoffen (Di-n-Butylether, alkyliertem Tetrahydropyran, Alkylphenolen, BTEX, Naphthalin, Acenaphthen) sowie der Phenolindex und Redoxindikatoren bestimmt. Sterilkontrollen dienten dazu, abiotische, nicht-abbaubedingte Prozesse der Schadstoffe zu ermitteln. Der anaerobe Abbau von Phenol im Bereich des Schadenszentrums wurde in Labormikrokosmen, welche mit ¹³C-markiertem Phenol aufdotiert wurden, bestimmt. Die Umsetzung des ¹³C-Phenols wurde durch die Bestimmung von ¹³CO₂ erfasst. Diese Methodik erlaubt eine deutlich sensitivere Erfassung des mikrobiellen Schadstoffabbaus gegenüber der Ermittlung der Schadstoffkonzentrationsabnahme. Aufgrund des direkten Zusammenhangs zwischen der Umsetzung des ¹³C-markierten Phenols und der Freisetzung von ¹³CO₂ wurde anschließend die Mineralisierung, d.h. der vollständige Phenolabbau, quantitativ bestimmt.

In den anoxischen Lebendmikrokosmen, welche die hydrochemischen Milieubedingungen des Standorts widerspiegeln, wurde im Vergleich zu den Kontrollansätzen keine mikrobielle Umsetzung von Benzol, Toluol, Ethylbenzol, m-/p-Xylol oder o-Xylol während der 150-tägigen Inkubation beobachtet. Die BTEX-Konzentrationen blieben im Verlauf der Inkubation konstant. Die Aerobisierung der Labormikrokosmen führte zur Stimulation des mikrobiellen BTEX-Abbaus. Folglich waren in den Grundwasserproben Mikroorganismen enthalten, die BTEX aerob abbauen können. Anhand der Kontrollansätze konnten abiotische, nicht-abbaubedingte Prozesse für die Konzentrationsabnahme der Analyten ausgeschlossen werden.

Naphthalin und Acenaphthen lagen in geringen Konzentrationen im Bereich von 1 µg/l bzw. 0,2 µg/l vor. Weder für Naphthalin noch für Acenaphthen zeigte sich in den anoxischen Ansätzen ein signifikant von den Sterilkontrollen unterschiedlicher Rückgang der Konzentrationen. Das Potenzial zum anaeroben Abbau von Naphthalin und Acenaphthen konnte dementsprechend nicht aufgezeigt werden. Die Sauerstoffzugabe führte zu einer schnellen Umsetzung von Naphthalin und Acenaphthen.

In den anoxischen Ansätzen wurde Phenol innerhalb von 30 Tagen Inkubation vollständig abgebaut. Weiterhin wurde ein anaerober Abbau von Methylphenolen verzeichnet. Hinweise liegen ebenfalls für den mikrobiellen Abbau von 2,4-Dimethylphenol, 3,5-Dimethylphenol und 3,4-Dimethylphenol vor. Keine mikrobielle Umsetzung war für 2,6-Dimethylphenol, 2,5-Dimethylphenol, 2,3-Dimethylphenol sowie die Trimethylphenole zu beobachten. Die Zugabe von Sauerstoff führte zu einer schnellen Umsetzung sowohl von Phenol wie auch aller Alkylphenole.

Di-n-Butylether zeigte anfänglich Konzentrationen von etwa 400 µg/l. In den anoxischen Ansätzen wurde im Vergleich zu den Kontrollen keine signifikante Abnahme der Di-n-Butylether-Konzentration während der 150-tägigen Inkubation beobachtet. In den aeroben

Ansätzen sank die Di-n-Butylether-Konzentration nach kurzer lag-Phase innerhalb von 36 Tagen Inkubation unterhalb der Bestimmungsgrenze von $<0,5 \mu\text{g/l}$ und zeigt, dass am Standort Mikroorganismen vorhanden sind, welche Di-n-Butylether aerob abbauen können.

Für Schadstoffe, welche gegenüber den Sterilkontrollen eine signifikante Abnahme im Verlauf der Inkubation zeigten, wurden mikrobielle Abbauratenkonstanten 1. Ordnung berechnet.

4 Zusammenfassung

Durch einen aufeinander abgestimmten Mehrmethodenansatz von innovativen Laboruntersuchungen am Standort konnten Synergieeffekte einzelner Methoden bestmöglich genutzt und eine wechselseitige Validierung von Untersuchungsergebnissen (*multiple lines of evidence*) ermöglicht werden. Mit Hilfe des Mehrmethodenansatzes konnte am Standort gezeigt werden, dass der natürliche biologische Abbau ein wesentlicher Bestandteil einer nachhaltigen Sanierungsstrategie ist. Unter anderem durch den Nachweis von natürlichem Abbau von Schadstoffen konnte ein Übergang von einer langjährigen, kosten- und energieintensiven Pump & Treat Sanierung zu einer nachhaltigen MNA Maßnahme erfolgen.

Literaturverzeichnis

[1] **Bahr, A.; Fischer, A.; Vogt, C.; Bombach P. (2015)** Evidence of polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation in a contaminated aquifer by combined application of in situ and laboratory microcosms using ^{13}C -labelled target compounds. *Water Res.* 69: 100-109

[2] **Eisenmann H. und Fischer A. (2018a)**. Natural Attenuation: Monitoringverfahren und Sanierungskonzepte – ein Fortschrittsbericht (Teil 1). *Altlasten Spektrum*, 2/2018, 45-58.

[3] **Eisenmann H. und Fischer A. (2018b)**. Natural Attenuation: Monitoringverfahren und Sanierungskonzepte – ein Fortschrittsbericht (Teil 2). *Altlasten Spektrum*, 3/2018, 85-95.

Anschriften der Autorinnen/Autoren

Dr. Annika Beckmann
HPC AG, Niederlassung Merseburg
Am Stadtweg 8,
06217 Merseburg
Telefon: 0049 177 5518760
E-Mail: annika.beckmann@hpc.ag
Internet: www.hpc.ag

Dr. Kevin Kuntze
Isodetect GmbH
Deutscher Platz 5b
04103 Leipzig
Telefon: 0049 176 45718438
E-Mail: kuntze@isodetect.de
Internet: www.isodetect.de

Kampfmittelräumung Dethlinger Teich - Vorbereitungen und Stand der Arbeiten

Charlotte Goletz und Christian Poggendorf

1 Einführung

Der Dethlinger Teich im Südosten der Stadt Munster, Landkreis Heidekreis, in Niedersachsen war eine ehemalige Kieselgur-Abbaugrube, in die in der Endphase des Zweiten Weltkriegs große Mengen an Munition, vor allem auch an Kampfstoffmunition und Kampfstoffen aus der nahegelegenen Luftwaffen-Hauptmunitionsanstalt (Luft-Muna „4/XI Oerrel“) abgelagert wurden. Abb. 1 zeigt die Kieselgur-Abbaugrube ca. im Jahr 1926. Das Luftbild in Abb. 2 verdeutlicht die örtliche Nähe zwischen dem Dethlinger Teich und der Luft-Muna „4/XI Oerrel“.

Nach dem damaligen Wissensstand wurden Kieselgur-Abbaugruben als wasserdicht angesehen, weshalb davon ausgegangen wurde, dass keine Schadstoffe aus dem Teich austreten. In den 1950er Jahren hatte man zur Überprüfung dieser Annahme ein Grundwasser-Monitoring aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Untersuchungen schienen die Annahme auch zu bestätigen. In den 1990er Jahren wurden jedoch bei Grundwasseruntersuchungen in der Umgebung erhöhte Konzentrationen an Arsen und anderen Schadstoffen nachgewiesen, darunter auch Abbauprodukte von Lost. Diese Erkenntnis legte den Grundstein für eine der weltweit größten und umfangreichste Kampfmittelräummaßnahme.



Abb. 1: Kieselgur-Abbaugrube in Dethlingen (ca. 1926)



Abb. 2: Dethlinger Teich mit Muna Oerrel (ca. 1946)

2 Historie

Nach Beendigung des Kieselgur-Abbaus ca. im Jahr 1926 wurde die Grube durch das anstehende Grundwasser geflutet und es entstand ein Teich, der in den Kriegs- und Nachkriegsjahren eine „ideale“ Stelle zur „Entsorgung“ von Kampfmitteln und Kampfstoffen bot. Insbesondere die Kampfstoffe, die in der nahegelegenen Luft-Muna „4/XI Oerrel“ gegen Ende des Zweiten Weltkrieges den Alliierten in die Hand fielen, wurden hier entsorgt, ebenso wie Kampfmittel, die auf dem Truppenübungsplatz Munster lagerten und die so nicht den langen Weg zur Nord- oder Ostsee transportiert werden mussten. Tab. 1 gibt einen Überblick über die zeitliche Abfolge der „Entsorgungsvorgänge“.

Tab. 1: Chronologie der „Entsorgungsvorgänge“

Zeitraum	Was wurde eingebracht?	Durch wen?
1942 - 1945	reichseigene Kampfstoffe	Akteure des Dritten Reichs
1945 - 1947	überwiegend Kampfmittel des ehemaligen Deutschen Reichs (reichseigene Kampfmittel)	Akteure des Vereinigten Königreichs
1951 - 1952	Beute-Kampfmittel (Granaten) des Deutschen Reichs	Akteure des Bombenräumkommandos der Polizeidirektion Hannover

Aufgrund von Zeitzeugenbefragungen und altem Fotomaterial konnte der Landkreis Heidekreis das Inventar wie folgt abschätzen:

- 200 bis 300 Phosgen-Bomben entschärft und in den Teich entleert
- 100.000 Zündladungen C/98 verkürzt
- 3.000 Kampfstoffgranaten 7,5 cm bis 32 cm
- 150 Schuss Kampfstoffmunition 7,5 cm bis 15 cm
- 15 bis 20 zuvor entleerte 500 kg Lost-Bomben
- 800 gefüllte 10,5 cm Kampfstoffgranaten
- mehrere LKW-Ladungen gefüllter Kampfstoffgranaten

Derzeit wird allerdings davon ausgegangen, dass sich erheblich mehr Kampfmittel und zusätzlich unverpackte Kampfstoffe und deren Rückstände sowie eine mächtige Abdeckung aus Betonbruch, der zum Großteil aus der Luft-Muna „4/XI Oerrel“ stammen dürfte, im Teich befinden. Als Grundlage für die Planung der Kampfmittelräumung wurde eine Menge von 30.000 kampfstoffhaltigen Munitionsteilen angenommen.

Bei der Suche nach Zeitzeugen-Dokumenten konnte der Landkreis Heidekreis auch eine neue Abschätzung zur Tiefe des Teiches vornehmen, die nunmehr auf ca. 10 bis 12 m geschätzt wird. Auf dieser Grundlage wurde im Jahr 2017 das Grundwassermessstellennetz überarbeitet und mit tieferen Messstellen versehen. Bei der daraufhin durchgeführte Emissionsschutzabschätzung wurde eine Fracht von ca. 150 kg Kampfstoffen und deren Abbauprodukten pro Jahr ermittelt.

3 Zustand vor Räumungsbeginn und Eigentumsverhältnisse

Durch die Verfüllung des im Durchmesser etwa 60 m großen Teiches mit Munition und wahrscheinlich sonstigen Abfällen und der abschließenden massiven Abdeckung des Teiches mit gebrochenem Bauschutt war dieser schon seit langem bis zur Höhe des umliegenden Geländes verfüllt und bewachsen. Die Fläche lag in einem Wald angrenzend an landwirtschaftliche Nutzflächen.

Das Grundstück des ehemaligen Teiches gehört einem privaten Eigentümer, der aber nicht zur Sanierung des Teiches herangezogen wurde, da er ursächlich nicht für die Ablagerung der Munition im Teich verantwortlich war. Mit diesem Eigentümer wurden Verträge geschlossen, die die Nutzung der Teich- sowie der umliegenden Wald- und Ackerflächen und die Rückgabe der sanierten Fläche regeln.

4 Organisation und Kostenabschätzung

Der Landkreis Heidekreis hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Munitionsablagerungen aus dem Dethlinger Teich zu bergen und auf diesem Wege sowohl die Gefahren aus den abgelagerten Kampfstoffen und der Munition als auch die daraus resultierende Grundwasserbelastung zu beseitigen. Als zuständige untere Bodenschutzbehörde koordiniert der Landkreis die gesamte Projektorganisation. In Abb. 3 ist das Zusammenspiel der beteiligten Behörden und Organisationen dargestellt.

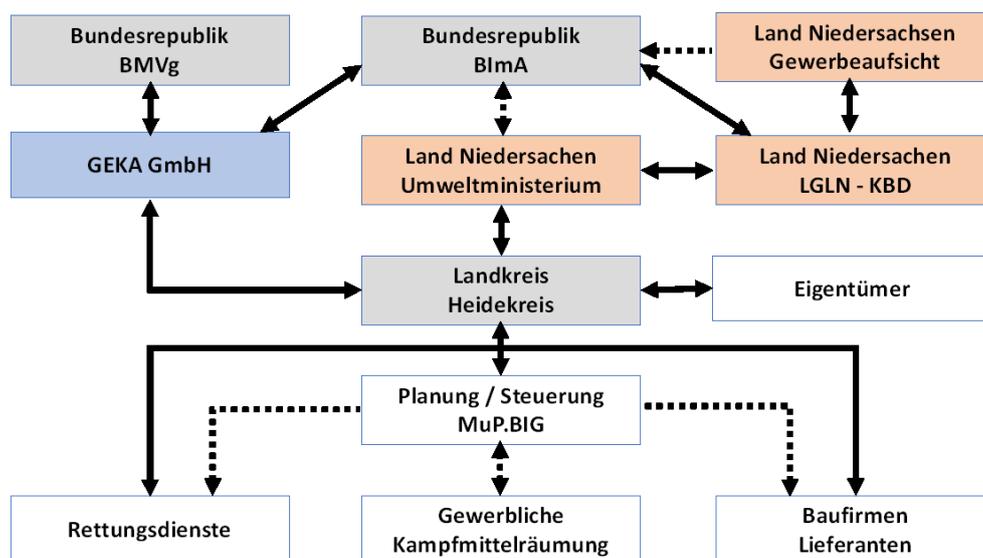


Abb. 3: Projektorganisation zur Sanierung des Dethlinger Teiches

Das Land Niedersachsen unterstützt den Landkreis mit der Expertise von Landesfachbehörden, vor allem dem Kampfmittelbeseitigungsdienst und der Gewerbeaufsichtsämter.

Die Gesamtkosten werden derzeit auf ca. 80 Mio. EUR geschätzt.

5 Probeöffnung

Um in der Planungsphase den Aufbau des Teiches zu untersuchen und um die Techniken zur Kampfmittelräumung und zur Entnahme der mineralischen Materialien im Teich erproben zu können, fand ab September 2019 in einem ersten Schritt eine Probeöffnung des Dethlinger Teiches statt. Wesentlich war im Rahmen der Teichöffnung auch die Entwicklung und Erprobung von Arbeitsschutzkonzepten und der Sicherheitstechnik.

Im Schutze einer Leichtbauhalle wurde an drei Stellen der Teichoberfläche die Bauschuttanlage entfernt, die angetroffene Munition geräumt und bei der Gesellschaft zur Entsorgung von chemischen Kampfstoffen und Rüstungsaltslasten mbH (GEKA) entsorgt. Zur Sicherung der Baugrubenböschungen fand die Entnahme in runden Verbauschächten statt (s. Abb. 4).

Bis zum März 2020 wurden dabei 2.552 Stück Kampfmittel mit Kampfstoffinhalt aus ca. 100 m³ Teichschutt geborgen und entsorgt.



Abb. 4: Blick in einen Verbauschacht bei der Probeöffnung (Foto: Tarrach, BG Bau)

6 Infrastruktur

Auf der Grundlage der Probeöffnung im Jahr 2019 wurde in den Jahren 2020 bis 2023 die Räumung des gesamten Teiches geplant und infrastrukturell vorbereitet. Der ehemalige Teich wurde mit einer Spundwand umgeben und der Räumebereich mit einer sehr großen Halle überbaut, um einen geschützten Arbeitsbereich zu haben. Um diese Bergungshalle herum wurden umfangreiche Nebeneinrichtungen (Schleusen, Grundwasser- und Abluftreinigungsanlagen, Ver- und Entsorgungseinrichtungen usw.) errichtet.

Die Spundwand dient vor allem der hydraulischen Abdichtung des Untergrundes, da für die Entnahme der Munition aus dem Teich der sehr hohe Grundwasserstand erheblich abgesenkt

werden muss. Sie stellt gleichzeitig aber auch das Fundament für die große Bergungshalle dar, die in Abb. 5 zu sehen ist. Diese überspannt auf einer Grundfläche von 1 ha den gesamten ehemaligen Teich. Da sie durch den Abtrag des Teiches, der bei der eigentlichen Kampfmittelräumung in einer offenen Baugrube erfolgt, in der Hallenmitte keine Stütze haben kann, musste sie freitragend als sehr massive Stahlkonstruktion errichtet werden.

Die Bergungshalle hat die Aufgabe eine räumliche Trennung des Räumbereiches von der Umgebung herzustellen und dadurch vor allem Ausgasungen zu verhindern. Deshalb ist die Bergungshalle mit einer gerichteten Luftströmung und einer Abluftreinigungsanlage ausgestattet.

An die Bergungshalle sind verschiedene Schleusensysteme angebaut. Diese dienen

- dem Zugang zu den Arbeitsbereichen über großzügig dimensionierte Schwarz-Weiß-Einrichtungen,
- der Ausschleusung von mineralischen Teichinhalten über Förderbänder und gedeckelte Container,
- der Schleusung von Baugeräten und deren Dekontamination und natürlich
- der Ausschleusung der Munition.



Abb. 5: Ansicht der Bergungshalle

Beim Ausschleusen der Munition muss diese erfasst und identifiziert werden. Dazu gehört vor allem auch das Röntgen der Munitionsteile, um zu erkennen, ob sie einen Kampfstoffinhalt haben. Jedes einzelnen Munitionsteil wird daraufhin an die *Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons* (OPCW) gemeldet und dann zum wenige Kilometer entfernten Gelände der GEKA transportiert, wo sie nach Freigabe durch die OPCW vernichtet werden.

Als zentrale Einrichtung für die Kampfmittelräumung ist die Bergungshalle zusätzlich mit verschiedenen weiteren Geräten ausgestattet. Dazu gehören

- gepanzerte Bagger mit umgebungsluftunabhängiger Atemluftversorgung für den Geräteführer und kabelgebundener Stromversorgung,
- vollelektrische Fahrzeuge für den Transport von Personal und Munition, die aber auch als Fahrzeuge für die Bergung von Verletzten in der Bergungshalle genutzt werden können,
- Einrichtungen zur Staubniederschlagung durch Hochdrucknebel, die auch die Dekontamination der Hallenluft von freigesetztem Phosgen ermöglichen,
- Separiereinrichtungen für optisch nicht erkannte Munitionsteile aus den ausgetragenen mineralischen Materialien und
- Einrichtungen zur Entschärfung und Vernichtung von nicht transportfähiger Munition.

Für die Grundwassersanierung wurde eine spezielle, auf die Kontamination des Grundwassers mit Kampfstoffen ausgelegte Reinigungsanlage mit pH-Regelungen und Aktivkohlereinigungsstufen u. a. zur Abscheidung von Arsen aus dem Grundwasser installiert.

7 Sicherheitstechnik

Selbstverständlich ist der Schutz der Arbeitnehmer auf der Baustelle als auch von Personen außerhalb der Räumstelle wesentlich und war deshalb Gegenstand umfangreicher Vorüberlegungen und Planungen.

Die eigentlichen Räumarbeiten werden von Feuerwerkern überwiegend händisch ausgeführt, die in der Bergungshalle in Vollschutz arbeiten (s. Abb. 6). Es bestehen dabei zwei Schutzstufen, die angewendet werden: für den Fall ohne Kampfstofffreisetzungen (was bisher immer gegeben war) und mit höheren Schutzanforderungen im möglichen Fall von Kampfstoffkontaminationen in der Bergungshalle.

Eine besondere Herausforderung bestand in der notfallmedizinischen Versorgung der Arbeitnehmer, da bei einer Kampfstofffreisetzung verunfallte Personen erst dekontaminiert werden müssen, bevor sie ärztlich versorgt werden können. Im Falle eines solchen Unfalls müssen die Verletzten von den eigenen, kampfstoff erfahrenen Kollegen aus der Bergungshalle geborgen und dekontaminiert werden, bevor sie in der Schleuse an die Notfallmediziner übergeben werden können. Diese wiederum müssen speziell geschult sein in Bezug auf mögliche Kampfstoffintoxikationen. Um dieses sicherstellen zu können, sind während der Arbeiten zur Kampfmittelräumung je ein speziell ausgebildeter Notarzt und zwei Rettungssanitär einschließlich eines Rettungsfahrzeugs auf der Baustelle einsatzbereit.

Zur Sicherheitstechnik gehört auch eine sehr umfangreiche Überwachung der Räumstelle mit Messtechnik, vor allem zur Kampfstoffidentifikation, sowie eine detaillierte Überwachung der Arbeitsbereiche mit Kameras. Alle Mitarbeiter auf der Räumstelle kommunizieren über Sprechfunkgeräte.

Die äußere Sicherheit der Baustelle wird vor allem durch eine großräumige Sperrung des Umfeldes im Umkreis von 700 m um die Räumstelle sichergestellt. Dafür muss auch eine Bundesstraße während der Arbeiten voll gesperrt werden.



Abb. 6: Blick in die Bergungshalle während der Kampfmittelräumung

8 Personaleinsatz

Während die zentrale Leitungsfunktion des Räumstellenleiters durch einen sehr kampfstoff-erfahrenen Mitarbeiter der GEKA erbracht wird, werden die eigentlichen Räumarbeiten durch gewerbliche Feuerwerker mit C-Waffen-Fachkunde ausgeführt.

Wegen der Tragezeitbegrenzungen durch die körperliche Arbeit und den Atemschutz bei den Räumarbeiten ist die eigentliche Arbeitszeit eines Mitarbeitenden auf der Räumstelle auf 84 Minuten begrenzt. Der Einsatz erfolgt in einem rotierenden Schichtsystem mit folgenden Funktionen:

- Tätigkeit in der Bergungshalle (2 Mitarbeitende)
- Erholungspause
- Standby-Bereitschaft als Rettungstrupp zur Bergung von verunfallten Kollegen im Räumbereich

Zusammen mit den Geräteführern ergibt das eine Mindeststärke eines Räumtrupps von 10 Personen.

9 Bisherige Arbeiten

Seit Herbst 2023 laufen die eigentlichen Räumarbeiten in der Bergungshalle. Die errichtete Infrastruktur und die Organisation des Projektes haben sich bewährt und werden – mit laufenden Anpassungen – in den nächsten Jahren fortgesetzt.

Bisher (Stand Februar 2025) wurden etwa 6.000 Kampfstoffgranaten geborgen und abtransportiert. Zusätzlich sind etwa 40.000 Zündladungen entdeckt und entfernt worden. Die aufgefundenen Munitionsteile wiesen eine sehr starke Streuung hinsichtlich der Herkunft, der Kaliber und der enthaltenen Kampfstoffe auf. Neben reichseigener Munition fand sich ein großer Anteil an Fremdmunition, die wahrscheinlich aus Beutelagern in Munster stammt. Es wurde auch Brand- und Nebelmunition sowie konventionelle Munition gefunden. Mit der Variation der Munitionsarten war grundsätzlich gerechnet worden, so dass sich bei der Handhabung keine

nicht geplanten Situationen ergeben haben. Allerdings war die Stückzahlen gerade der eher exotischen Munitionstypen so nicht erwartet worden.



Abb. 7: Beispiele von geborgener Munition (75 mm KS-Granate italienischer Bauart; im Röntgenbild ist die flüssige KS-Füllung zu erkennen) (Fotos: GEKA)

Um die Munition freizulegen, wurden parallel bisher 4.500 t Boden und Bauschutt entfernt und aufbereitet. Diese mineralischen Materialien werden auf dem Gelände der GEKA abschließend auf Munitionsfreiheit überprüft und analytisch bewertet. Sofern das Material grundsätzlich für einen Rückbau in der Sanierungsbaugrube geeignet ist, wird es für diesen Zweck bereitgestellt. Ansonsten wird das kontaminierte Bodenmaterial über die eigene Bodenwaschanlage dekontaminiert und die Kampfstoffanteile in der Bodenmatrix thermisch zerstört.

Insgesamt ist eine sehr hohe Dichte an Kampfmitteln in der ausgehobenen Boden- und Bauschuttmatrix gefunden worden. Teilweise lagen die Munitionsteile dicht gepackt nebeneinander, wie es der Vorstellung von der Munitionsvernichtung im ehemaligen Teich entspricht.

Die Arbeiten fanden bisher ohne nennenswerte Arbeitsunfälle statt. In keinem Fall ist es zu Gefährdungen von Arbeitnehmern durch Explosiv- oder Kampfstoffe gekommen.

10 Abschluss der Arbeiten/Verfüllung

Auf der Grundlage der angenommenen Munitionsmenge im Teich wird derzeit noch von vier weiteren Jahre Räumstelle ausgegangen. Die tatsächliche Räumzeit hängt von der Anzahl der zu bergenden Munitionsteile ab und wird sich erst aus den Erfahrungen der kommenden Jahre ergeben.

Wenn der Aushub des ehemaligen Teichinhaltes beendet und alle Munition entnommen ist, soll die verbliebene Baugrube mit geeignetem Teichmaterial (Boden bzw. Bauschutt) und angeliefertem Fremdmaterial wieder verfüllt werden. Es ist dabei vorgesehen, bindiges Fremdmaterial zu verwenden, um das von der GEKA zurückgelieferte Material bestmöglich gegen Grundwasser- und Niederschlagswasserkontakt zu schützen. Auch soll die Dichtwand im Untergrund verbleiben und den sanierten und von Kampfmitteln befreiten Bereich des ehemaligen Teiches zum Grundwasser hin abschirmen.

Der Abschluss der Kampfmittelräum- und Sanierungsmaßnahmen wurde über einen für verbindlich erklärten bodenschutzrechtlichen Sanierungsplan genehmigt.

Anschriften der Autorinnen/Autoren

Charlotte Goletz
Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz
Archivstraße 2
30169 Hannover
Telefon: 0511 120 - 3253
E-Mail: charlotte.goletz@mu.niedersachsen.de
Internet: www.mu.niedersachsen.de

Christian Poggendorf
Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH
Bemeroder Straße 71
30559 Hannover
Telefon: 0511 899223 23
E-Mail: christian.poggendorf@burmeier-ingenieure.de
Internet: www.burmeier-ingenieure.de

BODEN- WÄSCHE NEXT LEVEL

PFAS-belasteter Boden? Kein Problem. Unsere neu entwickelte mobile Bodenwaschanlage ist die Lösung. Nachhaltig und bezahlbar. Aber auch 100 % effektiv. Denn dank langjähriger Erfahrung wissen wir genau, worauf es ankommt.

Abstracts

Sanierungspraxis

Moderation: Jörg Frauenstein, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

7.

Optimierung einer langlaufenden Pump-and-Treat Maßnahme im Lausitzer Revier, Industriepark Schwarze Pumpe

Karsten Handro, Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV), Senftenberg

8.

In-situ Sanierung von komplexen Cyaniden Praxiserfahrungen eines innovativen Verfahrens am Standort eines ehemaligen Gaswerkes

Aglaia Nagel, Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover
Anja Wilken, Sensatec GmbH, Kiel

9.

Hessens größte ungesicherte Altablagerung: Nachhaltiges Sicherungskonzept (Altdeponie Eisert)

Dr. Ulrich Langer, HIM GmbH, - HIM-ASG -, Biebesheim

Optimierung einer langlaufenden Pump-and-Treat Maßnahme im Lausitzer Revier, Industriepark Schwarze Pumpe

Karsten Handro¹, Rolf Luding², Sven Arnold², Thomas Daffner³, Ulrike Schöbel³

¹ Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH

² CDM Smith SE (Hydraulischer Fachgutachter)

³ Umweltplanungs- und Betriebsgesellschaft mbH Vogtland (Rahmengutachter)

1. Einleitung

Der heutige Industriepark Schwarze Pumpe (ISP) ist in der Mitte des Lausitzer Braunkohlerevieres südlich von Cottbus zwischen Spremberg und Hoyerswerda zu verorten. Im Zeitraum zwischen 1955 und 1970 wurde hier auf einer Fläche von ca. 12 km² ein Verbundbetrieb von Industrieanlagen zur Braunkohleveredelung errichtet. Dieser Bestand aus 3 Brikettfabriken, 3 Kraftwerken, einer Kokerei mit 80 Öfen, einem Druckgaswerk und Werkstätten. Bis zum Jahr 1990 war dies der größte Braunkohleveredelungsstandort der Welt, in dem ca. 14.000 Beschäftigte bis zu 40 Mio. Tonnen Rohbraunkohle pro Jahr zu Briketts, Elektroenergie, Koks und Stadtgas verarbeiteten. So wurden z. B. ca. 85 % des Stadtgases der ehemaligen DDR am Standort erzeugt. Aufgrund von Engpässen bei der Energieversorgung wurden die Anlagen mit maximaler Leistungsfähigkeit betrieben.

Von diesen Anlagen erfolgten über Jahrzehnte erhebliche Verunreinigungen des Bodens und Grundwassers mit Schadstoffen aus der Braunkohleveredelung (u. a. BTEX, Phenole, PAK). Mit der Umstrukturierung der Energiewirtschaft wurden schrittweise große Teile der Veredlungsanlagen stillgelegt und anschließend rückgebaut.

Die Sicherung und Sanierung der Altlasten (es wurden 131 Altlastenverdachtsflächen dokumentiert) aus mehreren Schadensherden auf der Fläche des ISP liegt heute in der Verantwortung der LMBV. Die Sanierungsmaßnahmen der LMBV dienen vorrangig dem Ziel der Gefahrenabwehr für die abstromigen Schutzobjekte (Trinkwasserfassung, Hauswasserbrunnen, Oberflächenwasser, Grundwasser), sowie der Flächenvorbereitung für unterschiedliche industrielle und gewerbliche Folgenutzungen.

Aufgrund des Umfangs sowie der Komplexität der Kontamination wird der Standort seit Ende der 90er Jahre einer aktiven hydraulischen Sanierung unterzogen. Aus der über 25 Jahre erfolgten Sanierung können

- aus Sicht der instationären Randbedingungen (Grundwasserwiederanstieg und Fließrichtungsumkehr) und des fortschreitenden Kenntnisstands (umfassende Verdichtung/Erweiterung Messstellennetz, Sondierungen, Grundwasserströmungs- und Transportmodell),
- aus Sicht der Technologie zur Abreinigung (Industriekläranlage, dezentrale Makro-Poröse Polymer-Extraktion - MPPE Anlagen, biologische Abwasserbehandlung ABA II),
- aus technischer Sicht → Entwicklung der Brunnen + Pumpen (Teleskopbrunnen, Vertikalfilterbrunnen, Großbrunnen, Horizontalfilterbrunnen),
- aus Sicht der genehmigungsrechtlichen Randbedingungen (Leitschadstoffe, Sanierungszielwerte mit Abstromprofilen und Kontrollprofilen → Möglichkeit der intermittierenden Fahrweise oder Abschalten der Brunnen),

unterschiedliche Maßnahmen der Optimierung abgeleitet werden.

2. Historie der Grundwassersanierung

Zur Sanierung des Grundwasserschadens wird bereits seit 1997 eine komplexe hydraulische Maßnahme zur Hebung des kontaminierten Grundwassers und dessen Abreinigung mittels einer Pump-and-Treat (p&t) Maßnahme realisiert, welche durch regelmäßig stattfindende Sanierungsaudits auf ihre Wirksamkeit überprüft wurde und wird. Hierzu werden Kriterien wie z. B. Wirtschaftlichkeit oder Nachhaltigkeit zur Bewertung herangezogen.

Zu Beginn der Sanierung war auf dem Gelände des ISP eine Grundwasserfließrichtung von Südost nach Nordwest bis West zu verzeichnen. Dementsprechend wurde die Grundwasserbelastung im Bereich des ISP in unterschiedlichen Bereichen (Quellbereich, Mittelabstrom, Westabstrom und Nordostabstrom) nachgewiesen (vgl. Abb.1).

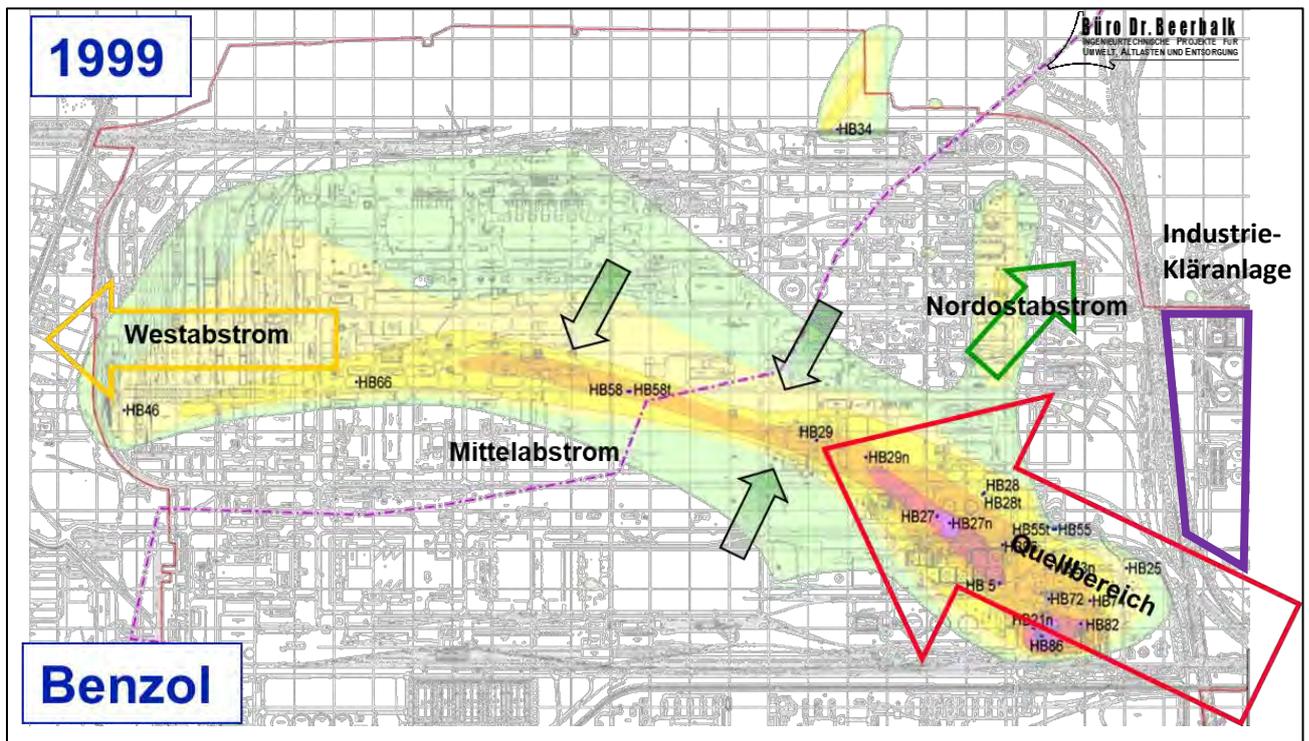


Abb. 1: Schadstoffverteilung Benzol und Grundwasserfließrichtung im Jahr 1999 [QV]

Die Abreinigung des Grundwassers erfolgte bis 2002 ausschließlich auf der östlich gelegenen Industriekläranlage der SUSTEC (vgl. Abb. 1). Anschließend wurde das belastete Grundwasser schrittweise mittels MPPE-Anlagen von BTEX und PAK gereinigt. Das teilgereinigte Wasser wurde über Infiltrationsbrunnen und Sickerrigolen im Anstrom der Hauptschadherde wieder in das Grundwasser zurückgeführt (vgl. Abb. 2).

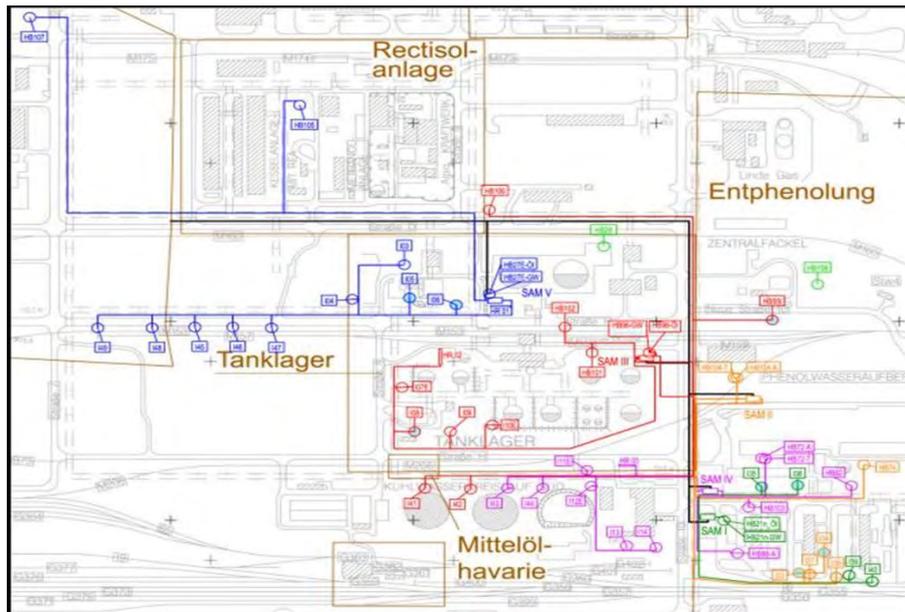


Abb. 2: Schema der Sanierungsmodule mit MPPE-Anlagen als Sanierungsmodule I-V [QV]

Durch die Flutung der umliegenden Tagebauhohlformen stieg der Grundwasserspiegel im Bereich des ISP seit Mitte der 2000er Jahre um mehrere Meter an, was eine Verlagerung der Grundwasserscheide von der östlichen zur westlichen Grenze des ISP und eine Veränderung der Grundwasserfließrichtung in nur ca. 10 Jahren zur Folge hatte. Die Grundwasserfließrichtung änderte sich im Uhrzeigersinn bis Mitte der 2010er Jahre auf eine Richtung von Südwest nach Nordost (vgl. Abb. 3). Dies hatte zur Folge, dass sich die Schadstofffahne in Richtung des Vorfluters Spree ausbreitete und die Standorte und Fahrweise der Haltungsbrunnen ständig überprüft und angepasst werden mussten. Dazu gehörte auch die Neuerrichtung von speziellen s.g. Teleskop-Brunnen und Haltungsbrunnen in klassischer Ausbaupweise oder mit Ex-Schutz (vgl. Abb. 7, Abb. 8). Besonders die baulich und betrieblich anspruchsvollen Teleskop-Brunnen, welche auf die Ölphasenabschöpfung und gleichzeitige Entnahme tiefer liegender kontaminierter Grundwässer optimal errichtet wurde, hatten infolge der ständigen Veränderung von Fließrichtung und Grundwasseranschnitt einen hohen Anpassungsbedarf.

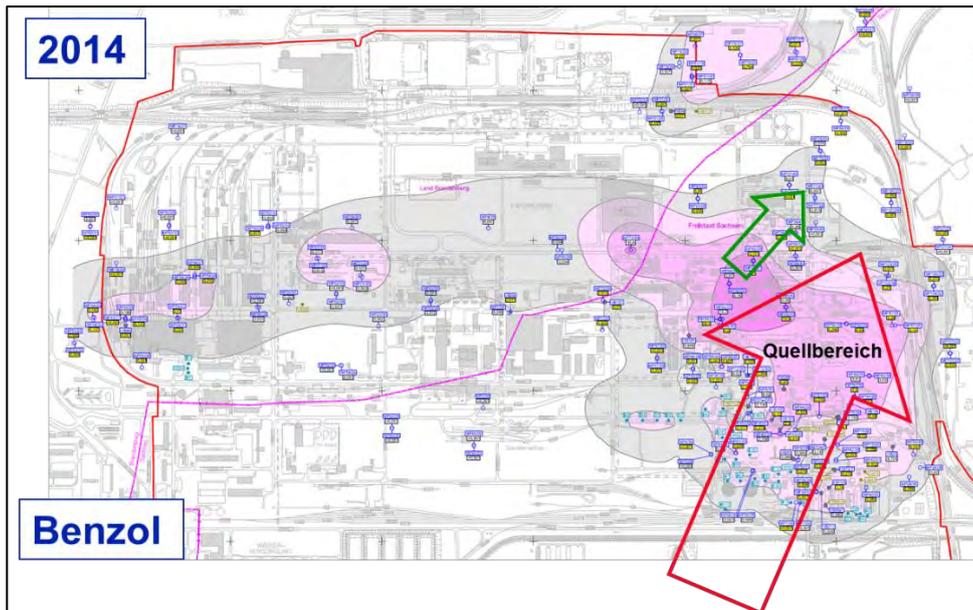


Abb. 3: Schadstoffverteilung Benzol und Grundwasserfließrichtung im Jahr 2014 [QV]

Mit der Fokussierung auf die Schadstoffgruppe der kurzkettingen Alkylphenole (SCAP) musste festgestellt werden, dass die Sanierung des Grundwassers mittels MPPE-Anlagen keine ganzheitliche Reinigung möglich macht. Somit wurden alternative Reinigungsmethoden zu den bestehenden Anlagen gesucht und erprobt. Da im Jahr 2013 eine neue Abwasserbehandlungsanlage (ABA II) mit aerober Abwasserbehandlung und anaerober Hochlastbiologie auf dem Gelände des ISP errichtet wurde, stellte diese Anlage eine Alternative zur bestehenden Grundwasserreinigung dar. Nach einem Großpilotversuch wurde ab Mitte 2016 schrittweise die komplette Grundwassermenge zur Reinigung in die ABA II geleitet und abgereinigt. Bis zum heutigen Tag konnten die geforderten Abreinigungswerte in der ABA II stets eingehalten werden.

Die Sicherung und Sanierung des kontaminierten Quellbereiches und des Nordostabstroms erfolgt seit diesem Zeitpunkt über drei Brunnenreihen mit insgesamt 35 Haltungsbrunnen in drei Grundwasserleitern (vgl. Abb. 4).

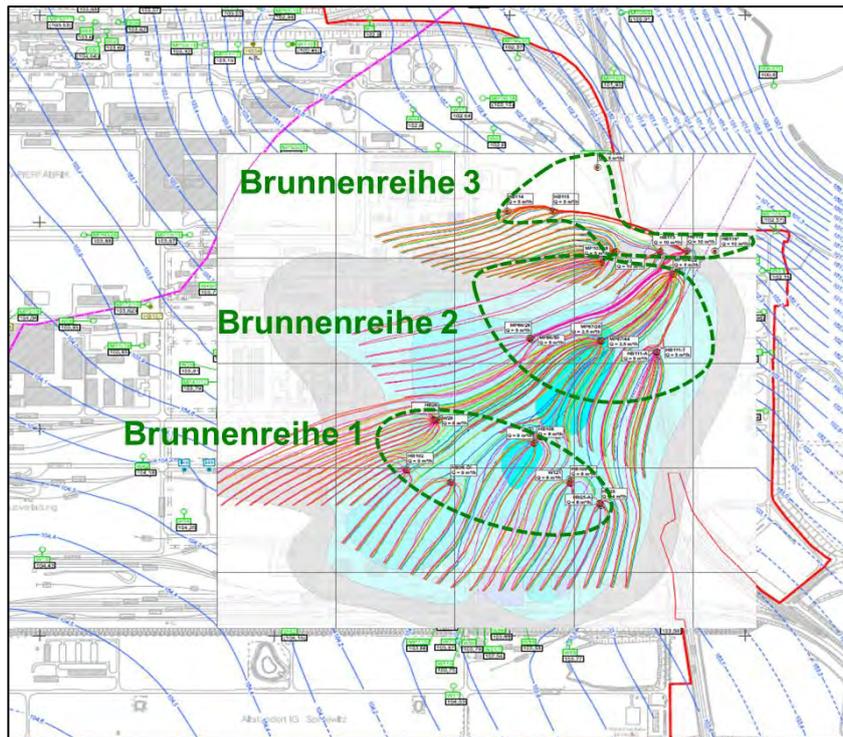


Abb. 4: Darstellung der Brunnenreihen mit dem jeweils mittels des Grundwasserströmungsmodells SCHWAP simulierten Einzugsgebiet

Die ausgeprägten instationären hydraulischen Randbedingungen unterliegen einer hohen Dynamik, die sowohl den regionalen Bergbautätigkeiten als auch dem lokalen p&t Betrieb geschuldet sind. Bis 2021 flachten die Frachtaustragskurven der Brunnenreihen aufgrund der für langlaufende p&t Maßnahmen typischen Tailing-Effekte ab.

3. Aktuelle Herausforderungen bei der Grundwassersanierung

Mit der Zulassung des neuen, für Brandenburg und Sachsen einheitlichen Abschlussbetriebsplans (ABP) Boden und Grundwasser werden die in den Jahren 2021/2022 fachlich abgeleiteten und behördlich bestätigten Sanierungszielwerte (SZW) verbindlich (vgl. Tab. 1). Diesem Ergebnis gingen umfangreiche Untersuchungen sowie das Etablieren einer nachvollziehbaren, transparenten Berechnungsmethoden voraus [QV].

Ausgehend von der Sanierung und Sicherung der Quellbereiche wurden die standortspezifische Hydrogeologie sowie die Transportprozesse im Grundwasser untersucht bzw. laborativ und feldbasiert quantifiziert.

Dazu gehörten u.a. [QV]:

- Isotopenuntersuchungen zur Genese der Grundwasseranteile,
- Untersuchungen zu Druckpotentialen in Grundwasserleitern,
- Mehrjährige Messung der Interaktion von Grundwasser/Oberflächenwasser,
- Geophysikalische Untersuchungen zu Verbreitungsgrenzen von Geringleitern,
- Sickerwasserprognose im Hauptquellbereich,
- Laborative Untersuchungen zur Ermittlung von Migrationsparametern für die NA-Potentialermittlung.

Die Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Grundwasser – Schutzobjekt erfolgte standortspezifisch. Die zugrunde liegende Methodik basiert auf einer idealisierten Betrachtung des rein advektiven Stofftransports unter Einbeziehung laborativ ermittelter biologischer Abbauraten für den Standort Schwarze Pumpe. Die analytische Bilanzierung erfolgte separat für die drei definierten Abstromprofile NA01, NA02 und NA03 (vgl. Abb. 5) in den Bereichen der Modellgrundwasserleiter (MGWL) 3–6 (oberer Grundwasserleiter) sowie 8–12 (unterer Grundwasserleiter).

An den Kontrollprofilen wurden die neuen SZW in Hinblick auf die Schutzobjekte festgelegt (Tab. 1 und Abb. 5).

Tab. 1: Sanierungszielwerte (Ebene Modellgrundwasserleiter 3-6) auf und außerhalb des Werkgeländes Schwarze Pumpe, BR – Brunnenreihe, KP – Kontrollprofil, HB – Haltungsbrunnen, TAB – Teerabsetzbecken [QV]

Sanierungszielwerte (SZW) MGWL 3-6		
Bedingung: Einhaltung der schutzgutbezogenen Konzentrationsansätze erfüllt	Benzol µg/l	Summe Alkylphenole µg/l
BR 2 und KP-1	400	200
BR 3 und Werkgrenze	200	120
BR 4 (HB110, TAB)	200	120
KP-2	150	100
KP-3	100	60
KP-4	20	20
Schutzobjekt Zerrer Gräben	<10	<7 (ohne Phenol)
Schutzobjekt Spree	<0,1	<1,8
Schutzobjekt WW Spremberg (Randstromlinie)	<1	<7 (ohne Phenol)

Bis zur Festsetzung der neuen SZW gab es für Benzol am Sanierungsstandort unterschiedliche SZW in Brandenburg und Sachsen an der Werkgrenze des Industrieparks (Abb. 5). Seit der Zulassung der neuen SZW ermöglichen diese eine flexiblere und optimierte Fahrweise einzelner Brunnenreihen hinsichtlich ihrer Effizienzsteigerung entlang der Abstromprofile. Hierfür ist das Monitoringkonzept u.a. auf die Brunnen inkl. Überwachungsmessstellen sowie die Kontrollprofile und Abstromprofile ausgerichtet worden [QV].

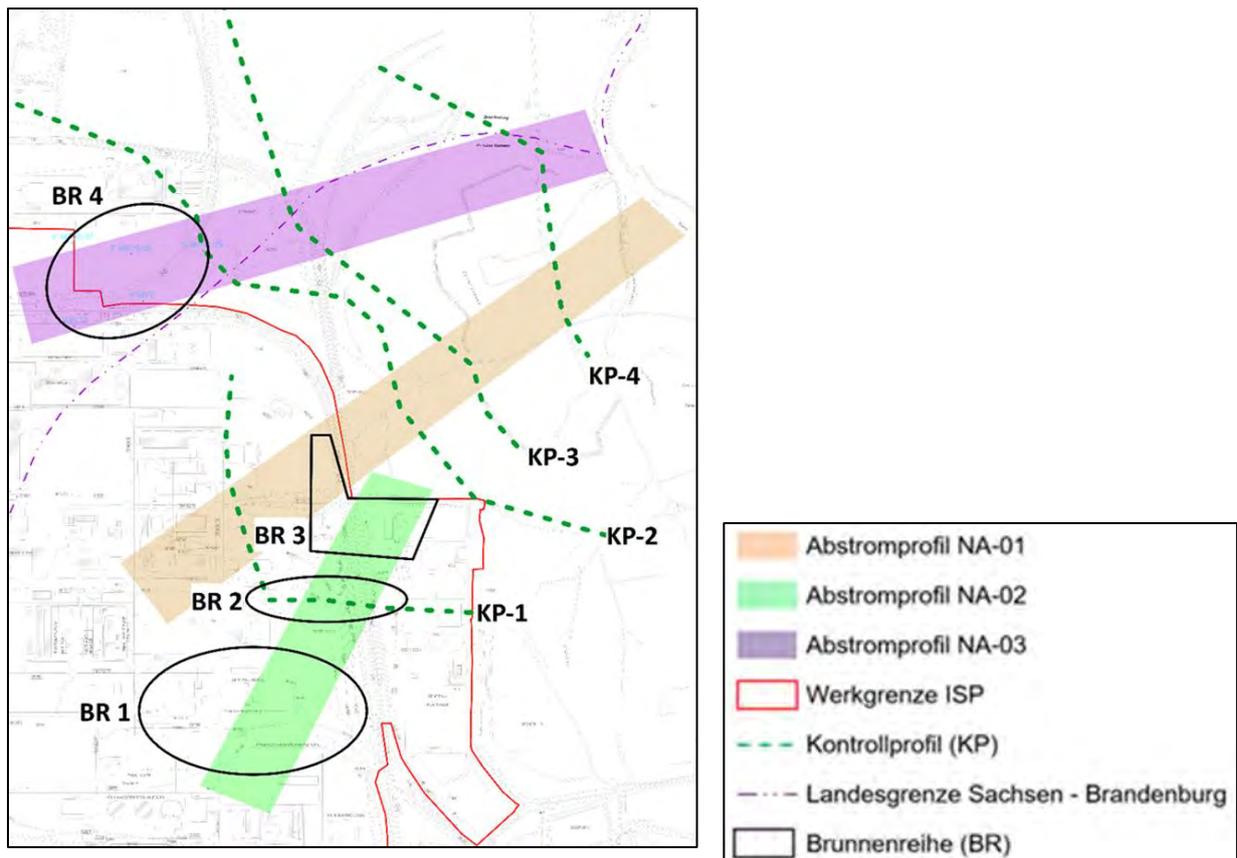


Abb. 5: Zentraler und östlicher Teil des Industrieparks Schwarze Pumpe mit 2022 neu festgelegten Kontrollprofilen KP 1 bis KP-4 sowie den Abstromprofilen NA-01 bis NA-03 [QV]

Die Optimierungsmaßnahmen beinhalten im Wesentlichen Betriebsregimeanpassungen ausgewählter Brunnen in Form von intermittierenden Betriebsfahrweisen und werden auf Grundlage der Überwachung des Brunnenbetriebs, des Grundwassermonitorings sowie modellgestützter Bewertungen der Schadstoffausbreitung kontinuierlich umgesetzt. Hierbei werden die folgenden drei Kriterien jeweils geprüft und zu Grunde gelegt.

Dynamisches Kriterium: Betrachtung des Verlaufs der Schadstoffkonzentration in den letzten 2 Jahren, der Entnahmemenge und der Schadstofffracht im Brunnen sowie Beurteilung der Trendentwicklung und der Ursachen.

Statisches Kriterium: Der Wert ($0,75 \cdot \text{SZW}$) ist im Brunnen dauerhaft - auch bei geringen Förderraten - zu erreichen.

Hydraulisches Kriterium: Mit dem numerischen Grundwasserströmungsmodell SCHWAP sowie analytischen Verfahren werden die Auswirkungen der Anpassung des Förderregimes hinsichtlich der umliegenden Brunnen, der Fließrichtung- und Geschwindigkeit, Schadstoffausbreitung sowie der Zielstellung der jeweiligen Brunnenreihen geprüft.

So konnte beispielsweise die Breite der Schadstofffahne für Benzol ($> 1 \text{ mg/l}$) von 2018 mit über 380 m bis 2023 auf nur noch ca. 120 m deutlich verringert werden. Die Optimierungsmaßnahmen zeigen, dass das typische Abflachen der Frachtaustragskurve bei p&t Maßnahmen, insbesondere unter Bedingungen hoher Grundwasserdynamik, durch gezielte Anpassungen der Betriebsfahrweisen ausgewählter Brunnen verzögert werden kann. Dadurch wird die Effizienz der p&t Maßnahme gezielt erhöht und der Abriss der Schadstofffahne zielgerichtet eingeleitet.

Die nachfolgende Abbildung 6 verdeutlicht am Beispiel der Brunnenreihe 1, wie mit den aktuellen Maßnahmen zur Optimierung der hydraulischen Sanierung der über Jahre erfolgte und besonders für langlaufende P&T Maßnahmen charakteristische Anstieg der spezifischen Fördermenge je entferntem kg-Schadstoff im positiven Sinne verändert werden konnte.

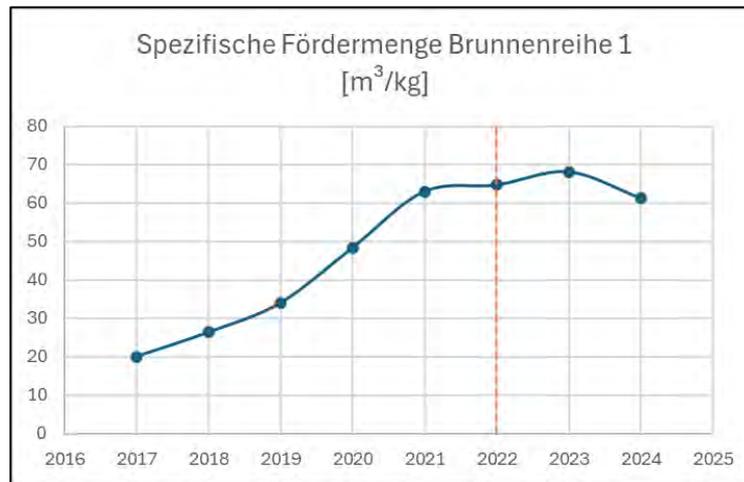


Abb. 6: Spezifische GW-Fördermenge für 1 kg Schadstoffe (Benzol + SCAP); rote Linie Festlegung neuer SZW, Anwendung erfolgte ab 2021

Um eine effiziente, zielorientierte Überwachung der Schadstofffahnen im oberen und unteren Grundwasserleiter zu gewährleisten, ist das Monitoring an den Abstrom- und Kontrollprofilen ausgerichtet. Es erfolgt je nach Gefährdungssituation eine spezifische monatliche und quartalsweise Auswertung unter Einbezug der drei oben genannten Kriterien. Im Rahmen eines umfangreichen Jahresberichts werden die hydrogeologischen, hydrologischen, hydraulischen und hydrochemischen Sachverhalte in Bezug auf die umzusetzende Sanierung dargestellt sowie gegenüber den Fachbehörden erläutert.

Die weitere Optimierung des p&t wird durch die LMBV in folgende Richtungen forciert:

- optimierte Fahrweisen der bestehenden Haltungsbrunnen
- Ersatzneubau von abgenutzten und hydraulisch – technisch ungenügend arbeitenden Haltungsbrunnen durch Großbrunnen oder Horizontalfilterbrunnen mit deutlich besseren Möglichkeiten in Grundwasserleitern mit geringer Mächtigkeit der höchsten Schadstoffbelastungen
- schrittweise Ablösung des p&t durch ENA-Maßnahmen.

Effektive alternative Sanierungsansätze unter „Einsatz“ natürlicher Abbauprozesse (ENA) berücksichtigen das vorhandene mikrobiologische Potenzial und dessen gezielte Stimulierung. Standortbezogene Untersuchungen konnten den mikrobiellen Abbau nachweisen und Fragestellungen zu potenziellen stimulierenden Faktoren beantworten aber auch weitere aufwerfen. Die spezifisch am Abbau beteiligten Mikroorganismen sowie die maßgeblichen Einflussgrößen, insbesondere im Hinblick auf kurzkettenige Alkylphenole (SCAP), sind bislang nicht vollständig charakterisiert. Die im Jahr 2023 genehmigten neuen Abschlussbetriebspläne schaffen den Rahmen für die gezielte Anwendung von MNA- und ENA-Maßnahmen in Abhängigkeit vom jeweiligen Schutzgut.

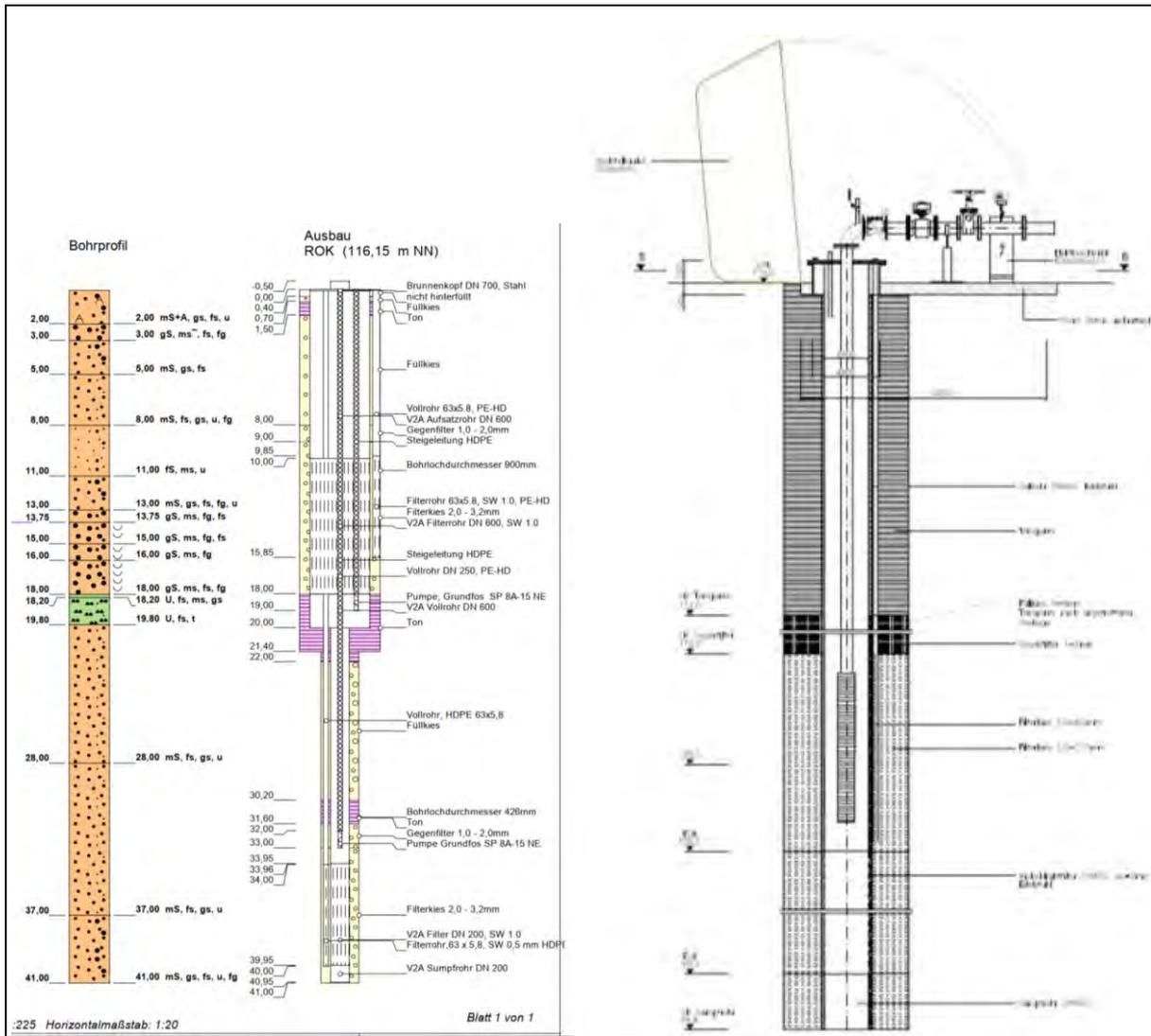


Abb. 7: link: Teleskop-Förderbrunnen bei hydraulisch getrennten Grundwasserleitern mit Ölförderung im oberen Brunnen (errichtet 2004), rechts: „klassischer“ Haltungsbrunnen mit BRECHTEL-Haube [QV]



Abb. 8 Beispiel: explosionsgeschützt hergerichteter Brunnen, hier HB 113 (errichtet 2017) [QV]

Quellenverzeichnis:

[QV]: Das Quellenverzeichnis kann bei den genannten Autoren angefragt werden.

Kontakt Daten Autoren

Ulrike Schöbel, M.Sc.

Dr.-Ing. Thomas Daffner

UBV – Umweltplanungs- und Betriebsgesellschaft mbH Vogtland

Thossener Str. 6 Knappenstr. 1

08538 Weischlitz / i.V. 01968 Senftenberg

U.Schoebel@ubv.de

Th.Daffner@ubv.de

www.ubv.de

Dipl.-Ing. (FH) Karsten Handro

LMBV-Lausitzer Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH

Knappenstr. 1

01968 Senftenberg

Karsten.Handro@lmbv.de

Dipl. Geol. Rolf Luding

Dr. Sven Arnold

CDM Smith

Bouchestr. 12 (Haus 8),

12435 Berlin

Rolf.Luding@cdmsmith.com

sven.arnold@cdmsmith.com

AUSGEZEICHNET. NACHHALTIG.



Mit unseren thermischen In-Situ Sanierungsverfahren bieten wir Ihnen eine kosteneffiziente und nachhaltige Alternative zum Bodenaustausch.
SCHNELL UND SICHER – IN BODEN UND GRUNDWASSER



schnell und
effizient



wenig
Transporte



sanieren bei
Erhalt
vorhandener
Infrastruktur



wassersparend



energieeffizient



kostensparend



nachhaltig

reconsite GmbH

Auberlenstrasse 13
D-70736 Fellbach
Tel.: +49-(0)711-410190-0

info@reconsite.com | www.reconsite.com



In situ-Sanierung von komplexen Cyaniden: Praxiserfahrungen eines innovativen Verfahrens am Standort eines ehem. Gaswerkes

Aglaia Nagel, Sebastian Reimers und Anja Wilken

1 Veranlassung

Auf dem Grundstück der Stadtwerke Rinteln wurden durch mehrere Untersuchungskampagnen Verunreinigungen der Medien Boden und Grundwasser festgestellt, die sich ursächlich auf die ehemalige Nutzung des Grundstückes als Gaswerk zurückführen lassen. Dieses wurde in der Zeit von 1896 – 1964 zur Produktion von Stadtgas betrieben. Der Herstellungsprozess beruhte auf der Verschwelung von Steinkohle, wobei die Nebenprodukte aus der Verschwelung (z.B. Teer) und giftige Stoffe aus der Rohgasaufbereitung (z.B. Cyanide, Ammoniak, Schwefelwasserstoff), in Folge unsachgemäßen Umgangs heutige Kontaminationen darstellen.

Der Abriss von Betriebsgebäuden für eine konservative Sanierung durch Aushub wurde unter der Perspektive von Kosten, Nachhaltigkeit und der einhergehenden monatelangen Anwohnerbelästigung in Frage gestellt. Um dem Handlungsbedarf nachzukommen und zudem den Betrieb der Stadtwerke bei der erforderlichen Sanierung nicht einschränken zu müssen, entwickelten die Mull & Partner Ingenieurgesellschaft mbH (M&P) in Kooperation mit der Sensatec GmbH ein innovatives in situ-Sanierungsverfahren. Durch ein den örtlichen Gegebenheiten angepasstes, integratives Anlagenkonzept und einer automatisierten Verfahrenstechnik sollte ein co-metabolischer Schadstoffabbau stimuliert werden. Das Projekt und die ersten Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

2 Standortbeschreibung

Das ca. 10.000 m² große Untersuchungsgebiet umfasst das Gelände des ehemaligen Gaswerkes Rinteln. Derzeit wird das Grundstück als zentraler Büro- und Technikstandort von der Stadtwerke Rinteln genutzt. Die aktuell bestehenden Gebäude wurden größtenteils nach dem weitgehenden Abbruch des alten, auf das Gaswerk zurückgehenden Gebäudebestands in den späten 1960er- bis 1970er Jahren neu errichtet. Neben dem zentralen Büro- und Werkstattgebäude umfassen sie mehrere Hallenbereiche, die als Lager, Werkstätten und KFZ-Garagen genutzt werden. Die Freiflächen auf dem Grundstück sind nahezu alle durch Verbundpflaster bzw. Betonplatten versiegelt.

2.1 Geologische und hydrogeologische Verhältnisse

Der geologische Untergrund ist durch fluviatile Ablagerungen der Weser geprägt. Auf dem Grundstück wurden flächenhaft anthropogene Auffüllungen festgestellt, mit einer gemittelten Mächtigkeit von 1,0 - 1,5 m. Diese werden unterlagert durch einen ca. 1,0 - 2,0 m mächtigen Auelehmschicht, der als natürlicher Grundwassernichtleiter fungiert. Im Liegenden stehen kiesige Sande bis sandige Kiese der Weser-Niederterrasse an, durchzogen von vereinzelt Schlufflinsen (Abbildung 1). In einer Tiefe von ca. 9,0-10,0 m u. GOK wird der Aquifer durch Tonstein des Grundgebirges begrenzt.

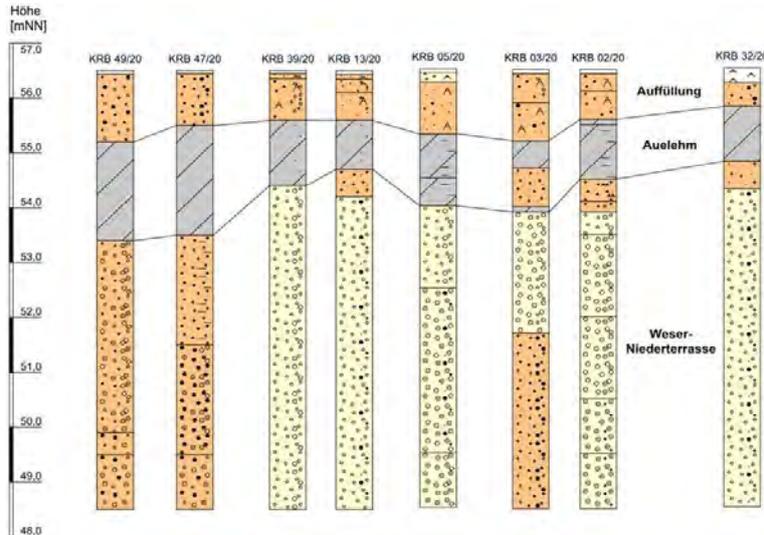


Abbildung 1: Vereinfachter geologischer Aufbau im Untersuchungsgebiet

Die Grundwasserfließrichtung ist generell nach Südwesten zum nahen Vorfluter Weser hin ausgerichtet. Hohe Pegelstände der Weser führen temporär zu stationären bis influenten Verhältnissen und damit zu einer Aufhöhung des Grundwasserspiegels auf dem betroffenen Grundstück. Der mittlere Grundwasserflurabstand beträgt 4,5 m bei geringem hydraulischem Gradienten (z.B. Juni 2020: $i \approx 0,00033$). Der Grundwasserleiter weist durchschnittlich einen Durchlässigkeitswert (kf-Wert) von $7,0 \cdot 10^{-4}$ m/s auf.

Daten vom April 2021 bis Februar 2025 (Abbildung 2) zeigten, dass das Grundwasser am Standort stark schwankt, mit Spitzen zwischen Januar und April. Im Winter 2023/2024 wurden die höchsten Grundwasserstände seit Beginn der projektinternen Aufzeichnung gemessen und lagen im Juni 2024 immer noch 0,5 m über dem Niveau vom Juni 2021.

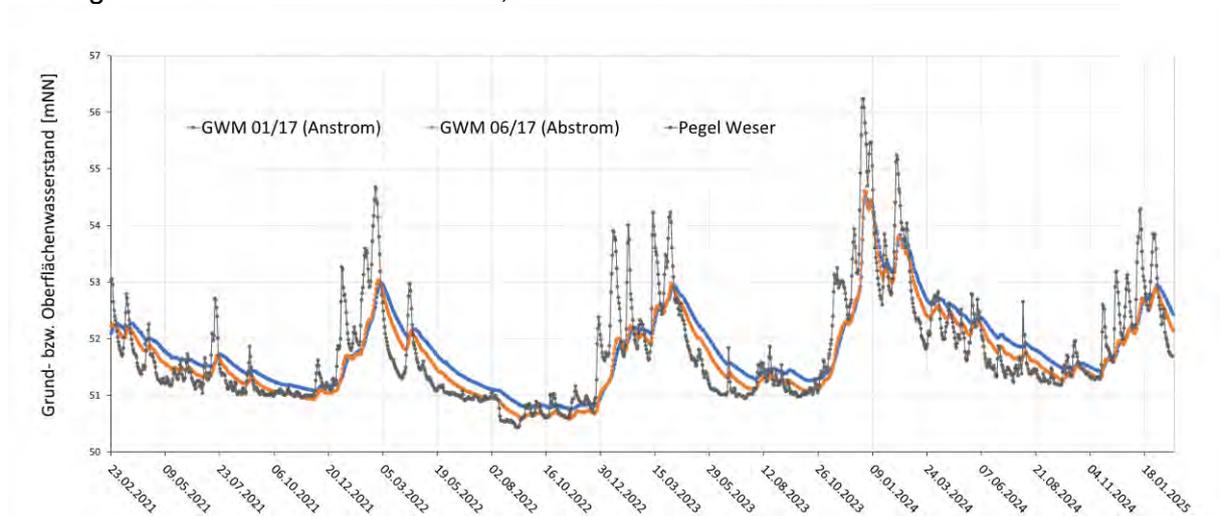


Abbildung 2: Ausgewählte Ganglinien im Untersuchungsgebiet, sowie Pegelstand der Weser nach WSV 2024, 23.02.2021 – 27.02.2025

2.2 Schadstoffe im Boden und Grundwasser

Im Zuge der Bodenuntersuchungen (2015 bis 2020) wurden zwei Schadstoffherde identifiziert (Abb. 3). Herd 1 (Produktion) ist durch eine Cyanidbelastung unter einer ehemaligen Lagerhalle charakterisiert. Im Schadensherd 2 befand sich die Regenerationsfläche der Reinigermasse und der Bereich der späteren Abfallvergrabung. Hier liegt eine Mischkontamination von Cyaniden, PAK, MKW, BTEX und heterocyclischen Verbindungen

vor. Der hoch kontaminierte Bereich erstreckt sich vom südöstlichsten Teil des Grundstückes bis unterhalb des zentral gelegenen Bürogebäudes auf einer Fläche von fast 1.500 m². Alle Schadstoffherde sind mit Gebäuden, Fahrbahnen oder Bodenplatten überbaut und versiegelt.

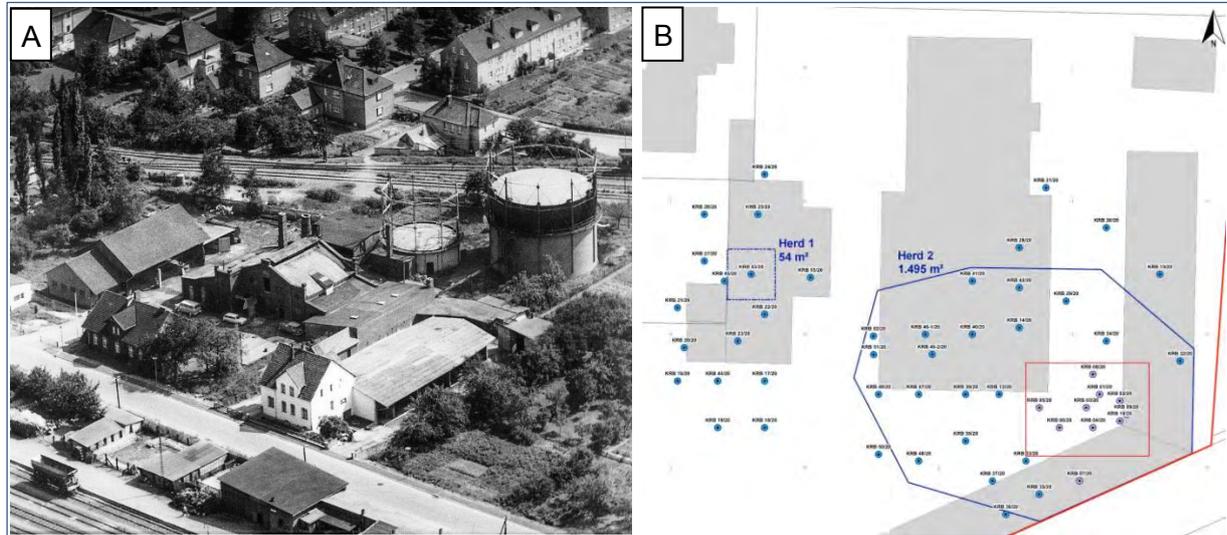


Abbildung 3: Bebauung im Jahr 1962 (Teil A). Eingrenzung und Definierung der Schadensherde auf Basis durchgeführter Erkundungsbohrungen (Teil B)

Insbesondere im südöstlichen Grundstücksbereich betrafen die Bodenverunreinigungen nicht nur die anthropogene Auffüllung. Die natürlichen Bodenschichten des Auelehms und der Niederterrassensedimente wurden während der Zeit fehlender Versiegelung durch Sickerwasser stark kontaminiert und Schadstoffe drangen über die vadosen bis zur phreatischen Zone vor. Dementsprechend wies das Grundwasser zum Zeitpunkt der Erkundung flächenhaft hohe bis sehr hohe Konzentrationen von komplexen Cyaniden mit Spitzenwerten bis zu 40.000 µg/l auf. Weitergehend wurden im Südosten des Untersuchungsgebiets PAK sowie einzelne, den Heterozyklen zuzurechnende Substanzen (i. W. Acridinon) in hohen Konzentrationen im Grundwasser nachgewiesen. Die im Grundwasser festgestellten Konzentrationen korrelieren mit den vorgefundenen Bodenbelastungen und belegen eindeutig eine Beeinträchtigung des Schutzgutes über den Wirkungspfad Boden – Grundwasser, die auf die ehem. Nutzung des Standortes zurückzuführen ist. Zudem ist ein Schadstoffaustrag (Cyanide, Acridinon) mit dem Grundwasser vom Grundstück der Stadtwerke belegt worden, so dass eine Gefährdung des Schutzgutes Grundwasser vorliegt und Handlungsbedarf bestand.

3 Das Sanierungsverfahren

Im Zuge einer initialen Machbarkeitsstudie wurden verschiedene Sanierungsmethoden für den Standort erörtert und ein Variantenvergleich ausgeführt. Der konventionelle Bodenaustausch würde notwendigerweise einen kostenintensiven Rückbau der Stadtwerksgebäude bedingen und eine enorme Belastung für die Nachbarschaft darstellen. Im Falle einer Sicherungsmaßnahme mittels einer reaktiven, permeablen Barriere hingegen wäre mit einer langen Laufzeit und ebenfalls unkalkulierbaren hohen Kosten zu rechnen. Für eine Sicherung von komplexen Cyaniden mittels Pump and Treat fehlen nach aktuellem Stand der Wissenschaft praxistaugliche Verfahren und Techniken. Aufgrund dieser Faktoren wurde sich für die Durchführung einer in situ-Sanierung mit vertikalen Filterelementen entschieden. Gleichzeitig sollte das gewählte Verfahren einen möglichst ungestörten Betrieb der Stadtwerke

ermöglichen sowie unter ökologischen und wirtschaftlichen Perspektiven einen hohen Grad an Nachhaltigkeit vorweisen.

Der Fokus der Sanierungsmaßnahme wurde auf dem Abbau der Cyanidverbindungen gelegt, da diese verstärkt über die Grundstücksgrenze ausgetragen wurden und für das Untersuchungsgebiet den Leitparameter darstellten. Dementsprechend wurden konzeptionelle Überlegungen für die Durchführung einer mikrobiologischen in situ-Sanierung durch Anregung der autochthonen Mikrobiologie angestellt und im Labor getestet. Im Anschluss wurden die Resultate in einem Feldversuch unter realen Bedingungen verifiziert.

3.1 Grundlagen

Die verfahrenstechnische Grundlage war die Bioverfügbarkeit der Cyanidverbindungen zu erhöhen und sie durch Transformation den biologischen Abbauprozessen zuzuführen. Bereits bekannt war bis dato die Umsetzung von leicht freisetzbaren Cyaniden durch Bakterien und Pilzen (Dubbey & Holmes 1995) unter Verwendung als Stickstoff- und / oder Kohlenstoffquelle zu Kohlenstoffdioxid und Nitrat. Die mikrobielle Adaption komplexierter Eisen-Cyanid-Verbindungen (welche mit 99% vorwiegend am Standort vorlagen) ist unter normalen Umständen als gering zu bewerten. Kritisch zu betrachten ist dabei das sogenannte Berliner Blau (Abbildung 4) bzw. Eisen(III)-Hexacyanidoferrat, welches bedingt durch seine geringe Wasserlöslichkeit zur Ausbildung von Stoffdepots und zur langfristigen Abgabe von toxischen Cyanidverbindungen führen kann (Oelsner 2003). Jedoch kann die Zuführung von ausgewählten Cosubstraten in einen speziell dafür modifizierten Grundwasserleiter den Abbau positiv beeinflussen.



Abbildung 4: Berliner-Blau Fund am Standort Rinteln

Mit steigender Alkalität findet eine Transformation des schwer löslichen Berliner-Blau-Komplexes nach Formel (1) statt, ohne dass es zu einer Freisetzung von Cyanwasserstoff komme (Oelsner, 2003).



Grundlegend für die Konzeptionierung war daher die Findung eines geeigneten Cosubstrates sowie eine aktive Steuerung des pH-Wertes, um die Löslichkeit komplexer Cyanide positiv zu beeinflussen. Unter natürlichen Bedingungen herrscht im Grundwasser Niedersachsens ein gepufferter pH-Wert von 6 - 8,5 (UBA, 2004). Vor Ort herrschte zur Nullbeprobung 2021 ein pH-Wert von 6,6 – 7,1. Eine Überhöhung der Alkalität würde zu einer überproportionalen und möglicherweise unkontrollierbaren Lösung von Cyaniden führen, weshalb für die Sanierungsmaßnahme ein pH-Wert zwischen 7 und 8 als optimal angesehen wird.

3.2 Anlagenkonzeptionierung

3.2.1 Laborversuche

Initial wurden Abbauuntersuchungen unter Einsatz von unterschiedlichen Kohlenstoffquellen als Kulturmedium in Verbindung mit Proben aus dem Herd 1 durchgeführt. Je nach Zuschlagstoff konnte eine geringfügige bis fortgeschrittene Biostimulation des Cyanidabbaus festgestellt und die zugrunde liegende Theorie des Verfahrens damit bewiesen werden. Chemische Abbauuntersuchungen der Cyanid-, PAK- und Acridinon-belasteten Proben (Herd 1 + 2) mit Eisen(II) aktiviertem Persulfat und Fenton's Reagenz resultierten in Ergebnissen, die eine Abreinigung der Schadstoffe im GW ebenfalls möglich erscheinen ließen. Gemeinsam mit der zuständigen Behörde wurde sich für die Überführung der biologischen Variante ins Feld entschieden, da grundsätzlich eine ENA-Grundwasserzirkulation angestrebt wurde.

3.2.2 Feldversuch

Ziel des Feldversuches war es, eine intensive Grundwasserumwälzung mit vertikalen Filterelementen in einer lokal begrenzten Zirkulation aufzubauen. Unter Zugabe von Wirkstoffen sollte im aerobisierten Milieu ein biologischer Abbau der Schadstoffe bewirkt werden. In einem 10 x 10 m großen Testfeld bestehend aus einem zentralen Entnahmebrunnen und sechs zirkular angeordneten Infiltrationspegeln wurde technischer Sauerstoff injiziert und Wasser unter Zugabe der definierten Cosubstrate umgewälzt. Die Analytikergebnisse des Entnahmebrunnens sind in Abbildung 5 dargestellt. Innerhalb von knapp 50 Tagen nimmt die Cyanid-Konzentration von 4.300 µg/l auf 220 µg/l ab. Auch einen Monat nach Abschaltung ist kein Rebound Effekt zu beobachten.

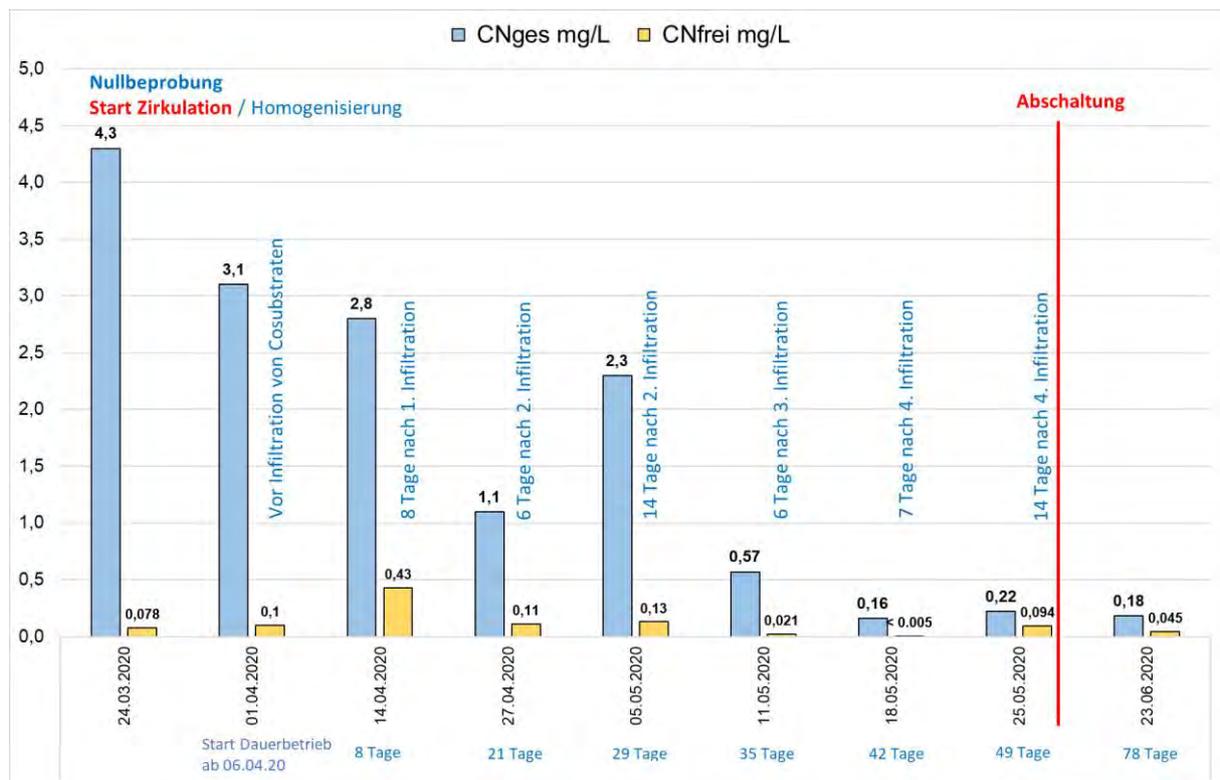


Abbildung 5: CN-Ergebnisse Entnahmebrunnen im Rahmen des Feldversuches, Sensatec (2020)

Angesichts der zu Beginn des Pilotversuches vorliegenden Unsicherheiten hinsichtlich der mikrobiellen Abbauprozesse, der standortspezifischen Begleitreaktionen sowie auch der bautechnischen Umsetzung hat sich das ENA in situ-Verfahren als erfolgreich erwiesen. Aus den erzielten Ergebnissen lässt sich auf Basis der Verringerung der Cyanidgehalte, der VOP-Entwicklung und der nachgewiesenen (mikrobiell induzierten) Temperaturerhöhung im Reaktionsraum ableiten, dass ein mikrobieller Abbau von Cyaniden stattgefunden hat. Weiterhin konnten die PAK ebenfalls in der Mehrzahl der beteiligten Pegel reduziert werden. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde sich für die großskalige Umsetzung der ENA in situ-Sanierung entschieden, bei zeitgleicher Überwachung der hydraulischen Bedingungen.

3.2.3 Sanierungsinfrastruktur

Grundsätzlich wird bei diesem Sanierungsverfahren der Boden in der ungesättigten Zone am Standort belassen und nicht saniert, da aufgrund der Versiegelung bzw. der Bebauung weder eine Gefährdung für den Wirkungspfad Boden-Mensch noch für den Pfad Boden-Grundwasser ausgeht. Gemäß den Voruntersuchungen sieht das Verfahren eine biologische Sanierung der Cyanid-, PAK- und Heterozyklenbelastung durch die Stimulation aerober Abbauprozesse vor. Zu diesem Zweck wurde im Jahr 2021 am Standort begonnen ein leistungsfähiges System zur Sauerstoffversorgung des Grundwasserleiters durch Injektion von technischem Sauerstoff aufzubauen. Parallel wurde ein Grundwasserzirkulationssystem zur raumwirksamen Verteilung von Wirkstoffen errichtet, mit dessen Hilfe Cosubstrate, pH-Regulatoren und Mikroorganismen im Belastungsbereich effektiv verteilt werden können. Schematisch sind in den folgenden Abbildungen die beiden Systeme dargestellt. Bei der Sanierungskonzeptionierung wurde darauf Wert gelegt, bereits bestehende GWM in den Zirkulationsbetrieb einzubinden und den Betrieb auf dem Gelände der Stadtwerke so wenig wie möglich einzuschränken. Generell wird Wasser im südlichen und westlichen Abstrom entnommen und dem System im Anstrom bzw. in die Sanierungsherde infiltriert, so dass Zirkulationszellen entstehen und es zu einer Durchmischung kommt. In die Infiltrationsbrunnen sollen dann entsprechend der nachgewiesenen Redoxbedingungen regelmäßig Cosubstrate zugegeben werden.

Durch die Zirkulation des Wassers verteilt sich auch der Sauerstoff gleichmäßig, so dass alle Bereiche davon profitieren. Die vorgesehene Bioxwand-Technologie basiert auf dem sensorüberwachten Eintrag von Reinsauerstoff über spezielle Druckinjektionslanzen. Diese Technik verfügt im Gegensatz zu anderen Reinsauerstoff-Eintragstechniken (wie z. B. iSOC-, Oxytec-Systeme) über umfangreiche Möglichkeiten zur Anpassung der Sauerstoffzufuhr durch Druck-, Volumenstrom- und Intervallsteuerung an die Gaseinspeicherung, die veränderliche Sauerstoffzehrung und Transportprozesse im Aquifer. Die Positionierung der Eintrags-elemente (Druckinjektionslanzen DIL) orientiert sich an der erkundeten Kernzone des vorgesehenen Behandlungsbereiches. Die Lanzenabstände begründen sich in der Größenordnung und Reichweite der Wirkstoffeinspeicherung, seiner Einlösung ins GW, des Transportes und Verbrauches. Die feinsandig-mittelsandig bzw. kiesige, geschichtete Struktur des Aquifers erleichtert die Sauerstoffverteilung in der Horizontale, sodass für gepulste Sauerstoff-Druckinjektionen eine entsprechend hohe Gasreichweite von bis zu 4,0 - 5,0 m im Radius zu rechnen ist. Jede Gaslanze soll in Abhängigkeit der geologischen Struktur und Grundwassermächtigkeit über eine Gaseintragebene nahe der Basis des GWL verfügen, um eine möglichst effektive Verteilung von Sauerstoff über den gesamten Aquifer zu erreichen.

Die Anlagensteuerung (Herd 2) erfolgt über zwei zentrale Schaltschränke für Sauerstoff- und Wassertechnik sowie mehrere im Sanierungsfeld verteilte dezentrale Verteilerkästen. Der Schadensherd 1 wird durch eine eigenständige kleine Zirkulationseinrichtung saniert.

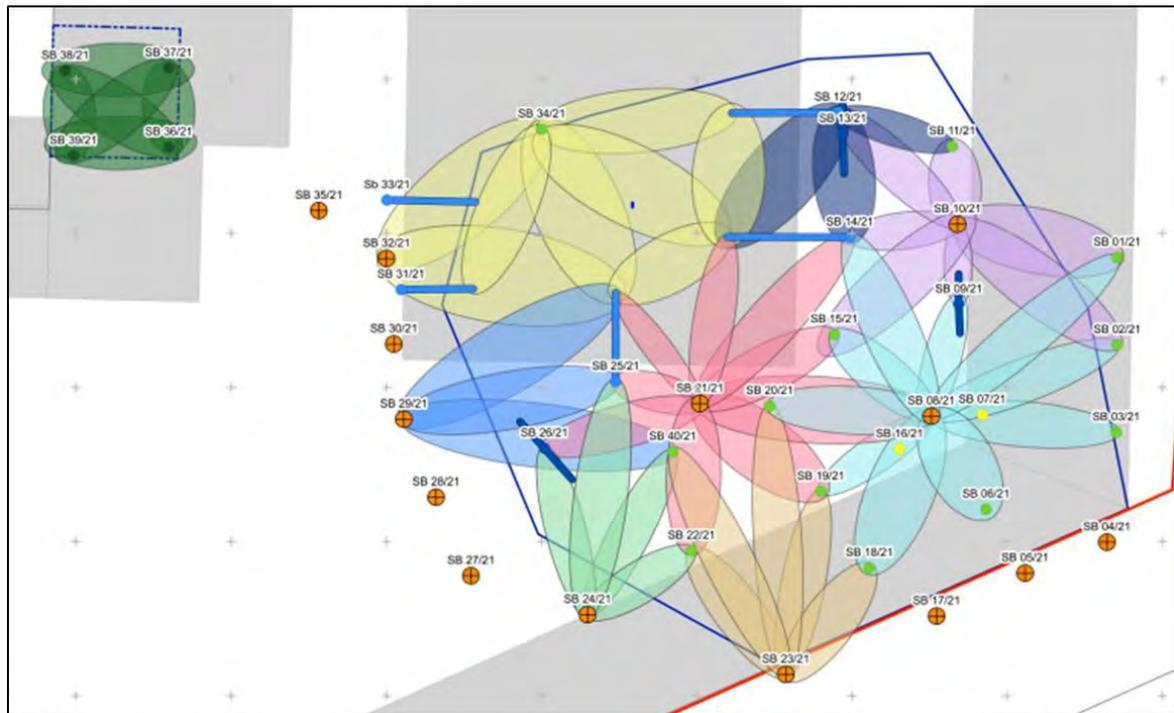


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wasserkirkulationszellen und Sanierungsinfrastruktur, Sensatec 2021

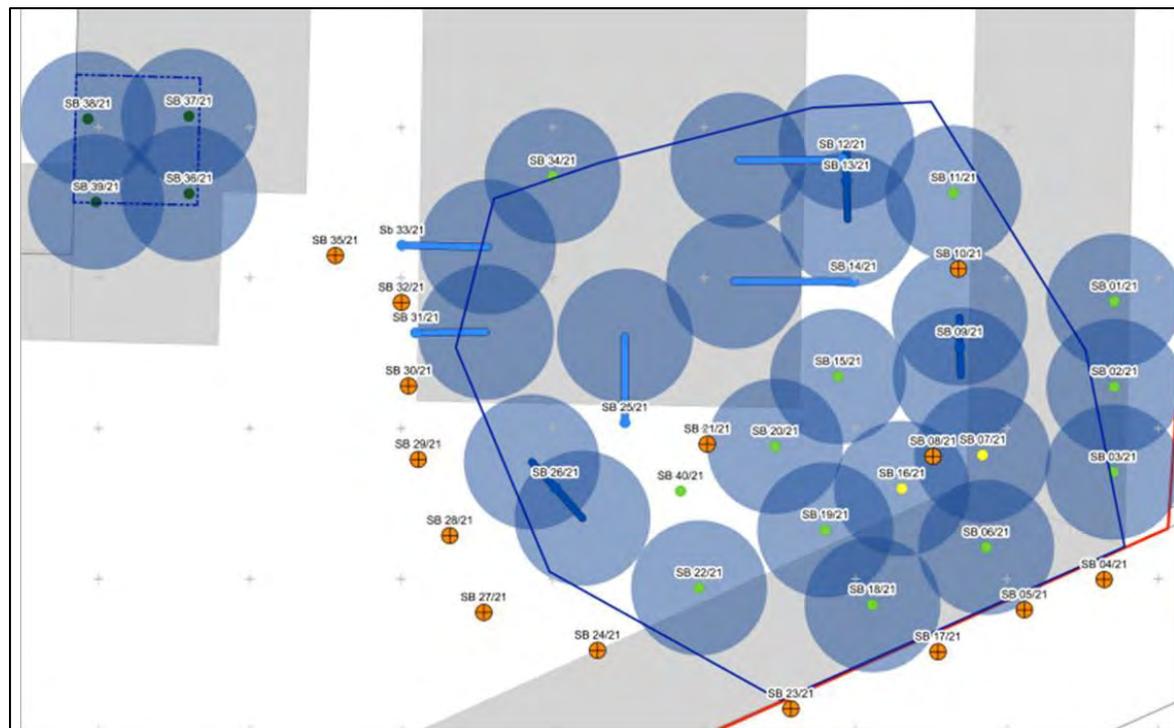


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Sauerstoffinjektionspunkte und deren Radius, Sensatec 2021

4 Anlagenbetrieb und -modifikation

Behördlich festgelegter Sanierungsbeginn war Januar 2022. Aufgrund unterschätzter Effekte durch die Eisen-/ Manganausfällung, einhergehend mit der Oxidation des Untergrundes,

wurde im 2. Halbjahr 2022 die Modifizierung der bestehenden Sanierungsinfrastruktur und Anlagentechnik am Standort durchgeführt. Ablagerungen im Leitungs- und Verteilersystem und den Brunnenpegeln führten zu einer sukzessiven Reduzierung der Infiltrationsraten sowie einer sehr wartungsintensiven Beeinträchtigung der Funktion von Bauteilen wie z.B. Magnetventilen und Filtersystemen. Durch ein Subunternehmen (Fa. Reeker Wassertechnik) wurde im Garagentrakt eine Kiesfilteranlage zur Enteisung installiert und vier weitere Infiltrationsbrunnen (SB 43/22 - SB 46/22) errichtet und in die Anlagentechnik integriert. Dementsprechend läuft das System erst seit Anfang 2023 stabil, so dass unter Berücksichtigung der Redoxbedingungen erst ab Frühjahr 2023 Cosubstrate zugegeben werden konnten.

Als Kontrollmedium und zur prozesstechnischen Optimierung wurden zwei Mangelfaktoranalysen anhand von Bodenproben aus drei Standorten durchgeführt. Dadurch konnten Rückschlüsse auf einen möglichen Substratmangel geführt werden. Als Folge der ersten Mangelfaktorenanalyse wurde im November 2023 begonnen das infiltrierte Wasser mit zusätzlichen Nährstoffen zu versetzen, um die Mikroorganismen zusätzlich zu stimulieren.

5 Grundwasserchemisches Monitoring

Damit den lokalen Mikroorganismen genügend Sauerstoff zur Verfügung steht ist es essentiell, eine Reihe von weiteren Parametern zu analysieren. Redoxreaktionen beeinflussen die Stabilität von Mineralen und die Mobilität der chemischen Elemente im Untergrund. Nach der Reduktion / Zehrung von Sauerstoff wird grundsätzlich Nitrat abgebaut, Eisen(III) wird zu Eisen(II) umgewandelt und schlussendlich kommt es zur Sulfatreduktion und Fermentation, wodurch sich Säuren bilden können.

Als Sekundärprozesse werden die biogeochemischen Prozesse bezeichnet, die neben dem eigentlichen Zielprozess (der natürliche Abbau von Cyanid-Verbindungen) durch den Einsatz der Wirkstoffe ausgelöst werden. Im Wesentlichen sind dies Redoxreaktionen durch die Übertragung von Wasserstoff und Sauerstoff aus der Verwertung des Substrates mit geochemischen Verbindungen aus Nitrat, Mangan, Eisen, Sulfat usw., welche dadurch reduziert oder oxidiert werden. In der nachfolgenden Tabelle sind die für die Sanierung relevanten geochemischen Parameter sowie deren Entwicklung aufgeführt und erläutert.

Tabelle 1: Erwartungswerte der in situ-Behandlung des Grundwasserschadens, Sensatec 2022

Parameter	Entwicklung	Begründung
Sauerstoff	Nimmt zu	Anreicherung des Grundwassers durch Direktgasinjektion
Sauerstoff	Nimmt ab	Oxidationsprozesse, Metabolisierung
DOC	nimmt ab	verfahrensbedingte Metabolisierung des zur Verfügung stehenden DOC (natürlich und Substrat)
DOC	Nimmt zu	Verfahrensbedingte Zunahme nach Zugabe von Kohlenstoffquelle
Sulfat	Nimmt zu	Verfahrensbedingte Schwankungen durch lokale Änderungen im Redoxpotential, Oxidation von Sulfiden (Pyrit) und biologische Verstoffwechslung von Nitrat
Eisen (gelöst)	nimmt ab	Verfahrensbedingte Abnahme durch Festbettoxidation
Eisen (gelöst)	nimmt zu	Verfahrensbedingte Zunahme durch Lösung von Eisen-Ionen aus Komplexen.
Nitrat	nimmt ab	Nitratgehalt beeinflusst u.U. den Cyanidabbau, wird bevorzugt metabolisiert.
Nitrat	Nimmt zu	Nitrat wird durch den Abbau von Cyaniden gebildet
Redoxpotential	nimmt zu	verfahrensgemäße Zunahme durch Verfügbarkeit von Sauerstoff im Grundwasser
pH	Nimmt ab	Störreaktion, Entstehung organischer Säuren v.a. bei Substratüberangebot bzw. zu rascher Freisetzung, bei pH < 6

Der pH-Wert liegt bei allen Messstellen über den Verlauf der Maßnahme im neutralen Bereich von 6.5 bis 7.5 und ist damit als positiv für die biologische in situ-Sanierung zu bewerten. Die Temperatur liegt in einem konstanten Bereich um 15°, wodurch die

Bioaktivität gefördert wird. Die Redoxpotentiale liegen in einem hohen Bereich und zeugen von guten Stoffwechselbedingungen. Während des Winters bzw. während des Weserhochwassers 2022/2023 führten u.a. die stationären Grundwasserverhältnisse zu einem erhöhten Redoxpotential durch längere Verfügbarkeit von mit Sauerstoff angereichertem Wasser. Im Winter 2023/2024 führten die etablierten mikrobiologischen Konsortien und damit die geförderten bio-geochemischen Prozesse im Untergrund hingegen zu einer Senkung des Redoxpotentials. Durch die zwangsweise reduzierte Zirkulationsleistung konnte der Sauerstoff nicht optimal im Untergrund verteilt werden. Durch die großflächigen Injektionskampagnen mit Wasserstoffperoxid ab der KW46/23 konnte das Redoxpotential wieder leicht erhöht werden.

Generell liegt durch die starke Kontamination eine Sauerstoffsinke vor und das Milieu ist anaerob. Eine Erhöhung der Werte von Nitrat und Sulfat gehen einher mit einer Reduzierung der Cyanidgehalte im ähnlichen Zeitraum. Beobachtet wurde eine Steigerung der Nitratgehalte seit der Grundwassererhöhung ab KW46/23. Eine Steigerung der Nitrat- und Sulfatgehalte auf natürlichem Wege ist unwahrscheinlich. Dies unterstützt somit die Annahme, dass die der Sanierung zugrunde liegenden biologischen und geochemischen Verfahrensprozesse, indem Cyanid-Verbindungen durch Aktivität von Mikroorganismen aufgebrochen werden und Nitrat gebildet wurde. Die geogenen Eisen-Gehalte im Grundwasser und Boden führen zu einer konkurrierenden Zehrung des Sauerstoffs. Bei erhöhter Verfügbarkeit von Sauerstoff wird eine zeitverzögerte Erhöhung der Nitratgehalte erwartet.

6 Schadstoffliches Monitoring

Für die ganzheitliche Bewertung des Sanierungsfortschritts wurde anhand von 29 repräsentativen Messstellen eine mittlere Cyanidbelastung gebildet, um die Gesamtbelastung im Untersuchungsgebiet darstellen zu können. Die Mobilisierung der Cyanide durch hohe GW-Stände stellt eine wesentliche Komponente des Sanierungskonzeptes dar und war eine erwartete und erwünschte Beobachtung. In Abbildung 8 werden die Mobilisierungsprozesse in Korrelation zu dem GW-Stand ersichtlich. Während der saisonalen Aufhöhungen korrespondierten die Cyanid-Konzentrationen und erhöhten sich im gleichen Zeitraum.

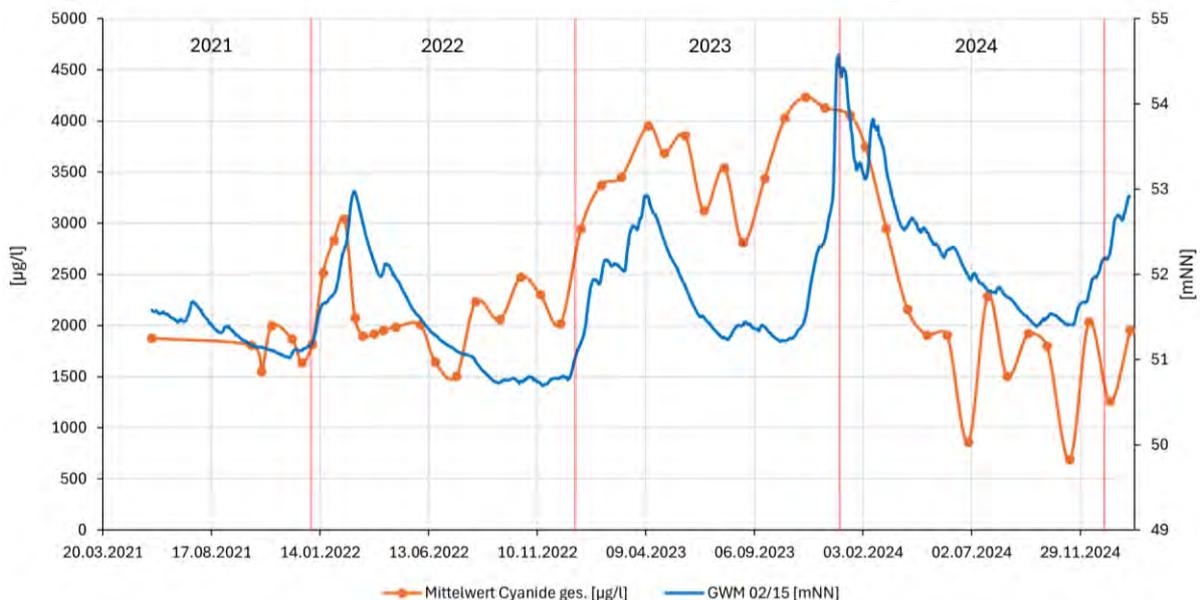


Abbildung 8: Entwicklung der Cyanid-Konzentration im Untersuchungsgebiet in Relation zum Grundwasserstand

Im Winter 2023/2024 wurden die höchsten Wasserstände seit Beginn der projektinternen Aufzeichnung erhoben, jedoch ohne die erwartbare drastische Zunahme der Cyanid-Konzentrationen wie in den Vorjahren. Im Gegenteil wurde bis Juni 2024 trotz erhöhter

Grundwasserstände ein massiv abfallender Trend beobachtet. Die Gesamtbelastung fiel erstmals unter das Niveau der Nullbeprobung (2021), sodass im Umkehrschluss ab diesem Zeitpunkt die mikrobiellen Abbauprozesse die Mobilisierungsraten überstiegen. Im 2. Halbjahr 2024 undulierten die gemessenen Cyanidkonzentrationen stark im Zusammenhang mit gezielteren Wirkstoffinfiltrationen und Brunnenregenerationen. Die mittlere Konzentration bewegte sich jedoch weiterhin unterhalb der initialen Beprobung im Mai 2021.

7 Fazit und Ausblick

Im Betriebsjahr 2023 wurden die bisher höchsten Cyanidkonzentrationen seit Sanierungsbeginn erkundet. Dies wurde auf das sehr lange Hochwasser der Weser im Winter 2022/2023 sowie die hohen Grundwasserstände Ende 2023 zurückgeführt. Die Prozesse führten zu einer verstärkten Mobilisation der Schadstoffe aus der Bodenmatrix der phreatischen und vadosen Zone und werden grundsätzlich für den erfolgreichen Sanierungsverlauf benötigt. Die fortlaufende Wirkstoffzugabe kann durch dieses Prinzip alle belasteten Bodenbereiche des Standortes erfassen. Trotz eines im Jahr 2024 massiven Grundwasserhochstandes bis an den Auelehm fielen die Cyanidkonzentrationen erstmals unter das Niveau vor Sanierungsbeginn. Durch die etablierte Sauerstofftechnik zur Direktgasinjektion wird in Verbindung mit der Grundwasserzirkulation eine verstärkte Anreicherung des Grundwassers mit Sauerstoff gewährleistet. Anhand der Mangelfaktoranalyse wurde festgestellt, dass insbesondere die Zugabe spezieller Nährstoffe den mikrobiellen Abbau nochmals stark fördern können.

Der bisherige Sanierungsverlauf wird als positiv bewertet. Die letzten Analysen zeigen eine dauerhaft voranschreitende Zehrung von komplexen Cyaniden unter der stetigen Anreicherung des Grundwassers mit Sauerstoff und der Zugabe von Cosubstraten. Untermauert wird der mikrobiologische Abbau durch korrelierende Entwicklungen der Nitratgehalte.

Literaturverzeichnis

- Dubbey & Holmes 1995: Dubbey S. K. & Holmes D. S., Review – Biological cyanide destruction mediated by microorganisms, World Journal of Microbiology & Biotechnology 11, 257 – 265, Februar 1995
- Oelsner 2003: Oelsner K., Abbauverhalten von komplexen Cyaniden unter besonderer Berücksichtigung der Eisen(III)-Hexacyanoferrat(II)-Verbindungen und Beurteilung des Gefahrenpotenzials für den Menschen und die Umweltschutzgüter, 20.10.2003
- UBA (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr Umweltbundesamt.
- WSV 2024: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes – Pegeldatenbank, bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde, abgefragt am 31.07.2024

Anschriften der Autorinnen/Autoren

Aglaia Nagel
Mull & Partner Ingenieurgesellschaft mbH
Hans-Böckler-Allee 9
30173 Hannover
Telefon: +49 511 12314 034
E-Mail: aglaia.nagel@mup-group.com
Internet: www.mullundpartner.de

Sebastian Reimers und Anja Wilken
Sensatec GmbH
Friedrichsorter Str. 32
24159 Kiel
Telefon: +49 431 38900 911
E-Mail: a.wilken@sensatec.de
Internet: www.sensatec.de

Hessens größte ungesicherte Altablagerung: Nachhaltiges Sicherungskonzept und Stand der Dinge

Dr. Ulrich Langer und Werner Fleischer

1. Standort

1.1 Lage und Umgebung

Südöstlich von Hanau, zwischen dem Betriebsgelände des Kohlekraftwerks Staudinger und dem Main, westlich der Gemeinde Großkrotzenburg im Main-Kinzig-Kreis befindet sich die Altdeponie Eisert. Nördlich grenzt unmittelbar die Betriebsdeponie (Granulatdeponie) des Kraftwerks Staudinger an.

Da sich die Altdeponie in unmittelbarer Mainnähe befindet, kann der Standort von Hochwasserereignissen betroffen werden. Die Altdeponie liegt zumindest in den Randbereichen entlang der südlichen und nordwestlichen Deponiegrenze innerhalb des Überschwemmungsgebiets. Bei einem Hochwasserereignis besteht somit die Gefahr einer weiteren Auswaschung von Schadstoffen. Abb. 1 zeigt die Altdeponie und das nähere Umfeld.



Abb. 1: Altdeponie und näheres Umfeld (Quelle: Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation)

1.2 Historie

Die Altdeponie wurde zwischen 1950 bis 1978 in einer ehemaligen Kiesgrube betrieben. Im Betriebszeitraum wurden dabei ca. 1,5 Mio. t Abfall (ca. 800.000 m³) auf einer Fläche von ca. 9 ha abgelagert. Es wurden feste, flüssige und pastöse Abfälle angenommen und nach Art und Zeitraum in unterschiedlichen Bereichen abgelagert:

- Zentralbereich mit einer Fläche von ca. 6 ha,
- Südwestbereich (sogenannter "Ami-See") mit einer Fläche von ca. 1,8 ha.
- Ostbereich und ehemaliger Betriebshof mit einer Fläche von ca. 1,2 ha

Im Zentralbereich wurden unterschiedliche Abfälle (Hausmüll, Gewerbeabfall, Kunststoffe, Reststoffe aus der chemischen Industrie) abgelagert. Die flüssigen und pastösen Abfälle wurden primär in den Zentralbereich verbracht. Die Altdeponie verfügte über Dammwege, die vermutlich zum Antransport und Abkippen der Abfälle dienten. Der Zentralbereich wurde von der Chronologie her zuerst verfüllt.

Der südwestliche Deponiebereich ("Ami-See") und ein Teil des östlichen Randbereichs wurden später mit inerten bzw. mineralischen Abfälle und Altreifen verfüllt. Der östliche Bereich wurde im Zuge des Deponiebetriebs nicht vollständig verfüllt. Im nordöstlichen Bereich verblieb eine Grube, welche im Zuge der vorbereitenden Maßnahmen im April 2019 verfüllt wurde.

Die im Zentralbereich abgelagerten Abfälle sind nach heute geltenden Kriterien als gefährlich einzustufen. Historische Unterlagen lassen zudem erkennen, dass es im zentralen Ablagerungsbereich der Altdeponie wiederholt zu Selbstentzündungen der Inhalte kam. Auf der Grundwasseroberfläche hat sich eine zähe Schicht aus einer Kohlenwasserstoffmischung angesammelt, die v.a. die Beprobung im Zuge des Grundwassermonitorings erschwert. Einen Eindruck über die Beschaffenheit der Deponieinhaltsstoffe vermitteln die Bilder in Abb. 2, die während der Erkundungsarbeiten von 2005 bis 2015 aufgenommen wurden.



Abb. 2: Inhalte der Altdeponie: 1 Altreifen, 2 chem. Reststoffe, 3 MKW-Phase bei Probe-nahme, 4 Autowrack; (Quelle: Dokumentation der Erkundungen)

Die Altdeponie ist ungesichert, d.h. Rand-, Basis- und Oberflächenabdichtungen sind nicht vorhanden. Nach Betriebsende wurde der Ablagerungsbereich lediglich mit einer dünnen Lage an humosem Oberbodenmaterial abgedeckt. Niederschlag versickert in den vorhandenen Deponiekörper und löst Schadstoffe aus dem Abfall, die dann mit dem Grundwasser aus der Altdeponie ins Mainvorland und weiter in den Main transportiert werden.

1.3 Geologische Verhältnisse - Untergrundaufbau und Lagerungsverhältnisse

Die geologischen/hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich der Altdeponie Eisert wurden im Zeitraum 1964 bis 2016 detailliert erkundet. In den oberflächennahen, quartären Ablagerungen wurden 72 Bohrungen abgeteuft, davon wurden 50 zu Grundwassermessstellen ausgebaut. Die tiefer liegenden tertiären Schichten wurden mit insgesamt 85 Bohrungen erschlossen, davon wurden 78 zu Grundwassermessstellen ausgebaut. Der größte Teil der Grundwassermessstellen wurde im Nahbereich der Altdeponie außerhalb des Ablagerungsbereichs eingebaut. Nicht mehr für die Überwachung erforderliche Grundwassermessstellen wurden zwischenzeitlich zurückgebaut.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Erkundungen wurde ein Modell zum Untergrundaufbau und zu den Grundwasserverhältnissen entwickelt. Im Untergrund der Altdeponie Eisert wurden drei lithologische Einheiten von GOK nach unten wie folgt differenziert:

- Einheit (1): Quartäre Kiessande/ einschließlich Abfallablagerungen und (überwiegend mineralische) Auffüllungen.
- Einheit (2): Jüngere tertiäre Ablagerungen (Wechselagerung von Sanden, Schluffen und Tonen). In der Basis dieser Einheit steht in allen ausreichend tiefen Bohrungen ein charakteristischer grau-schwarzer Ton an, der als „schwarzer Ton“ oder „Leithorizont“ bezeichnet wurde.
- Einheit (3): Ältere tertiäre Ablagerungen (Wechselagerung von Sanden, Schluffen und Tonen), die unterhalb des Leithorizonts anstehen.

1.4 Sanierungs- bzw. Sicherungskonzept

Unter Berücksichtigung des Grundsatzes „Minimierung des Schadstoffaustrags aus der Altdeponie Eisert unter verhältnismäßigem Mitteleinsatz“ wurde eine technische Sicherung der Altdeponie beschlossen.

Die Maßnahmen zur Sicherung der Altdeponie umfassen im Wesentlichen den Einbau von vertikalen und horizontalen Dichtungselementen (Kapselung durch Spund-/Dichtwand des hochbelasteten Zentralbereichs und Oberflächenabdichtung mit Rekultivierung, siehe Abb. 3/Abb. 3). Eine aktive Wasserhaltung im Dichtwandtopf ist unter den gegebenen geologischen/hydrogeologischen Randbedingungen nicht bzw. nur in Ausnahmesituationen erforderlich. Durch den Verzicht auf die Wasserförderung werden sogenannte "Ewigkeitskosten" vermieden.

Die Einbindung der vertikalen Dichtungselementen erfolgt in den mehrere Meter mächtigen „schwarzen Ton“. Der Sicherungsbereich der Altdeponie ist ca. sechs Hektar groß und wird von der vorgesehenen Trasse des vertikalen Dichtungselements abgegrenzt (Verlauf der geplanten Dichtwandtrasse siehe Abb. 4).

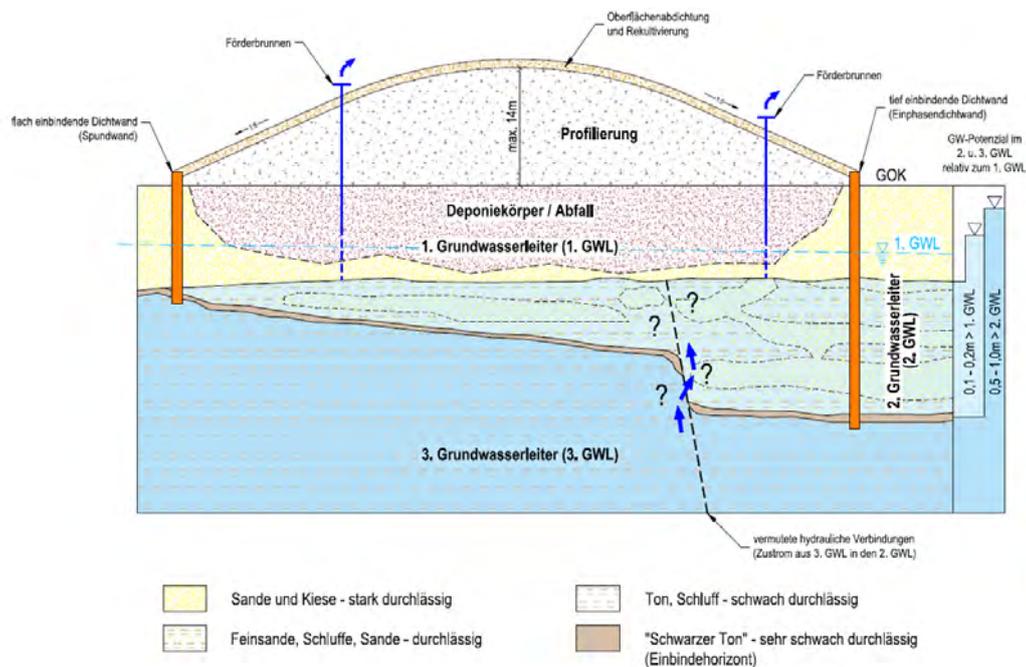


Abb. 3: Schematisiertes Sicherungskonzept (nach HLNUG Nov. 2015)

Die zur Sicherung der Altdeponie notwendigen Arbeiten können nach der vorgesehenen zeitlichen Abfolge der Ausführung wie folgt aufgegliedert werden:

- Vorbereitende Arbeiten (Einbau einer Arbeitsebene auf den Abfallablagerungen; Bau einer Schiffsanlegestelle; Aufhaltung von Rekultivierungsböden).
- Abschnitt 1: Profillierung und Erdarbeiten:
 - Einbau eines Randdammes
 - Profillierung der Deponie mit insgesamt ca. 600.000 t Material
- Abschnitt 2: Abdichtungsarbeiten:
 - Spund-/Dichtwand
 - Oberflächenabdichtung
 - Begrünung/Rekultivierung

Im **Abschnitt 1** wird am Rand des Sicherungsbereichs ein Randdamm errichtet, welcher bauzeitlich als Fahrweg für den Einbau der vertikalen Dichtung genutzt werden soll. In einigen Teilabschnitten der Dichtwandtrasse sind Altreifenablagerungen vorhanden, welche ausgehoben und durch geeignete Böden ersetzt werden.

Um die sich aus den Deponieinhalstoffen ergebenden Setzungsdifferenzen auszugleichen, wird die Deponieoberfläche mit ca. 600.000 t Material profiliert. Hierfür werden gering belastete mineralische Abfälle der Deponieklasse DK I eingesetzt. Die Profillierungsmaterialien werden größtenteils mittels Schiffen antransportiert. Diese Transportart ist im Vergleich zum LKW-Transport umweltfreundlicher und bringt zudem durch eine geringe verkehrsbedingte Störanfälligkeit eine höhere Ausführungssicherheit mit sich. Die Profillierung soll nach Abklingen der durch die Auflast induzierten Setzungen eine gleichmäßige Geometrie der Oberflächenabdichtung (ebenmäßiges Dachprofil) gewährleisten.

In **Abschnitt 2** werden im Wesentlichen Abdichtungsarbeiten ausgeführt. Als vertikale Abdichtung wird im westlichen Viertel der Trasse eine Spundwand und in der übrigen Trasse eine Einphasendichtwand in bis zu 38 m Tiefe eingebaut. Sowohl die Spundwand als auch die Dichtwand binden in eine flächig vorhandene, mehrere Meter mächtige Tonschicht ein („schwarzer Ton“). Im Anschluss wird eine mehrkomponentige Oberflächenabdichtung nach dem technischen Standard für die Deponieklasse II eingebaut und mit der vertikalen Abdichtung im Bereich des Randdammes verbunden. Der in Abschnitt 1 errichtete Randdamm

wird im Bereich der Privatgrundstücke südlich der Altdeponie abgeflacht und anschließend – genau wie die Oberflächenabdichtung - begrünt.

Über Kombinationsbrunnen/Deponiegasfenster austretendes Deponiegas (Schwachgas) wird mittels Methanoxidation unschädlich gemacht. Sollte eine Wasserhaltung im Dichtwandtopf zeitlich befristet erforderlich werden, soll aus den Kombinationsbrunnen Sickerwasser gefördert und entsorgt bzw. bei größeren Mengen über eine Behandlungsanlage geklärt werden.

1.5 Bauliche Umsetzung

1.6 Vorbereitenden Maßnahmen

Die Oberfläche der Altdeponie war bis 2017 nur durch eine dünne Bodenschicht gesichert. Eine Befahrung der Altdeponie mit schweren Gerätschaften war aufgrund fehlender Tragfähigkeit nicht möglich. Aus diesem Grund wurde im Grundrissbereich der Altdeponie eine ca. 1 m mächtigen Schicht/Arbeitsebene aus mineralischen Reststoffen eingebaut (ca. 100.000 t Material, überwiegend Schlacke aus der Hausmüllverbrennung).

Die Anlieferung der mineralischen Reststoffen erfolgte 2017 über die Straße. Als alternative Anliefermöglichkeit wurde der Schiffstransport erfolgreich geprüft. Ende 2018 wurde daher eine Schiffsanlegestelle am Nordufer des Mains auf Höhe der Altdeponie Eisert errichtet. Mit den Schiffstransporten wurde eine Verkehrsentlastung der angrenzenden Gemeinden erreicht. Der Binnenschifftransport ist im Vergleich zum LKW-Transport umweltfreundlicher (eine Schiffsladung ersetzt 80-90 LKW). Der Betrieb der Schiffsanlegestelle/Umschlaganlage wurde nach dem BImSchG für den Umschlagen von Abfällen bis zur Deponieklasse DK-I nach DepV genehmigt.

Nach der Fertigstellung der Schiffsanlegestelle wurden zunächst ca. 100.000 m³ unbelastetes Bodenmaterial für eine spätere Verwendung bei den Sicherungsmaßnahmen (Verfüllung der Restgrube am Ostrand der Altdeponie, Errichtung des Randdamms, Rekultivierung) per Schiff angeliefert. Der Boden wurde in zwei Halden auf der Altdeponie gelagert.

Da für die Sicherung südlich angrenzende Privatgrundstücke überbaut werden müssen, wurden vor der Umsetzung der Sicherung rund 20 Gestattungsverträge mit betroffenen Eigentümern abgeschlossen. Weitere Gestattungsverträge wurden mit Grundstückseigentümern im weiteren Umfeld geschlossen, um die Zufahrt zur Altdeponie ungehindert nutzen zu können und um über weiter nördlich gelegene Grundstücke für Zwischenlagermöglichkeiten zu verfügen. Hierzu wurden Informationsveranstaltungen organisiert, Informationsbriefe verfasst, sowie nach Notwendigkeit und Interesse direkt mit den Eigentümern verhandelt.

Naturschutzrechtliche Belange wurden bei der Ausführung der vorbereitenden Arbeiten und unmittelbar bei der Sicherungsplanung berücksichtigt. Für den landschaftspflegerischen Begleitplan wurde der Naturbestand erhoben und mit dem späteren gesicherten Zustand verglichen. Vorlaufende sowie spätere Ausgleichs- und Pflegemaßnahmen wurden identifiziert und Schon- und Brutzeiten berücksichtigt, um baubedingte Nachteile so weit wie möglich zu minimieren. Im Vorfeld der Sicherung wurden bereits Ausgleichsmaßnahmen umgesetzt (Errichten von Benjeshecken aus Totholz, Schaffen von Nistmöglichkeiten für Fledermäuse und Einrichtung von Eidechsenhabitats außerhalb des Baufelds, sogenannte CEF-Maßnahmen: „Continuous Ecological Functionality“).

1.7 Sicherungsmaßnahmen - Abschnitt I

1.7.1 Zwischenlager

Auf einer nördliche der Altdeponie liegenden, bis dato landwirtschaftlich genutzten Fläche wurde ein nach BImSchG genehmigtes Zwischenlager für Böden errichtet. Hierzu wurde ein

Bodenschutzkonzept erstellt und umgesetzt. Die Zwischenlagerfläche liegt zudem unterhalb von Hochspannungsleitungen. Es waren daher auch besondere Vorgaben des Arbeitsschutzes zu definieren und zu beachten. So wurde beispielsweise die maximal zulässige Arbeitshöhe eingeschränkt, um den festgelegten Sicherheitsabstand zu den Hochspannungsleitungen einhalten zu können. In das Zwischenlager wurden Teile des auf der Altdeponie zwischengelagerten unbelasteten Bodenmaterial verbracht.

1.7.2 Technische Ausführung von Dammbau und Profilierung (Teil 1.1)

Der Arbeitsbereich wurde mit einem Bauzaun gesichert. Aus naturschutzrechtlichen Gründen wurden Teilabschnitte des Bauzauns als Sichtschutzzaun ausgeführt. Im nördlich gelegenen Einfahrtsbereich wurde ein elektrisches Rolltor installiert. Auf der am nordöstlichen Rand der Altdeponie liegenden Baustelleneinrichtungsfläche (BE-Fläche) wurde die Infrastruktureinrichtung der Baustelle errichtet (Schwarz-Weißanlage, Besprechungs-, Mannschafts- und Materialcontainer, Reifenwaschanlage).



Abb. 4: Übersichtslageplan mit Bauabschnitten

Die Beräumung der Dichtwandtrasse und der Einbau des Randdamms wurde in sechs Bauabschnitten (BA) ausgeführt (siehe Abb. 4). Die Dichtwandtrasse wurde auf der gesamten Länge des **BA 1** mit einem bis zu 3,5 m tiefen Baggerschurf erkundet. Störstoffe (Altreifen) für den späteren Dichtwandbau wurden nicht angetroffen (Abb. 5). Die ausgehobenen Abfälle wurden in den Profilierungsbereich verbracht und dort eingebaut. Der Schurf wurde mit unbelastetem Boden verfüllt. Der BA 1 konnte binnen kurzer Zeit im Juli 2023 fertiggestellt werden.

Im **BA 2** zwischen der Altdeponie und der Granulatdeponie (Abb. 6) war nur abschnittsweise ein geringer Abtrag/Bodenaustausch erforderlich. Dieser Abschnitt wurde im Februar 2023 abgeschlossen.

Im **BA 3** wurde am südöstlichen Rand der Altdeponie im Zeitraum Juni bis Juli 2023 der Randdamm unmittelbar auf den gewachsenen Boden eingebaut (Abb. 7). Die dort im direkten Abstrombereich der Altdeponie liegenden Grundwassermessstellen wurden vor Einbau des Randdamms verlängert und mit Schachtringen gesichert.

Der **BA 4** befindet sich zwischen dem hochbelasteten Zentralbereich und dem mit Reifen und mineralischem Material verfüllten südwestlichen Randbereich (Ami-See). Da der Einbau der Dichtwand durch die Altreifen nicht möglich ist wurden in diesem Bauabschnitt die vorhandenen Abfallablagerung bis zum gewachsenen Boden ausgehoben.



Abb. 5: BA 1: Baggerschurf im BA 1 und teilweiser Bodenaustausch



Abb. 6: BA 2: Abtrag zur Herstellung der Umfahrung am nördlichen Rand



Abb. 7: BA 3: Damm mit gesicherten Grundwassermessstellen

Der Aushub in BA 4 erfolgte in offener Baugrube in zwei Schritten (Abb. 8). Von einer Voraushubebene (bis ca. 2 m u GOK) aus wurde der Aushub bis auf OK anstehender Boden (OK tertiäre Ablagerungen in ca. 5-6 m Tiefe unter Voraushubniveau) vorgenommen. Ausgehoben wurde ein überwiegend aus Reifen bestehendes Abfallgemisch. In der Spund-/Dichtwandtrasse wurden diese Abfälle auf einer Breite von etwa 2 m durch unbelasteten Boden ersetzt. Der Bodenaustausch und der Einbau des Randdammes erfolgte im Zeitraum September 2023 bis Februar 2024.



Abb. 8: BA 4: 1 Voraushubebene, 2 Reifenlage, 3 Tiefenaushub



Abb. 9: BA 5: Dammbau mit Stabilisierungsmaterial

Im westlichen Teilabschnitt des **BA 5** lag das Höhenniveau der GOK im Ausgangszustand nur wenige Dezimetern über dem Seewasserspiegel. Die GOK war vernässt und nicht befahrbar. Dieser Teilabschnitt wurde daher mit Grobschlag (Gesteinsbruch) stabilisiert (Abb. 9). Danach konnte der Boden in den Damm eingebaut werden. Der Untergrund im östlichen Teilabschnitt des BA 5 war tragfähig, so dass der Dammbau ohne zusätzliche Stabilisierung erfolgen konnte. Die hier befindlichen Grundwassermessstellen wurden vor Einbau des Bodens ebenfalls verlängert und gesichert.

Der **BA 6** verläuft parallel zum südöstlichen Seeufer des Kraftwerksees. Die Spundwandtrasse verläuft parallel zum Ufer innerhalb des Kraftwerksees im Abstand von einigen Metern von der Altdeponiegrenze. Der Randdamm wurde im See auf einer Vorschüttung aus Grobschlag errichtet. Vor Einbau der Vorschüttung aus Grobschlag wurden die auf dem Grund des Kraftwerksees liegenden Störstoffe (überwiegend Reifenkarkassen) abgeräumt. Mittels Langarmbagger wurde deponieseitig und von der eingebauten Vorschüttung die Reifenkarkassen vom Seegrund entfernt. Abb. 10 zeigt die entsprechenden Arbeitsschritte im

BA 6. Um den Räumungserfolg zu überprüfen, wurden vom Seeufer aus Spundbohlen in den dort am Seegrund anstehenden Einbindehorizont ("schwarzer Ton") eingerammt und auch wieder gezogen.



Abb. 10: BA 6: 1 Entfernung der Störstoffe auf dem Seegrund, 2 Einbau der Vorschüttung aus Grobschlag, 3 Verfüllung des Dambeckens, 4 Dammaufbau

1.7.3 Profilierung (Teil 1.2 bis 2.2)

Mit der Profilierung wurde in der westlichen Hälfte der Altdeponie begonnen. Der Materialtransport erfolgte entweder per LKW direkt in den Einbaubereich oder bei Schiffstransport von der Umschlaganlage mittels Transportfahrzeugen zum Einbauort. Dort wurde das Profilierungsmaterial mittels Raupe verteilt und mit einer Schaffußwalze lagenweise verdichtet eingebaut. Die Einbauqualität wurde durch die örtliche Bauüberwachung und den Fremdprüfer überwacht. Verwendet wurde aufbereitete HMV-Schlacke, Bodenmaterial, Straßenaufbruch und Bauschutt. Der Abfallaushub aus den BA 4 und BA 6 wurde ebenfalls in die Profilierung eingebaut. Reifen und Reifenkarkassen wurden mit einem Aggregat zerkleinert, mit HMV-Schlacke vermischt und lagenweise in die Profilierung eingebaut.

In Teil 1.2 wurde im Zeitraum Juni 2023 bis Anfang Februar 2024 etwa 220.000 t Profilierungsmaterial angeliefert und eingebaut. Störungen während der Anlieferung traten nicht auf. Im Oktober 2023 konnte aufgrund des geringen Rheinwasserstands die Transportschiffe nicht vollständig beladen werden. Die Sollmenge konnte jedoch durch Erhöhung der Anzahl der Lieferungen in den Folgemonaten erreicht werden. In Teil 2.1 wurden ab April 2024 bis Februar 2025 etwa 275.000 t Profilierungsmaterial angeliefert und eingebaut. Die Arbeiten erfolgten ohne Ablaufstörungen. Der letzte Teil der Profilierung in Teil 2.2 ist für

2025 vorgesehen. Die Leistungen werden derzeit vergeben. Bis voraussichtlich Ende des Jahres sollen weitere ca. 200.000 t geliefert und in die Profilierung eingebaut werden.

1.7.4 Naturschutzaspekte in der Ausführung

Die Baumaßnahme wird durch eine ökologische Fachgutachterin begleitet, die in engem Kontakt mit dem zuständigen Dezernat für Naturschutz beim Regierungspräsidium Darmstadt steht. Mit ihr werden alle Eingriffe in die Natur abgestimmt und Freigaben für unvermeidbare Eingriffe eingeholt. Regelmäßige Begehungen der ökologischen Baubegleitung haben sichergestellt, dass während der Baufeldfreimachung nur aus naturschutzfachlicher Sicht freigegebene Bereiche überbaut wurden.

In BA 5 hatten sich aufgrund der feucht-warmen Witterung im Frühjahr 2023 zahlreiche Tümpel aufgestaut. Darin hatten sich Sekundärbiotope ausgebildet, aus denen vor Bebauung Amphibien und Larven evakuiert werden mussten.

Beim Bau des Raddamms in den Kraftwerksee (BA 6) haben Fachgutachter für Fische und Muscheln sichergestellt, dass durch die Baumaßnahme auch die Gewässerfauna geschont wird. Vor dem Eingriff in den Kraftwerksee wurden der vorhandene Aalbesatz über Elektrofischerei geborgen. Während der Räumung des Seegrunds waren ebenfalls Gutachter zugegen, die den Aushub auf Muschelbesatz untersuchten.

1.8 Ausblick

1.9 Sicherung Abschnitt II, Teil 3

Im Zuge des letzten Teils der Profilierung werden in 2025 auch die Vorrichtungen zur Wasserhaltung (Kombinationsbrunnen) und voraussichtlich die zur Beobachtung der Wasserstände im Dichtwandtopf erforderlichen Grundwassermessstellen eingebaut. Mit den Kombinationsbrunnen soll in Verbindung mit der Gassammelschicht Deponiegas aus der Altdeponie geleitet werden. Das Deponie(schwach)gas soll später über Oxidationsfenster in der rekultivierten Oberfläche in die Atmosphäre entlassen werden. Sofern eine Wasserhaltung im Dichtwandtopf erforderlich werden sollte, wird über die Kombinationsbrunnen Sickerwasser gefördert, in Tanks gefasst und einer Entsorgung zugeführt.

Die vertikale Abdichtung soll 2026/2027 eingebaut werden. Etwa ein Drittel der Trasse soll als Spundwand, die restliche Trasse soll als Einphasendichtwand ausgeführt werden. Nach Ringschluss der Dichtwand soll die Oberflächenabdichtung möglichst zeitnah fertiggestellt werden. Der Aufbau der Oberflächenabdichtung entspricht dem in der Deponieverordnung für Deponien der Klasse DK II vorgegebenen Standard. Vorgesehen sind zwei Dichtungselemente: eine mineralische Abdichtungskomponente, die gleichzeitig als Auflager für die BAM-geprüfte Kunststoffdichtungsbahn dient, welche das zweite Dichtungselement bildet. Darüber schließt sich der übliche Aufbau aus Schutz-/Trennvliesen, Drainage- und Rekultivierungsschicht an.

1.10 Anschriften der Autoren

Dr. Ulrich Langer
HIM GmbH
Bereich Altlastensanierung - HIM-ASG -
Waldstraße 11
64584 Biebesheim
Telefon: 06258 895 37 20
E-Mail: ulrich.langer@him.de
Internet: www.him-asg.de

Werner Fleischer
ISK Ingenieurgesellschaft
für Bau- und Geotechnik mbH
Ferdinand-Porsche-Ring 1
63110 Rodgau
Telefon: 06106 26993 –17
E-Mail: fleischer@isk-ing.de
Internet: www.isk-ing.de



BORN | ERMEL | Ingenieure

Ihr Ansprechpartner für Altlastenerkundung und -sanierung,
Bodenmanagement, Rückbau und Deponieplanung.

WIR planen Zukunft. Planen Sie mit uns.

ACHIM ■ AURICH ■ ESSEN ■ FRANKFURT ■ DRESDEN ■ MÜNCHEN

Abstracts

Podiumsdiskussion

Aktuelle Akkreditierungspraxis – ein Erfahrungsaustausch

Moderation: Karsten Helms, Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover

10.

Impulsvorträge und Diskussion

Dr. Heike Manke und Dr. Sebastian Kitzig, DAkKS Berlin

Dipl.-Geol. Karsten Heine, NLBL Hannover

Dr. Charlotte Boltz, HPC AG Harburg/Schwaben

Dr. Felix Geldsetzer, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) Augsburg

Dipl.-Geol. Klaus Bücherl, V18 e.V. Regensburg

Podiumsdiskussion „Aktuelle Akkreditierungspraxis – ein Erfahrungsaustausch“

Die Akkreditierung gem. DIN ISO EN/IEC 17025 bzw. die Notifizierung gem. §18 BBodSchG als Prüflaboratorium ist mittlerweile die übliche Praxis, wenn es um die Vergabe von Aufträgen mit öffentlichen Mitteln geht. Aufgrund der anzuwendenden Qualitätskriterien u.a. bei der Probennahme hat sich die Vergabe solcher Leistungen auch im Privatsektor etabliert.

Mit der Novellierung der BBodSchV sowie der Einführung der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) bekommt die Akkreditierung eine noch höhere Aufmerksamkeit. Die Anforderungen der EBV verlangen in Zukunft eine Vielzahl von Prozessen zur Beprobung bzw. Beurteilung bei der Herstellung und Zertifizierung von Ersatzbaustoffen, die der Akkreditierung unterliegen. Um die Anforderungen zu bewältigen, müssen mit hoher Wahrscheinlichkeit weitere Unternehmen und/oder Personen sich der Akkreditierung / Notifizierung unterwerfen.

Es stellt sich daher die Frage, ob dieses mit der DAkkS als normorientierte Akkreditierungsstelle und mit den Notifizierungsstellen partnerschaftlich durchführbar ist, da derzeit unterschiedliche Maßstäbe bzw. „Ansprüche“ angesetzt werden, die bisher u.a. durch die Heranziehung der Fachmodule harmonisiert wurden.

Derzeit ist nicht eindeutig nachvollziehbar, wie die zukünftige Akkreditierungspraxis über die Normanforderungen hinaus und die Zusammenarbeit mit den Notifizierungsstellen erfolgen kann. Darüber hinaus scheuen viele Ingenieurbüros und/oder Personengesellschaften etc. aufgrund der Kostenentwicklung und des Verwaltungsaufwandes vor der Akkreditierung zurück.

In diesem Spannungsfeld wollen wir mit folgenden Personen diskutieren:

- Dr. Heike Manke (DAkkS)
- Dr. Sebastian Kitzig (DAkkS)
- Dr. Klaus Bücherl (V18 e.V. / TEWAG)
- Dr. Charlotte Boltz (HPC)
- Dr. Felix Geldsetzer (LfU Bayern)
- Karsten Heine (NLBL – Leitstelle des Bundes für Boden- und Grundwasserschutz)
- Moderation: Karsten Helms (Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH)

Geplanter Ablauf:

- Begrüßung
- Einführungsstatements (DAkkS und LfU Bayern)
- Moderierte Podiumsdiskussion
- Offene Diskussion mit dem Publikum

Wissen, was drin ist.



Umweltanalytik auf höchstem Niveau

- Akkreditierte Probenahme
- Analytik, Beratung und Schulung nach EBV/BBodSchV
- Untersuchungen von u.a. Böden, Bauschutt, Abfall, EBS/SBS, Holz
- Asbest in Bauschutt, Bausubstanz und Luft
- Beprobung und Analytik von u.a. Trink- und Abwasser, Grund- und Oberflächengewässer
- PFAS, Pestizide, PCDD/F, Flammschutzmittel, NSO-Heterocylen, Sprengstofftyp. Verb. u.v.m.
- Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Die **GBA Group** ist ein internationales Life Science Dienstleistungsunternehmen mit einem breiten Angebot an analytischen, logistischen und fachspezifischen Services in den Bereichen Pharma, Medizinprodukte, Kosmetika, Chemie, Lebensmittel, Trinkwasser und Umwelt.

Das Leistungsangebot umfasst Laboranalytik, Datenmanagement, spezielle logistische Dienstleistungen im Bereich klinischer Studien sowie die Beratung von privaten Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen im Zusammenhang mit deren Aktivitäten im Bereich Forschung, Produktentwicklung, Markterschließung und Verbraucherschutz.

Mit ihren Dienstleistungen leistet die GBA Group einen nachhaltigen Beitrag für Gesundheit, Umwelt und Gesellschaft.

Die GBA Group betreibt Standorte in Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Österreich, Polen, Spanien und den Vereinigten Staaten.



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14170-01-00

Abstracts

04. April 2025

Vorsorgender Bodenschutz / Naturschutz

Moderation: Dr. Susanne Döhler, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft u. Geologie, Dresden

11.

Bodenkundliche Baubegleitung – Fluch und Segen

Dr. Ulrike Meyer, UMWELTKONZEPT DR. MEYER, Berlin

12.

Ausbau der Höchstspannungsnetze - Bodenkundliche Baubegleitung im Rahmen der Energiewende

Dr. Benjamin Schieber, TABERG Ingenieure GmbH, Trier

Bodenkundliche Baubegleitung – Fluch und Segen

Ulrike Meyer

1 Einleitung

Die 2023 novellierte BBodSchV bestimmt die näheren Anforderungen an die nachhaltige Sicherung und Wiederherstellung der Funktionen des Bodens unter Berücksichtigung des gegenwärtigen Standes der wissenschaftlichen Erkenntnisse.

Die BBodSchV enthält u. a. damit auch Regelungen zur bodenkundlichen Baubegleitung.

2 Bodenkundliche Baubegleitung

Bei Baumaßnahmen kommt es stets zu einer flächenhaften Inanspruchnahme von Böden.

Die **bodenkundliche Baubegleitung (BBB)** dient der Vermeidung und Minimierung von Bodenschäden bei Bauvorhaben. Sie ist insbesondere bei großen Projekten für erneuerbare Energien wie Freileitungen, Erdkabeln, Windrädern relevant, die oft in unversiegelten Landschaften realisiert werden. Seit dem **1. August 2023** ist sie durch die **Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)** für Bauvorhaben ab **3.000 m²** verpflichtend, um insbesondere die natürlichen Bodenfunktionen zu erhalten.

3 DIN 19639

Die **DIN 19639 „Bodenschutz bei Planung und Durchführung von Bauvorhaben“** (2019) dient als Handlungsanleitung zum baubegleitenden Bodenschutz.

Ohne BBB drohen gravierende Schäden wie **Verdichtung, Einmischung von Fremdstoffen, Vermischung von Ober- und Unterboden** sowie **Lagerungsschäden**.

Ein zentrales Element der BBB ist das **Bodenschutzkonzept**, das Standortfaktoren, Bodentypen, potenzielle Konfliktbereiche und Schutzmaßnahmen beinhaltet. Dabei sind unterschiedliche Bodentypen in ihrer Empfindlichkeit gegenüber Verdichtung zu berücksichtigen. Maßnahmen zur Schadensvermeidung umfassen beispielsweise **Lastverteilungsplatten, den Einsatz von Kettenfahrzeugen statt Reifen** sowie die **Berücksichtigung der Niederschlagsdaten**.

Auch dienen alternative Bauverfahren wie Unterbohrung empfindlicher Böden dem vorsorgenden Bodenschutz auf schwierigen Standorten.

4 Fluch und Segen der BBB

Die BBB ist ein **Segen**, da

- sie seit 1. August 2023 endlich rechtlich vorgeschrieben ist
- sie Bodenschutz bewirkt bevor Schäden entstehen
- Boden nur noch so weit wie erforderlich in Anspruch genommen und so weit wie möglich geschont wird
- somit Bauvorhaben und Bodenschutz vereint möglich ist.

Die BBB kann ein **Fluch** sein,

- wenn BBB auch bei Vorhaben mit intensiver Versiegelung und Bebauung gefordert wird
- wenn eine Prüfung gemäß DIN 19639 fehlt, dennoch wird BBB in der Baugenehmigung festgelegt wird
- wenn großer Aufwand ohne entsprechenden Nutzen (z. B. Bodenkartierung mit dem Bohrstock, Tensiometerfelder) in Ausschreibungen verlangt wird
- wenn fehlende Kommunikation zwischen BBB und Baufirma besteht

Wie kann BBB **gut funktionieren**?

- wenn Bauvorhaben hinsichtlich des Erfordernisses einer BBB gemäß DIN 19639 geprüft werden
- wenn bodenrechtliche Auflagen frühzeitig abgestimmt werden
- wenn Bauvorhaben angepasst werden: Unterbohren von sehr empfindlichem Boden
- wenn die Kommunikation zwischen BBB und Tiefbaufirma (z. B. Muster-Haufwerke) klappt,
- wenn „Schulen statt Schimpfen“ angewendet wird
- wenn vorsorgender Bodenschutz umgesetzt wird z. B. Lastverteilungsplatten, Wetterdaten, etc.

5 Fallbeispiele

Über positive und negative Erfahrungen in der Praxis der bodenkundlichen Baubegleitung sowie auch über die Auswirkungen einer fehlenden BBB wird in Beispielen berichtet.

Literaturverzeichnis

DIN 19639 (2019): Bodenschutz bei Planung und Durchführung von Bauvorhaben (derzeit in Aktualisierung)

Bundesverband Boden Merkblatt 2 (2013): Bodenkundliche Baubegleitung, Leitfaden für die Praxis (derzeit in Aktualisierung), www.bvboden.de

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (2014): Leitfaden Bodenschutz auf Linienbaustellen, www.schleswig-holstein.de/LLUR/

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (2021): Leitfaden zum Bodenschutz beim Bauen, www.schleswig-holstein.de/LLUR/

Meyer, U., Wienigk, A. (2016): Baubegleitender Bodenschutz. Schnelleinstieg für Architekten und Bauingenieure, essentials. www.springer.com/de/book/9783658132897

Anschriften der Autoren

Dr. Ulrike Meyer
UMWELTKONZEPT DR. MEYER
Fritschestr. 26
10585 Berlin
Tel.: 030-34702299
Mobil: 0157-72998547
E-Mail: umeyer@umweltkonzept-dr-meyer.de
Internet: www.umweltkonzept-dr-meyer.de

Ausbau der Höchstspannungsnetze – Bodenkundliche Baubegleitung im Rahmen der Energiewende

Benjamin Schieber

1 Energiewende und Netzausbaubedarf

Die Energiewende beschreibt den Umstieg bei der Energieversorgung von fossilen Energieträgern zu erneuerbaren Energieträgern. Entsprechend einer Reduzierung des Anteils von fossilen Energieträgern wie z.B. Kohle, Erdgas oder Erdöl, soll der Anteil von regenerativen und nachhaltig nutzbaren Energien erhöht werden. Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung charakterisiert erneuerbare Energien durch deren Gewinnung aus kurzfristig von selbst erneuerbaren Quellen, wobei die Nutzung nicht zur Erschöpfung dieser Quelle beiträgt [1]. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass die Nutzung dieser Energieträger nicht zu einem Konzentrationsanstieg von Treibhausgasen in der Atmosphäre führt. Hierzu zählen folglich Sonnenenergie, Windkraft, Erdwärme, Wasserkraft sowie aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnene Biomasse.

Im Zuge der Energiewende gab es, bestimmt durch den Zweck des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG), bereits verschiedene Ausbauziele. Nach § 1 Abs. 2 EEG 2021 [2] lag der Zielwert für den Anteil von erneuerbaren Energien an der Energieerzeugung bzw. des erzeugten Stroms (Bruttostromverbrauch) in Deutschland bereits bei 65 %. Gemäß der aktuell gültigen Fassung des EEG soll der Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms bis zum Jahr 2030 auf 80 % gesteigert werden (vgl. § 1 Abs.2 EEG 2023 [3]).

Ein Großteil dieser Energie soll durch Windkraft gewonnen werden. Hierzu entstehen insbesondere in der Nord- und Ostsee leistungsstarke Windparks. Dieser Strom muss dorthin transportiert werden, wo er verbraucht wird, d.h. die Windparks müssen an das Übertragungsnetz angeschlossen werden. Die vorhandenen Höchstspannungsverbindungen sind in weiten Teilen bereits überlastet und es müssen neue Verbindungen geschaffen werden. Bei den sog. „Stromautobahnen“ bzw. Hauptübertragungsleitungen handelt es sich überwiegend um Gleichstrom-Höchstspannungsleitungen. Insbesondere solche Leitungen zur Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) sind gemäß § 3, Abs. 1 BBPIG vorzugsweise als Erdkabel zu errichten und zu betreiben. Dieser Grundsatz wurde auch in weitere, für die Genehmigungsverfahren oftmals einschlägige Normen (v.a. das Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz – NABEG, sowie das Gesetz zum Ausbau von Energieleitungen – EnLAG) übertragen. Demzufolge werden beim Netzausbau im Rahmen der Energiewende umfangreiche Eingriffe in die anstehenden Böden erforderlich.

Gemäß Monitoringbericht der Bundesnetzagentur (BNetzA) für das dritte Quartal 2024 [5] liegt die Gesamtlänge der EnLAG- und BBPIG-Vorhaben derzeit bei ca. 16.800 km, wovon knapp 20 % realisiert sind (vgl. Abbildung 1).

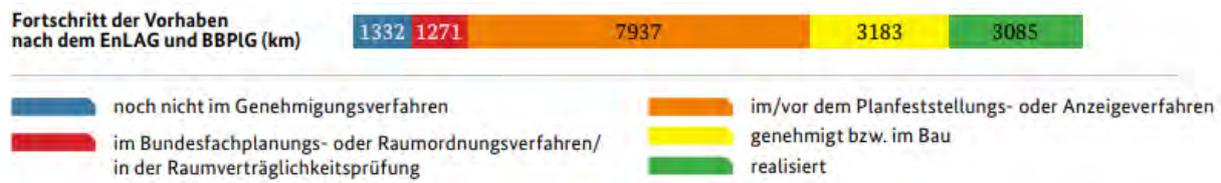


Abb.1: Fortschritt der EnLAG- und BBPIG-Vorhaben gem. Monitoringbericht Q3/24 [5]

2 Bodenschutzfachliche Grundlagen

2.1 Rechtliche Vorgaben

In Deutschland wird der Boden rechtlich durch das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) geschützt, mit dem Zweck, „nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen“ (§ 1 BBodSchG [6]). Nach § 3 Abs. 1 BBodSchG findet dieses Gesetz auf schädliche Bodenveränderungen und Altlasten Anwendung, soweit die in Abs. 1 enumerativ aufgeführten Vorschriften Einwirkungen auf den Boden nicht regeln.

In § 7 BBodSchG wird die Pflicht zur Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen hervorgehoben. Vorsorgemaßnahmen sind geboten, wenn wegen der räumlichen, langfristigen oder komplexen Auswirkungen einer Nutzung auf die Bodenfunktionen die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht (Besorgnisgrundsatz). Zur Erfüllung der Vorsorgepflicht sind Bodeneinwirkungen zu vermeiden oder zu vermindern, soweit dies auch im Hinblick auf den Zweck der Nutzung des Grundstücks verhältnismäßig ist.

Auf der exekutiven Ebene soll die Umsetzung der legislativ festgesetzten Ziele (BBodSchG) durch die Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV) sichergestellt werden. Die novellierte BBodSchV [7] wurde im Rahmen der Mantelverordnung (MantelV) im Juli 2021 beschlossen und ist im August 2023 in Kraft getreten. Gemäß § 4 Abs. 5 BBodSchV kann bereits ab einer Flächengröße von 3.000 m² der Baumaßnahme von der zuständigen Behörde die Erarbeitung eines Bodenschutzkonzeptes sowie eine bodenkundliche Baubegleitung für die Zulassung des Vorhabens verlangt werden.

Ergänzend zur bundesweiten gesetzlichen Normierung gehen bundeslandspezifische Regulationen aus den jeweiligen Gesetzen auf Landesebene (z.B. Landesbodenschutzgesetze) hervor.

Außerhalb der o.g. Rechtsnormen sind bestimmte DIN-Normen für die bodenschutzfachlichen Belange im direkten Zusammenhang mit den hier beschriebenen Vorhaben relevant. Dabei handelt es sich v.a. um die DIN 19639: 2019-09 (Bodenschutz bei der Planung und Durchführung von Bauvorhaben), die DIN 18915:2018-06 (Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenarbeiten) sowie die DIN 19731: 2023-10 (Bodenbeschaffenheit, Verwertung von Bodenmaterial). Im Vergleich zu den Rechtsnormen sind DIN-Normen nicht automatisch (im rechtlichen Sinne) bindend. DIN-Normen können eine Rechtsverbindlichkeit erlangen, wenn eine Verordnung darauf verweist (z.B. Verweise der BBodSchV auf die o.g. DIN-Normen im Sinne der Vorsorgeanforderungen gemäß § 4 sowie der allgemeinen Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden gemäß § 6).

Neben gesetzlichen und technischen Normen kommen in der praktischen Anwendung zudem oftmals Leitfäden, Handlungsempfehlungen und Richtlinien zum Tragen.

2.2 Umfang der Bodeneingriffe und relevante Wirkfaktoren

Üblicherweise wird die sog. „Regelbauweise“ zur Herstellung des Leitungsgrabens in der offenen Bauweise definiert. Als offensichtlicher Eingriffsumfang stellt sich die Herstellung des Leitungsgrabens selbst dar, d.h. der Boden wird – je nach Vorhaben zumeist bis in eine Tiefe von ca. 1,5 bis 2,0 m – trapezförmig ausgehoben. An der Basis des freigelegten Planums wird die Bettungszone (gängig sind z.B. ZFSV- oder Sandbettungen) inkl. Leerrohrsystem hergestellt. Hier kommt es zu einer Verdrängung der originären Substratschichten. Darüberliegend wird der Graben nach Maßgabe der bodenschutzfachlichen Anforderungen (siehe Kap. 3) verfüllt und rekultiviert. Jedoch erstreckt sich der von der Baumaßnahme betroffene Arbeitsstreifen über den Kabelgraben hinaus, d.h. es werden weitere Flächen für

Baustraßen, Mietenlagerflächen und ggf. Grundwasserhaltungsmaßnahmen in Anspruch genommen (vgl. beispielhaftes Regelgrabenprofil in Abbildung 2).

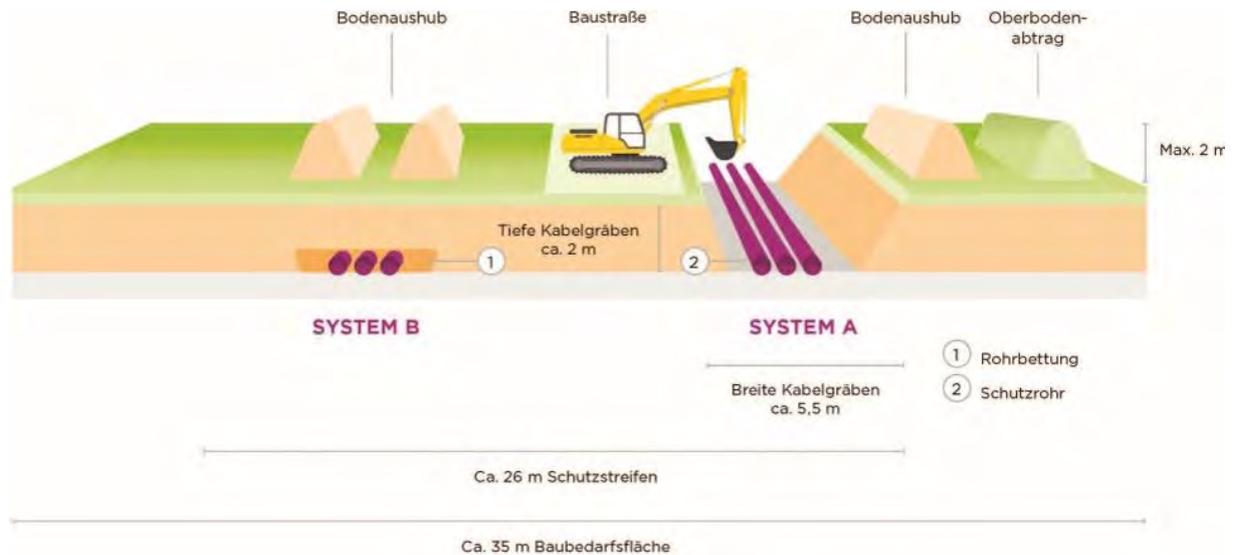


Abb.2: Schematische Darstellung des Regelgrabenprofils für die derzeit im Bau befindliche Erdkabeltrasse A-Nord der Amprion GmbH.

Quelle: <https://a-nord.amprion.net/Projekt/Bauweise/> (Abruf am 28.02.2025)

Weitergehende Eingriffe in die anstehenden Böden treten bspw. im Bereich von Muffenstandorten, Baustelleneinrichtungsflächen, Sonderbaustellen (z.B. Schachtbauwerke) und dauerhaften Zufahrten auf.

Entsprechend der Maßnahmen sind insbesondere die baubedingten Wirkfaktoren umfangreich ausgeprägt. Hierbei handelt es sich v.a. um

- Verdichtung (z.B. Lasteinträge durch Baugeräte oder die Rückverfüllung),
- Vermischung (z.B. durch unzureichende Trennung verschiedener Bodenhorizonte),
- Bodenerosion (z.B. infolge des Abtrags der Vegetationsdecke),
- Verlust diagnostischer Merkmale bzw. Bodeneigenschaften (z.B. durch den Aushub von Archivböden),
- Belüftung (z.B. durch die bauzeitliche Zwischenlagerung an der Oberfläche),
- Entwässerung (durch Grundwasserhaltungsmaßnahmen),
- Externe Stoffeinträge (z.B. Betriebsmittel durch Havarien oder Tragschichtreste bei unvollständigem Rückbau).

Aus Sicht der Anlagenherstellung spielt v.a. die lokale Versiegelung (z.B. an Schachtstandorten) sowie ein bedarfsweise erforderlicher Bodenaustausch eine zentrale Rolle. Bei letzterem Faktor kommt es zu einem Einbau von ortsfremdem Material, da z.B. das anstehende Substrat aufgrund bodenphysikalischer Eigenschaften nicht für die Herstellung einer Bettungszone geeignet ist.

In Bezug auf betriebsbedingte Wirkfaktoren ist schwerpunktmäßig eine potenzielle Beeinflussung des Temperaturhaushalts der Böden durch betriebsbedingte Wärmeemissionen zu untersuchen.

3 Aufgaben der Bodenkundlichen Baubegleitung

3.1 Aufgaben in der Planungsphase

Die DIN 19639 unterscheidet in Bezug auf die Planung und Durchführung von Bauvorhaben zwischen 6 Phasen bzw. Arbeitsschritten [8]:

- Phase 1: Genehmigungsplanung
- Phase 2: Ausschreibung
- Phase 3: Bau
- Phase 4: Rekultivierung
- Phase 5: Zwischenbewirtschaftung (vorhabenbezogen)
- Phase 6 (optional): Maßnahmen bei Funktionseinschränkungen / Nachsorge / Folgenutzung

Die zentrale Aufgabe in der Phase 1 ist die Erstellung eines Bodenschutzkonzeptes. In diesem Rahmen ist das Schutzgut Boden zunächst zu erfassen und zu bewerten. Darauf folgend sind – in enger Abstimmung mit den Planungsbeteiligten – die erforderlichen Maßnahmen zum Bodenschutz festzulegen. Dies betrifft sowohl Vermeidungs- als auch Minderungsmaßnahmen.

Bereits in frühen Planungsphasen erfolgt durch die Bodenkundliche Baubegleitung (BBB) eine Erfassung relevanter Kriterien für die Planung der Erdkabelleitungen anhand allgemein zugänglicher Datengrundlagen. Dabei werden insbesondere klein- und mittelmaßstäbige Bodenkarten hinsichtlich relevanter Kriterien (z.B. Empfindlichkeit, Schutzwürdigkeit bzw. Funktionserfüllung) ausgewertet. Es erfolgt eine stetige Beratung der Vorhabenträgerseite sowie der Planungsbeteiligten in Bezug auf bodenschutzfachliche Belange bei der räumlichen Trassenplanung. Dies beinhaltet insbesondere iterative Vorgänge im Rahmen der Feintrassierung (z.B. Empfehlung zur Trassenführung in besonders kritischen Bereichen) sowie der Planung von Bodenuntersuchungen, im Sinne der Datenerhebung gemäß DIN 19639, entlang der Trasse. Neben bodenkundlichem und bodenschutzfachlichem Fachwissen sind ausgeprägte Kenntnisse in der Geodatenverarbeitung in dieser Phase unerlässlich.

Mit zunehmender Detailtiefe bei der Trassierung sowie der Datenerhebung werden einschlägige Erfassungs- und Bewertungsmethoden zur Beurteilung der Bodenfunktionen und Empfindlichkeiten angewandt. Da die vorhabenspezifische Ausarbeitung geeigneter Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen unter Berücksichtigung einer vorhabenbezogenen Wirkungsanalyse zentrale Aspekte des zu erarbeitenden Bodenschutzkonzeptes sind, ist auf die Bedeutsamkeit der Empfindlichkeit der anstehenden Böden, angesichts der erwartbaren Wirkintensitäten, hinzuweisen.

Neben der Kernthematik zur planungsbegleitenden Erarbeitung geeigneter Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für die Herstellung der Schutzrohranlage sind zumeist weitere Teilgebiete von Relevanz. So kann die BBB ebenso bei der Erarbeitung von Konzepten zum Schutz des Bodens im Rahmen der – zumeist zum Bau vorlaufenden – archäologischen Prospektion mitwirken. Auch die Schnittstelle zum Bodenmanagement kann in Teilen oder gar vollständig durch die BBB bereits im Rahmen der Genehmigungsphase gutachterlich begleitet werden.

In Bezug auf Fragestellungen zur Ausgleichs- und Kompensationsthematik ist eine enge Zusammenarbeit mit den umweltplanerischen Gewerken essenziell. Entsprechende Auswertungen und Einschätzungen der BBB in Bezug auf die Schutzgüter Boden und Klima

(z.B. hinsichtlich kohlenstoffreicher Böden) tragen zur Gesamtkonzeption für die Kompensation von Eingriffen in Natur und Landschaft bei.

Zudem nimmt die BBB bedarfsweise an Öffentlichkeitsveranstaltungen (z.B. Informationsveranstaltungen, Erörterungstermine etc.) teil. Hierbei sollen bodenschutzfachliche Belange im Hinblick auf die bauliche Realisierung gegenüber Trägern öffentlicher Belange oder direkt Betroffenen erläutert werden und etwaige Rückfragen sowie Einwendungen fachspezifisch bearbeitet werden.

Eine Beteiligung der BBB im Rahmen der Ausschreibungsphase kann entscheidend dazu beitragen die Anforderungen an den Bodenschutz mit den weiteren Projekttrandbedingungen (z.B. Bauleistungen, Bauzeitenfenster etc.) zu harmonisieren und eine möglichst zuverlässige Umsetzung aller Anforderungen in der Bauphase vorzubereiten.

3.2 Aufgaben in der Bauphase und Rekultivierungsphase

Das typische Aufgabenprofil der BBB in der Bau- und Rekultivierungsphase lässt sich im Wesentlichen aus den Anforderungen der DIN 19639 ableiten. An dieser Stelle soll gezielt auf Besonderheiten für Baumaßnahmen im Rahmen des Übertragungsnetzausbaus eingegangen werden.

Eine besondere Herausforderung liegt in der großräumigen Eingriffsgeometrie für diese Art von Linienbaustellen sowie der damit einhergehenden bauleistungs- und bauleistungs- dynamik. Die Größenordnung reicht von Teilverkabelungsabschnitten in der Größenordnung von < 1 km bis hin zu Baulosen von bis zu > 100 km. Während kleinere Bauabschnitte problemlos im Sinne einer bedarfsweisen Präsenz durch eine Person flexibel abgedeckt werden können, kann eine adäquate bodenschutzfachliche Begleitung der Maßnahme ab mehreren Dutzend Kilometern nur durch eine vollzeitige Einbindung der BBB gewährleistet werden. In besonders großen Streckenabschnitten kann auch eine vollzeitig eingebundene BBB keine ausreichende Ortspräsenz gewährleisten und es sind simultane BBB-Kapazitäten, d.h. der Einsatz mehrerer qualifizierter Personen, sicherzustellen. Dabei ist zu beachten, dass die Baustelle entsprechend dem Baufortschritt ständig „wandert“ und je nach Projektorganisation und projektspezifischen Zielsetzungen mehrere Bauabschnitte innerhalb einzelner Baulose gleichzeitig baulich bearbeitet werden. Dies erfordert in Bezug auf die BBB ein hohes Maß an Flexibilität und organisatorischen sowie kommunikativen Grundkenntnissen.

Angesichts der Eingriffsgröße sind ständige Eingriffe im Bereich sensibler Böden und Nutzungsformen (in weiten Teilen landwirtschaftlich genutzte Flächen) unvermeidbar. Neben kommunikativen Fähigkeiten ist in dieser Hinsicht insbesondere die kollaborative Arbeitsfähigkeit gefragt. Es resultieren zahlreiche Schnittstellen aus den Themengebieten der Eigentümerkommunikation sowie privatrechtlicher Grundvoraussetzungen, baulicher Anforderungen, vorbereitender Arbeiten/Maßnahmen, ökologischer Belange, arbeitsschutztechnischer Anforderungen sowie der bodenschutzfachlich relevanter Aspekte.

Bei solchen vorbereitenden Arbeiten bzw. Maßnahmen kann es sich z.B. um voreilende Gewerke im Sinne von Kampfmittelvoruntersuchungen/-räumungen sowie archäologischen Untersuchungen oder vorbereitende Maßnahmen wie die ggf. vorgezogene Begrünung von Baubedarfsflächen handeln.

Im Idealfall können Bauabschnitte, Einzelmaßnahmen und bodenschutzfachliche Randbedingungen unter Berücksichtigung potenzieller Bauzeitenfenster sowie unterschiedlicher Eingriffsempfindlichkeiten harmonisiert werden. Hierzu bieten die Maßnahmen aufgrund der Streckenlänge oftmals ein gutes Grundpotenzial, allerdings sind Konfliktpotenziale zwischen allgemein umweltfachlichen Belangen sowie baulichen Zielsetzungen (z.B. aus logistischen oder terminlichen Gründen) nie vollständig vermeidbar. An dieser Stelle kann erneut auf die besondere Relevanz organisatorischer und

kommunikativer Fähigkeiten, jedoch auch auf eine besondere Sorgsamkeit bei der Dokumentation, hingewiesen werden.

Letzterer kommt auch eine hohe Bedeutung bei Fragestellungen zu Themen wie der Rekultivierung und einer etwaigen Zwischenbewirtschaftung zu. Bei einer bodenschutzfachlich möglichst optimierten Bauausführung können langfristig baubedingte Auswirkungen auf ein „nutzungsverträgliches“ und bodenschutzfachlich vertretbares Mindestmaß reduziert werden. Dies bedeutet, dass die Bodeneigenschaften nach Beendigung der Baumaßnahme, hinsichtlich der natürlichen Bodenfunktionen, wieder den Eigenschaften vor einer Inanspruchnahme dieser Fläche entsprechen. Außerhalb des Kabelgrabens kann dies durch die Umsetzung der empfohlenen Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen (z.B. Vermeidung von Eingriffen in besonders empfindliche Böden durch Prüfung von Alternativen oder Minderung der Lasteinwirkungen von Baugeräten durch lastverteilende Maßnahmen, vgl. Abbildung 3) bestmöglich realisiert werden. Herausfordernd ist zudem vielmals die Wiederverfüllung des Kabelgrabens. Neben dem schichtgetreuen Wiedereinbau (entsprechend natürlicher Bodenhorizonte nach bodenkundlicher Systematik) muss die natürliche Lagerungsdichte bestmöglich wiederhergestellt werden. Dies ist nur bei geeigneten Bodenverhältnissen und einem lagenweisen Wiedereinbau mit angepasster Verdichtungsenergie (z.B. behutsames Andrücken mittels Baggerschaufel) möglich. Während die Beweissicherung bei großen Linienbaustellen üblicherweise mittels Luftbildaufnahme erfolgt, können einzelne Kontrollversuche (z.B. Entnahme ungestörter Proben) dazu beitragen die Vorgehensweise beim Wiedereinbau im laufenden Baubetrieb zu kalibrieren.



Abb.3: Beispiel für lastverteilende Maßnahmen zum Schutz des Bodens im Bereich der bauzeitlichen Baubedarfsfläche (hier: Einsatz von sog. Baggermatratzen aus Buchenholz)

Je nach Empfindlichkeit des Bodens und dem Erfolg zur Umsetzung der festgelegten Schutzmaßnahmen kann das Erfordernis sowie der Umfang einer darauffolgenden Zwischenbewirtschaftungsphase variieren. Die BBB hat hierbei, wie auch in der gesamten Bauphase, einen fachgutachterlich beratenden Charakter (keine Weisungsbefugnis) und spricht entsprechende Empfehlungen aus. Die Umsetzung ist im Einzelfall mit den flächenbewirtschaftenden Personen oder Eigentumpersonen abzustimmen. Es empfiehlt sich eine ausreichend hochauflösende Dokumentation der Bauphase, um einzelfallspezifische Empfehlungen mitteilen zu können (z.B. schneller Wiedereinstieg in die konventionelle Bearbeitung bei optimalem Bauablauf und wenig empfindlichen Böden oder mehrjährige Zwischenbewirtschaftung – ggf. mit Tieflockerungsbedarf – in ungünstigen Situationen).

Wie obenstehend beschrieben, sind Eingriffe in landwirtschaftlich genutzte Flächen unausweichlich. Gerade vor diesem Hintergrund ist die Saatgtauswahl – dies betrifft auch

bauzeitliche Begrünungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen – an die Flächen- und Bewirtschaftungsverhältnisse vor Ort anzupassen.

4 Zusammenfassung

Der Übertragungsnetzausbau für erneuerbare Energien und das Themenfeld des vorsorgenden Bodenschutzes sind – insbesondere vor dem Hintergrund der üblicherweise priorisierten Erdkabelbauweise – stark miteinander verknüpft. Ein Großteil der erforderlichen Netzausbaumaßnahmen muss noch stattfinden bzw. wird derzeit baulich realisiert.

Die Bodenkundliche Baubegleitung kann über alle Projektphasen erheblich dazu beitragen die vorhabenbezogenen Auswirkungen auf das Schutzgut Boden zu reduzieren, d.h. zu vermeiden oder zu vermindern. Erste Kontrolluntersuchungen bzw. Monitoringmaßnahmen an bereits abgeschlossenen Erdkabelvorhaben bestätigen den Erfolg in Bezug auf den Erhalt bzw. die Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen unter Beteiligung einer BBB. Jedoch kann nicht in jedem Vorhaben und zu jedem Zeitpunkt ein vollständig idealisierter Bauablauf angenommen werden, sodass im Einzelfall Beeinträchtigungen auftreten können, welche in Zusammenarbeit mit allen Beteiligten eingeschränkt oder behoben werden müssen.

Besondere Anforderungen an die BBB resultieren v.a. aus den umfangreichen Eingriffsgeometrien über weite Streckenabschnitte und den damit verbundenen Eingriffen in zahlreiche verschiedene Bodenlandschaften mit teils hohen Empfindlichkeiten in Bezug auf die anstehenden Bauarbeiten. Sowohl in der Planungs- als auch in der Bauphase muss die BBB – nicht zuletzt aufgrund der hohen Anforderungen an die Erstellung der Genehmigungsunterlagen – in einem interdisziplinären Gesamtkonstrukt einen fundierten Beitrag leisten. Die Mitarbeit im Rahmen des Genehmigungsverfahrens einschließlich der Teilnahme an Öffentlichkeitsveranstaltungen sowie die baubegleitende Tätigkeit unter Beteiligung zahlreicher Betroffener und Fachgewerke bedarf, neben der fachlichen Expertise, qualifizierter Fähigkeiten in Bezug auf Kommunikation und Organisation. Auch die Streckenlänge sowie die Dynamik auf solchen Linienbaustellen können, v.a. bei längeren Streckenabschnitten, zu besonderen Herausforderungen bei der Personal- und Einsatzplanung führen.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: Lexikon der Entwicklungspolitik <https://www.bmz.de/de/service/lexikon#lexicon=13916>, Onlinezugriff am 25.02.2025**
- [2] EEG 2021: Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1353) geändert worden ist**
- [3] EEG 2023: Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Februar 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 52) geändert worden ist**
- [4] BBPIG (2013): Bundesbedarfsplangesetz vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2543; 2014 I S. 148, 271), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 239) geändert worden ist**
- [5] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2024): Monitoring des Stromnetzausbaus, Drittes Quartal 2024.**

- [6] BBodSchG (2021): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist**
- [7] BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716)**
- [8] DIN19639 (September 2019): Bodenschutz bei der Planung und Durchführung von Bauvorhaben**

Anschriften der Autorinnen/Autoren

Dr. Benjamin Schieber
TABERG Ingenieure GmbH
Rudolf-Diesel-Straße 1
54292, Trier
Telefon: 0231 98 70 73 12
E-Mail: benjamin.schieber@taberg.de
Internet: www.taberg.de

Probenahme-
+
Gasmeßtechnik

Bodenluft
Deponiegas
Innenraumschadstoffe

Abstracts

Nachhaltigkeit in der Sanierung

Moderation: Dr. Uwe Boester, ahu GmbH, Aachen

13.

Building Information Modeling (BIM) bei Rückbau und Sanierung, Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit von Bauprojekten durch Laser-Scanning und Photogrammetrie

Ilja Prinz, CDM Smith SE, Mannheim

14.

**Altlastensanierung und Energiewende –
In-situ Enteisenung/Entmanganung (ISEE) ermöglicht energetische
Nutzung von gereinigtem Grundwasser zur Gebäude- und
Prozessklimatisierung auf einem ehemaligen Raffineriestandort**

Clarissa Kellner, Züblin Umwelttechnik GmbH, Nürnberg

Building Information Modeling (BIM) bei Rückbau und Sanierung, Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit von Bauprojekten durch Laser-Scanning und Photogrammetrie

Ilja Prinz und Alexa Mahr

1 Einleitung

Der deutsche Gebäudebestand weist ein Durchschnittsalter von rund 50 Jahren auf¹. Anforderungen an Energieeffizienz und Umnutzungsbedarfe verdeutlichen die Notwendigkeit umfangreicher Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen. So geraten neben der baulichen Substanz zunehmend auch Aspekte wie Klimaschutz aber vor allem auch Ressourcenschonung in den Fokus. Die Herausforderungen sind vielfältig. Einerseits müssen veraltete Gebäude und die Infrastruktur modernisiert werden, um heutigen Anforderungen gerecht zu werden. Andererseits gewinnen Rückbau- und Revitalisierungsmaßnahmen an Bedeutung, da Flächenpotenziale in Bestandsgebieten, da bereits erschlossen, oftmals realisierbare Möglichkeiten für Wohnraumschaffung sind als neue Bauflächen an peripheren Standorten.

Gleichzeitig wächst das Bewusstsein für die Erfordernis eines nachhaltigen Denkens und somit auch für die zirkuläre Wertschöpfung im Bauwesen, bei der Materialien möglichst lange im Kreislauf gehalten bzw. wiederverwendet werden sollen. Insbesondere der Rückbau von Bestandsgebäuden bietet die Chance, wertvolle Ressourcen gezielt zurückzugewinnen und wiederzuverwenden. Um diese Potenziale ausschöpfen zu können, sind präzise Informationen über Bauwerkszustände, Materialien und Tragstrukturen erforderlich, die allerdings in der veralteten Bausubstanz nicht immer gegeben sind.

Vor diesem Hintergrund rückt Building Information Modeling (BIM) als digitale Planungsmethode zunehmend in den Fokus von Bestands- und Sanierungsprojekten. Obwohl BIM anfangs vorwiegend im Kontext von Neubauten eingesetzt wurde, zeigen aktuelle Forschungs- und Praxisbeispiele, dass auch Bestandsgebäude – dank moderner Erfassungstechnologien wie LiDaR und Photogrammetrie – effizient digitalisiert werden können.²

Aus den Aufnahmen werden Punktwolken erzeugt, woraus sich 3D-Modelle ableiten lassen, die die Grundlage für ein BIM-Modell bilden, das neben der geometrischen Information auch weitere alphanumerische Informationen, wie etwa zu Baustoffen, Schichtaufbauten Schadstoffbelastungen, enthalten.

Mit dieser Informationsgrundlage lassen sich Sanierungs- und Rückbauprozesse gezielt planen und optimieren.

Der vorliegende Beitrag beleuchtet, welche Vorteile BIM insbesondere für die Planung und Umsetzung von Rückbau- und Sanierungsmaßnahmen bietet und wie durch eine präzise Datenaufnahme sowie eine systematische Modellierung nachhaltige und ressourcenschonende Lösungen erarbeitet werden können. Ein praxisorientiertes Beispiel demonstriert den konkreten Einsatz von BIM in der Bestandserfassung, der Planung verschiedener Sanierungs- und Rückbauszenarien und der 4D-Simulation von

¹ Gebäude: Baujahr (Jahrzehnte) 2025.

² Gordon et al. 2024, vgl. S.41 ff.

Rückbauprozessen. Auf diese Weise soll verdeutlicht werden, wie Digitalisierung und Nachhaltigkeit Hand in Hand gehen können, um den Herausforderungen eines alternden Gebäudebestands zukunftsorientiert zu begegnen.

2 Vorteile von BIM für die Planung und Umsetzung von Rückbau- und Sanierungsmaßnahmen

BIM bietet im Bereich der Bestandssanierung mehr als lediglich eine digitale Darstellung vorhandener Gebäude. Gerade bei Rückbau- und Sanierungsprojekten eröffnet BIM durch die schnelle und präzise Datenerfassung sowie eine systematische Modellierung neue Möglichkeiten, um Baustoffe und Bauteile gezielt wiederzuverwenden oder effizient zu recyceln.

Die sogenannte Scan2BIM-Methode beschreibt die Erstellung digitaler Gebäudemodelle durch die Nachmodellierung auf Basis von Punktwolken, die mittels moderner 3D-Laserscan- oder Photogrammetrie-Verfahren erzeugt werden. Die Modelle enthalten neben rein geometrischen Informationen weitere alphanumerische Daten, die beispielsweise Schadstoffbelastungen, die Wiederverwendbarkeit von Bauteilen sowie deren Güte umfassen und entsprechend ausgewertet werden können.

Baustoffe, die sich zur Wiederverwendung eignen, lassen sich systematisch identifizieren, klassifizieren und bewerten. Diese Vorgehensweise reduziert Bauabfälle, schont natürliche Ressourcen und unterstützt eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft im Bauwesen.

Ein weiterer Pluspunkt sind die modellbasierten Simulationen, die BIM ermöglicht. Durch die Visualisierung der geplanten Rückbau- oder Sanierungsschritte in 3D und deren zeitlicher Abfolge (4D) erhalten alle Projektbeteiligten – auch jene ohne technischen Hintergrund – ein klares und transparentes Verständnis der Maßnahmen.

Ein besonderer Vorteil von Scan2BIM liegt darin, dass Architekten und Planer bereits in einer frühen Phase Informationen zur Wiederverwendbarkeit von Bauteilen erhalten. Materialien, die sich zur Wiederverwendung eignen, lassen sich systematisch identifizieren, klassifizieren und bewerten. Dies reduziert die Menge an Bauabfällen, schont natürliche Ressourcen und unterstützt aktiv die Prinzipien einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft im Bauwesen.

Zudem werden modellbasierte Simulationen durch BIM möglich. Durch die Visualisierung der Rückbau- oder Sanierungsschritte in 3D und deren zeitlicher Abfolge (4D) erhalten Architekten, Bauherren, Behörden und andere Beteiligte – auch ohne tiefgehende bautechnische Kenntnisse – verständliche und transparente Einblicke in die geplanten Maßnahmen. So wird die Kommunikation zwischen allen Beteiligten erleichtert und die Akzeptanz der geplanten Maßnahmen erhöht.

3 Praxisbeispiel

3.1 Projektbeschreibung PHV

Das Patrick Henry Village (PHV) in Heidelberg umfasst eine Fläche von etwa 97 Hektar mit rund 250 Bestandsgebäuden und repräsentiert somit das größte Urban-Mining-Projekt Europas. Angesichts zunehmender Ressourcenknappheit und begrenzter Deponiekapazitäten ist der traditionelle Ansatz, bestehende Strukturen vollständig rückzubauen und durch Neubauten zu ersetzen, weder nachhaltig noch zeitgemäß. Stattdessen implementiert das PHV-Projekt ein innovatives Urban-Mining-Konzept, bei dem bestehende Bauwerke gezielt als wertvolle Rohstoffreservoirs identifiziert und möglichst sortenrein rückgebaut werden. Ziel ist die Etablierung einer Circular City, die durch hochwertiges Recycling und effiziente Wiederverwendung von Baustoffen den Ressourcenverbrauch minimiert, Deponiekapazitäten

schont und CO₂-Emissionen deutlich reduziert. Damit leistet das Projekt einen essenziellen Beitrag zur Erreichung des ambitionierten Ziels der Stadt Heidelberg, bis zum Jahr 2030 klimaneutral zu sein. Der innovative Ansatz basiert insbesondere auf dem Einsatz moderner digitaler Technologien, insbesondere Building Information Modeling (BIM). Aufgrund der Größe und Komplexität des Areals ist ein manuelles Aufmaß der Gebäude nicht nur unzeitgemäß, sondern auch logistisch und wirtschaftlich unrealistisch. BIM bietet hier eine zeitgemäße Lösung, indem es eine präzise, digitale Erfassung der Bauwerksinformationen ermöglicht, die zentral gespeichert, transparent verwaltet und unmittelbar verfügbar gemacht werden können. Durch den Einsatz dieser digitalen Methoden wird eine effiziente Planung und gezielte Steuerung der Urban-Mining-Aktivitäten gewährleistet. Die digitale Dokumentation und Verwaltung ermöglicht somit eine optimale Nutzung der ökologischen und ökonomischen Potenziale und fördert nachhaltig eine zukunftsorientierte und kreislaufbasierte urbane Entwicklung.

3.2 Vorgehen

Im Rahmen der Projektabwicklung erfolgt zunächst eine umfassende Bestandsaufnahme mittels Matterport Technologie. Hierbei kommt die Matterport Pro 3 Kamera zum Einsatz, die mit einer hohen Genauigkeit von bis zu ± 20 mm auf 10 Metern sowie einer maximalen Reichweite von 100 Metern arbeitet³. Diese Kamera nutzt fortschrittliche LiDAR-Technologie, wobei ausgesandte Laserimpulse durch Reflexion an den Objektoberflächen Millionen präziser Messpunkte erfassen. Auf Grundlage von 324 Messpunkten entsteht eine hochauflösende und detailreiche 3D-Punktwolke, welche die geometrische Struktur der erfassten Gebäude widerspiegelt.



Abbildung 1: Grob Model des Scans (Mesh auf Matterport) © CDM Smith

Diese Punktwolke dient als zuverlässige Basis für alle weiteren digitalen Bearbeitungs- und Analyseprozesse. Auf der Matterport-Plattform werden die gescannten Daten in interaktive 3D-Modelle überführt, die besonders in frühen Projektphasen zur schnellen visuellen Abstimmung, kollaborativen Kommunikation sowie Informationsspeicherung genutzt werden können. Die erfassten Daten lassen sich zudem im standardisierten e57-Dateiformat exportieren, das die Punktwolkendaten strukturiert speichert. Dabei umfasst jede Datei

³ Matterport Pro3 Technical Specifications 2024.

räumliche Koordinaten (X, Y, Z), Farbwerte sowie gegebenenfalls Intensitätswerte. Aufgrund dieser strukturierten und standardisierten Speicherung gewährleistet das e57-Format eine verlustfreie Weitergabe der Daten an nachfolgende Softwarelösungen und Anwendungen und unterstützt so einen reibungslosen Informationsfluss.



Abbildung 2: Punktwolke des Bauwerks © CDM Smith

Im nächsten Schritt erfolgt die Integration der aufgenommenen Daten in ein Building Information Modeling (BIM)-Modell. Dazu werden die exportierten e57-Daten zunächst mit



Abbildung 3: Überlagerung Punktwolke und BIM-Modell © CDM Smith

Autodesk Recap referenziert, strukturiert und verarbeitet. Anschließend wird diese aufbereitete Punktwolke in Autodesk Revit importiert und als Grundlage für eine vereinfachte digitale Nachmodellierung des Bauwerks genutzt, welche einem geringeren Detaillierungsgrad (Level of Detail, LOD 200) entspricht.

Im Kontext der Rückbauplanung liegt der Fokus auf der alphanumerischen Information, der geometrische Daten ergänzend untergeordnet sind. Die identifizierten Bauteile werden anhand ihrer Materialeigenschaften kategorisiert, Mengen detailliert erfasst und anschließend für die Ausschreibungsunterlagen im Leistungsverzeichnis vorbereitet. Daraus resultiert eine transparente und umfassende

Mengenbilanz, welche wiederum eine wesentliche Grundlage für die gezielte Steuerung und effiziente Planung der Rückbaumaßnahmen bildet.

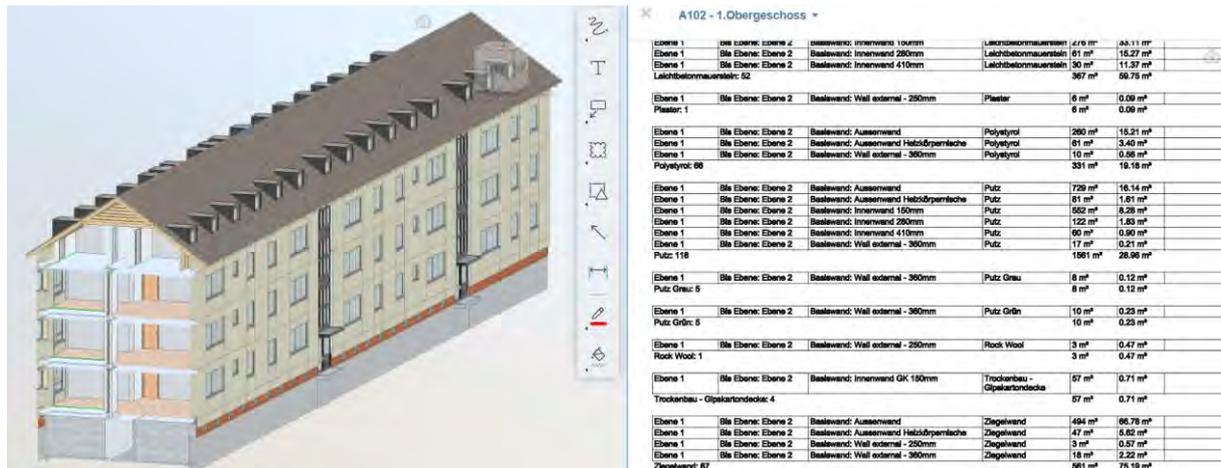


Abbildung 4: Modell link, Bauteilliste rechts © CDM Smith

Zur weiteren Optimierung und präzisen Planung der Rückbauprozesse wird zudem eine 4D-Simulation eingesetzt. Diese ergänzt die BIM-Daten um die zeitliche Komponente und ermöglicht somit eine realitätsnahe Visualisierung der vorgesehenen Maßnahmen. Dadurch lassen sich potenzielle Kollisionen oder Konflikte zwischen verschiedenen Fachgewerken frühzeitig identifizieren und vermeiden. Der digitale Zwilling stellt somit ein essenzielles Instrument für das Projektmanagement dar und ermöglicht fundierte Entscheidungsprozesse während des gesamten Rückbauvorgangs.

Mit Blick auf zukünftige Entwicklungen sieht das PHV-Projekt eine Skalierung und Anwendung der eingesetzten digitalen Technologien auch auf weitere Areale und Flächen vor. Mithilfe von geografischen Informationssystemen (GIS) sollen diese Methoden umfassend analysiert und auf regionaler Ebene systematisch zur Förderung einer nachhaltigen, ressourcenschonenden und kreislaufbasierten Stadtentwicklung angewendet werden.

4 Fazit und Ausblick

Der Einsatz von Lidarscannern stellt eine äußerst effiziente Methode dar, um bestehende Bauwerke schnell und präzise zu erfassen – insbesondere dann, wenn keine zuverlässigen Bestandsunterlagen vorhanden sind. Die Methode Scan-to-BIM erweist sich dabei nicht nur als elegante, sondern auch als besonders wirtschaftliche und nachhaltige Vorgehensweise, um die notwendige Informationsbasis für eine effiziente Rückbauplanung aufzubauen und auszuwerten. Durch diese digital gestützte Arbeitsweise können Planungsprozesse erheblich optimiert und Risiken in der späteren Ausführungsphase reduziert werden.

Im nächsten Schritt unserer Untersuchung wird die Betrachtungsebene deutlich erweitert. Wir planen, künftig die Möglichkeiten der Scan-to-BIM-Technologie und der BIM-gestützten Planung auf einem größeren Maßstab zu übertragen, um so eine umfassende Analyse und optimierte Logistikplanung für das gesamte Areal durchführen zu können. Ziel ist es, die Potenziale digitaler Erfassungs- und Modellierungstechniken noch intensiver auszuschöpfen und damit einen weiteren wichtigen Schritt hin zur nachhaltigen und effizienten Projektplanung und Umsetzung zu realisieren.

5 Literaturverzeichnis

Gebäude: Baujahr (Jahrzehnte) (2025). Online verfügbar unter <https://ergebnisse.zensus2022.de/datenbank/online/statistic/3000G/table/3000G-1002>, zuletzt aktualisiert am 03.02.2025, zuletzt geprüft am 10.03.2025.

Gordon, Matthew; Zimmerman, Luise von; Haradhun, Oushesh; Campanella, Dominik; Bräutigam, Milena; Wolf, Catherine de (2024): Digitising Building Materials for Reuse with Reality Capture and Scan-to-BIM Technologies. In: Catherine de Wolf, Sultan Çetin und Nancy M. P. Bocken (Hg.): A Circular Built Environment in the Digital Age. Cham: Springer International Publishing (Circular Economy and Sustainability), S. 41–55.

Matterport Pro3 Technical Specifications (2024). Online verfügbar unter https://support.matterport.com/s/article/Pro3-Technical-Specifications?language=en_US, zuletzt aktualisiert am 11.03.2024, zuletzt geprüft am 11.03.2025.

Anschriften der Autorinnen/Autoren

Ilja Prinz und Alexa Mahr
CDM Smith SE
Cecil-Taylor-Ring 16-18
68309 Mannheim
Telefon: +49 621 150309 20
E-Mail: mannheim@cdmsmiht.com
Internet: cdmsmith.com



Für die Umwelt. Für die Menschen.



Flächenrecycling



Umweltberatung



Infrastrukturplanung



Die HPC AG ermöglicht seit 1948 die Verwirklichung kühner Pläne:

Von der Sanierung schadstoffbelasteter Böden, dem Bau von Mineralwasserbrunnen bis hin zum Erstellen hochqualitativer Baugrundgutachten – das Thema Nachhaltigkeit immer im Blick, entwickeln wir als Ingenieurunternehmen Lösungen für das Flächenrecycling, in der Umweltberatung und in der Infrastrukturplanung.

Wir arbeiten interdisziplinär, international und mit ingenieurwissenschaftlicher Genauigkeit. Mit unserer Arbeit schützen wir die Natur, die menschliche Gesundheit und sichern die Werte unserer Partner.

Für die Umwelt. Für die Menschen.

HPC AG

Nördlinger Straße 16
86655 Harburg
info@hpc.ag
Tel. +49 9080 999-0



www.hpc.ag



Altlastensanierung und Energiewende – In-situ Enteisenung/Entmanganung (ISEE) ermöglicht energetische Nutzung von gereinigtem Grundwasser zur Gebäude- und Prozessklimatisierung auf einem ehemaligen Raffineriestandort

Clarissa Kellner und Dominik Grünhagen

1 Altlastenstandort wird Innovationscampus

Die Bayernoil-Raffinerie in Ingolstadt wurde ca. 2006 stillgelegt und die Industriebauten oberhalb des Geländes ab 2008 rückgebaut. Die durch die jahrzehntelange Produktion entstandenen Kontaminationen im Erdreich und Untergrund werden nach intensiven Vorerkundungen bereits seit dem Rückbau ab 2014 mittels einer Grundwasserreinigung abgereinigt. Nach dem Verkauf des Geländes an die IN-Campus GmbH im Jahr 2016 begannen intensive Planungen zur Nutzung des Geländes als Innovationscampus.

1.1 Altlastensanierung im großen Maßstab

Von den ca. 75 ha des Industriegeländes waren ca. 22 ha so stark belastet, dass eine Sanierung im Boden und Grundwasser erfolgen musste. Daher musste neben dem Bodenaushub mit Bodenwäsche für MKW- und PFAS-belastetes Erdreich auch das Grundwasser gereinigt werden. In den jeweiligen Sanierungsfeldern erfolgte die Sanierung für BTEX, AKW und C5-C9-Kohlenwasserstoffe mittels Airsparging und anschließender Abreinigung des geförderten Grundwassers bzw. der abgesaugten Bodenluft. Die Sanierung erfolgte im Zeitraum von 2017 bis 2022.

1.2 Abstomsicherung Gelände

Aufgrund des kiesigen und sehr durchlässigen Untergrunds auf dem Gelände wurde eine Abstomsicherung errichtet, um das Abströmen von Schadstoffen in die abstromig gelegenen und unter Naturschutz stehenden Donauauen und die Donau zu unterbinden. Das Grundwasser enthielt neben den raffinerietypischen Schadstoffen MKW, BTEX, C5-C9-Kohlenwasserstoffe und LHKW auch PFAS aus dem Einsatz von AFFF-Löschschäumen bei Bränden und Löschübungen auf dem Gelände. Hierfür wurden 10 Abstrombrunnen im südöstlichen Teil des Geländes errichtet. Zur Abreinigung des belasteten Grundwassers mit einer Entnahmerate von bis zu 210 m³/h wurde eine Grundwasseraufbereitungsanlage (GWAA) errichtet (Abb. 1). Das gereinigte Grundwasser wird auf dem Gelände in einem ca. 6.000 m² großen Sickergraben versickert. Dies erfolgt zum einen, um die Donauauen vor dem Austrocknen durch die Grundwasserentnahme zu schützen und zum anderen, um die natürliche Grundwasserströmung in Richtung der Abstrombrunnengalerie umzuleiten und damit den gesamten Abstrom des Geländes mit möglichst geringer Entnahmerate zu sichern. Es ist geplant, die GWAA mit Erreichen der Sanierungsziele zu deaktivieren, aber die existierende Brunnengalerie darüber hinaus für thermische Zwecke weiter in Betrieb zu halten.

Kellner, C. & Grünhagen, D.:

Altlastensanierung und Energiewende – In-situ Enteisenung/Entmanganung (ISEE) ermöglicht energetische Nutzung von gereinigtem Grundwasser zur Gebäude- und Prozessklimatisierung auf einem ehemaligen Raffineriestandort



Abbildung 1: GWAA als Abstomsicherung am incampus Gelände Ingolstadt [Quelle: Züblin Umwelttechnik]

1.3 Thermische Grundwassernutzung am incampus

Bereits während der Planungsphase und den einzelnen Sanierungsabschnitten wurde die energetische Nutzung des Grundwassers für Heiz- und Kühlzwecke berücksichtigt, um einen Nullenergie - incampus im Endausbau zu erreichen.

Dies erfolgt in einem energetischen Gesamtkonzept für das Gelände (Abb. 2) und besteht neben dem Grundwasser aus mehreren Bereichen. Die notwendige Infrastruktur zur thermischen Nutzung des abgeleiteten Grundwassers wurde bereits in der Sanierungsphase beim Bau der GWAA berücksichtigt.

Kellner, C. & Grünhagen, D.:

Altlastensanierung und Energiewende – In-situ Enteisenung/Entmanganung (ISEE) ermöglicht energetische Nutzung von gereinigtem Grundwasser zur Gebäude- und Prozessklimatisierung auf einem ehemaligen Raffineriestandort

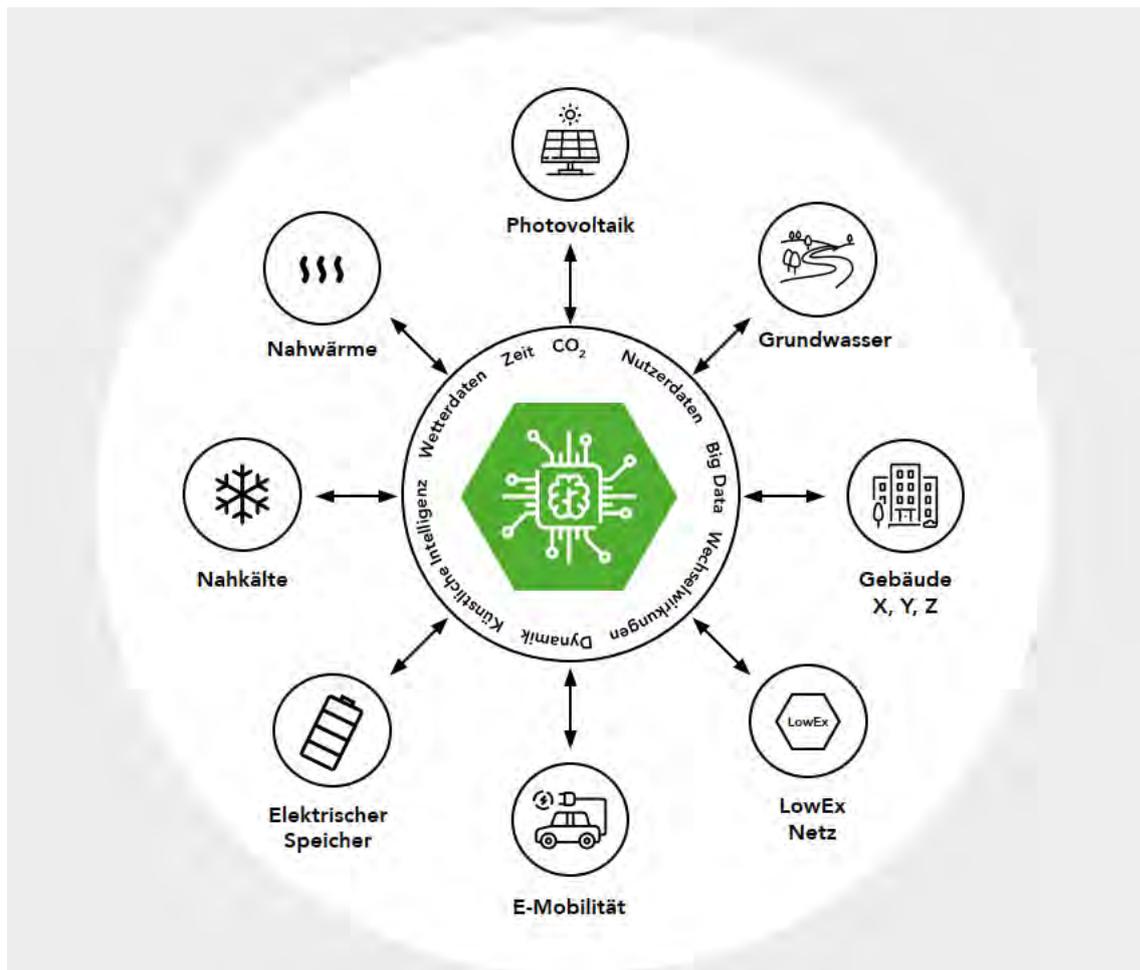


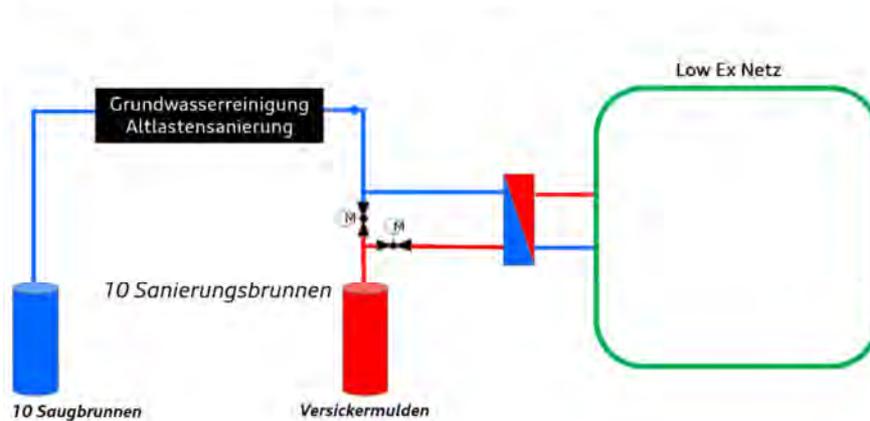
Abbildung 2: Gesamtenergiekonzept incampus [1]

Gereinigtes Grundwasser wird je nach Bedarf bis zu einer Durchflussrate von 170 m³/h thermisch genutzt. Überschüssiges Grundwasser und das genutzte Grundwasser nach den Wärmetauschern werden wieder der Versickerungsanlage zugeführt (siehe Abb. 3).

Kellner, C. & Grünhagen, D.:

Altlastensanierung und Energiewende – In-situ Enteisenung/Entmanganung (ISEE) ermöglicht energetische Nutzung von gereinigtem Grundwasser zur Gebäude- und Prozessklimatisierung auf einem ehemaligen Raffineriestandort

Thermische Nutzung Abstromsicherung



Nutzen:

Sowieso gefördertes Grundwasser (~170 m³/h) wird als Wärmequelle zum Heizen und Kühlen verwendet (ca. 1.500 kW)

Abbildung 3: Thermische Nutzung der Abstromsicherung [1]

Bei der Nutzung von im Mittel bis zu 170 m³/h gereinigtes Grundwasser wird dieses über einen Wärmetauscher thermisch ins LowEx Netz eingespeist. Dem Grundwasser wird Energie zugeführt, um das LowEx Netz abzukühlen, wodurch eine Kühlleistung von bis zu 1.000 – 1.250 kW verwendet werden kann. Bei einem vergleichbaren Kaltwassersatz und einem angenommenen COP (Coefficient of Performance = Effizienz der Wärmepumpe) von 5 des Kaltwassersatzes ergibt sich ein elektrischer Bedarf von ca. 250 kW. Der hierfür jährlich eingesparte Strombedarf liegt bei angenommenen 100 Tagen pro Jahr und 24 Stunden Betrieb bei ca. 600.000 kWh/a. Daraus ergibt sich bei Ökostrommix eine CO₂-Menge von ca. 30 t/a, die durch die Nutzung des Grundwassers eingespart werden können.

Herausforderungen der Grundwassernutzung

Die GWAA besteht aus den Förderpumpen in den Abstrombrunnen, einer Enteisenungsstufe mit Belüftung und Kiesfiltern und einer mehrstufigen Wasseraktivkohlereinigung. Das gereinigte Grundwasser wird zur Rückspülung in einem Reinwasserbecken zwischengespeichert, bevor es in die Versickerung abgeleitet wird.

1.3.1 Verockerung aufgrund von eisenhaltigem Grundwasser

Die gelösten Eisenverbindungen mit bis zu 3 mg/l und Mangankonzentrationen bis 0,7 mg/L führen im Betrieb zu Verockerungen der Brunnenpumpen und der Förderleitungen von den Abstrombrunnen bis zur GWAA.

Aufgrund der Leitungslängen von den Brunnen bis zur GWAA kommt es hier zu einer verstärkten Ausfällung von Eisen- und Manganverbindungen in den Leitungen (Gesamtlänge ca. 3.000 m), sodass diese mehrmals jährlich gereinigt werden müssen.

Die Brunnenpumpen mit einer Förderleistung bis zu 20 m³/h verockern ebenfalls und müssen regelmäßig ausgebaut und gereinigt werden, was einen relativ hohen Aufwand erfordert.

1.3.2 Überlegungen zum Einsatz der In-situ Enteisenung/Entmanganung

Aufgrund der hohen Aufwendungen zum Reinigen der Brunnenpumpen und der Verbindungsrohrleitungen der GWAA bzw. zum Schutz der Abstrombrunnen vor Verockerung wurde daher der Einsatz der Unterirdischen Enteisenung am Standort angedacht.

2 In-situ Enteisenung/Entmanganung (ISEE)

Das Verfahren der In-situ Enteisenung/Entmanganung ist seit über 100 Jahren bekannt und bereitet in Wasserwerken und Kleinanlagen Trinkwasser auf (Abb. 4), [2]. Darüber hinaus wird es sehr erfolgreich seit vielen Jahren von der Züblin Umwelttechnik zur Aufbereitung von Grundwasser zur energetischen Nutzung in der Gebäudeklimatisierung eingesetzt [3].

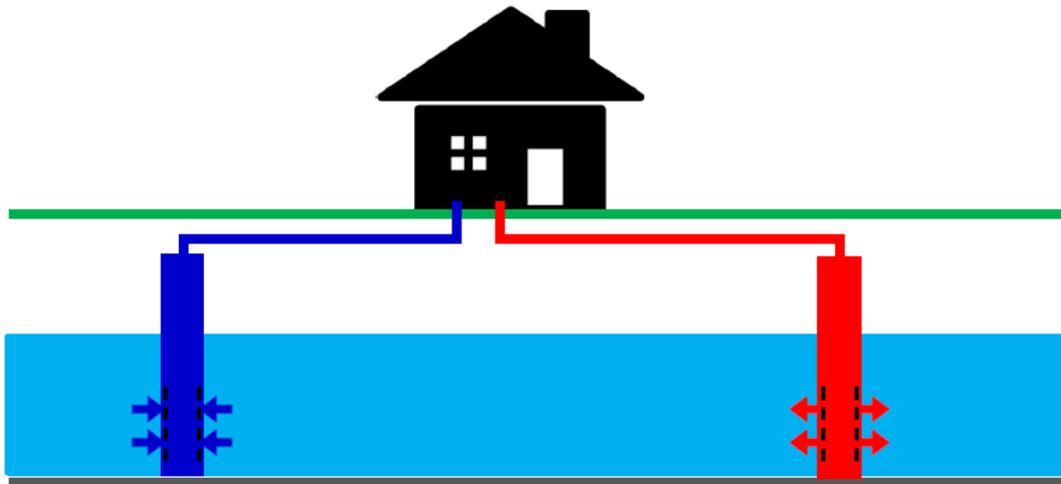


Abbildung 4: Entnahme von Grundwasser zur energetischen Nutzung [2]

2.1 ISEE-Verfahren

Das ISEE-Verfahren nutzt den Aquifer als Reaktionsraum für physikalische, chemische und biologische Prozesse zur Entfernung von Eisen und Mangan aus dem Grundwasser. Ebenso wie bei der herkömmlichen On-site Enteisenung in der Grundwasserreinigung beruht die In-situ Enteisenung/Entmanganung auf der Oxidation und Abtrennung der Eisen- und Manganverbindungen. Allerdings wird hierfür der Aquifer als Reaktionsraum genutzt (Abb. 5).

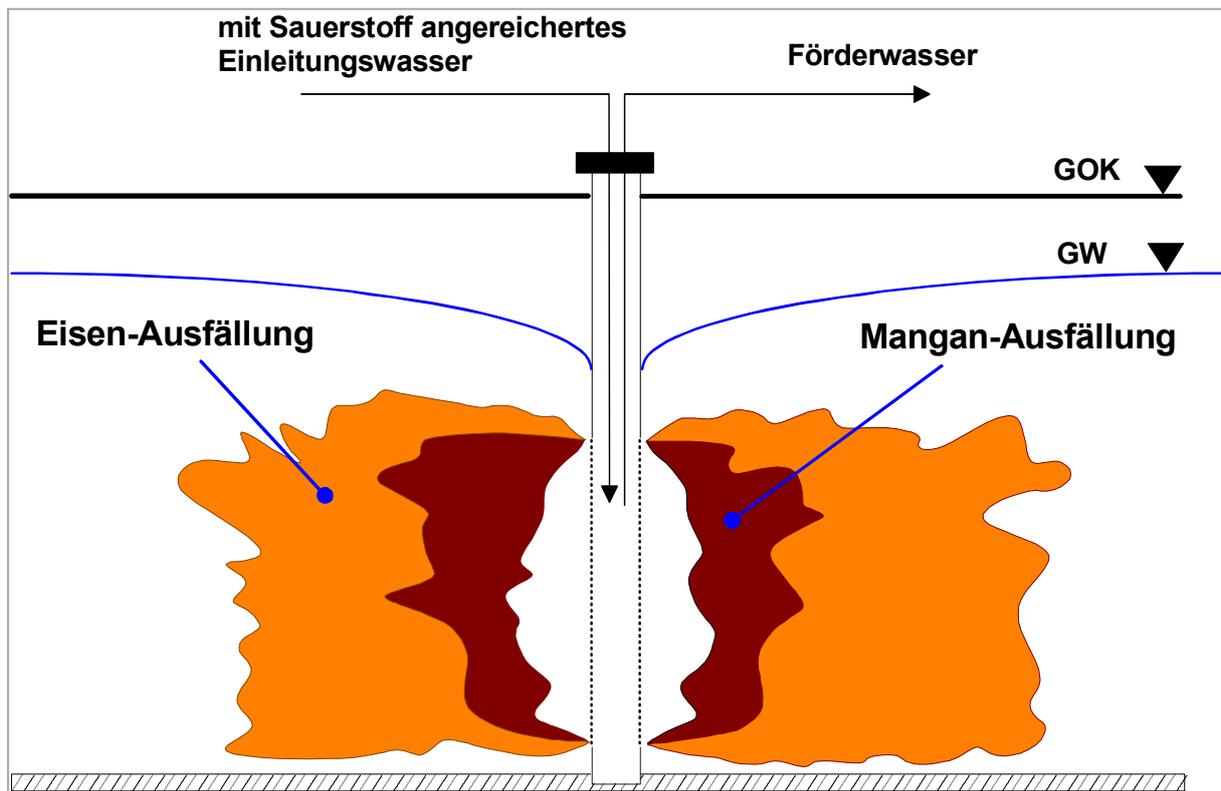


Abbildung 5: Oxidationszone mit Eisen- und Manganausfällungen bei der ISEE [2]

Hierzu wird mit Sauerstoff angereichertes Grundwasser während des Infiltrationszyklus über die Brunnen in den Untergrund eingebracht und eine sog. Oxidationszone um den Brunnen erzeugt. Die Sauerstoffkonzentration und die Redoxspannung in diesem Reaktionsraum sind erhöht. Bei der anschließenden Entnahme von Grundwasser strömt dies durch die Oxidationszone und die Eisen- und Manganverbindungen werden ausgefällt und binden sich am Bodenkorn.

Die Anlagentechnik arbeitet in sogenannten Aufbereitungszyklen, bei denen aus zwei oder mehr Entnahmebrunnen Grundwasser entnommen, ein Teilstrom mit Luftsauerstoff angereichert und während der Infiltrationsphase in einen anderen Brunnen infiltriert wird. Danach wird die Brunnenreihenfolge entsprechend geändert, sodass immer ausreichend Sauerstoff im Untergrund vorhanden ist (Abb. 6).

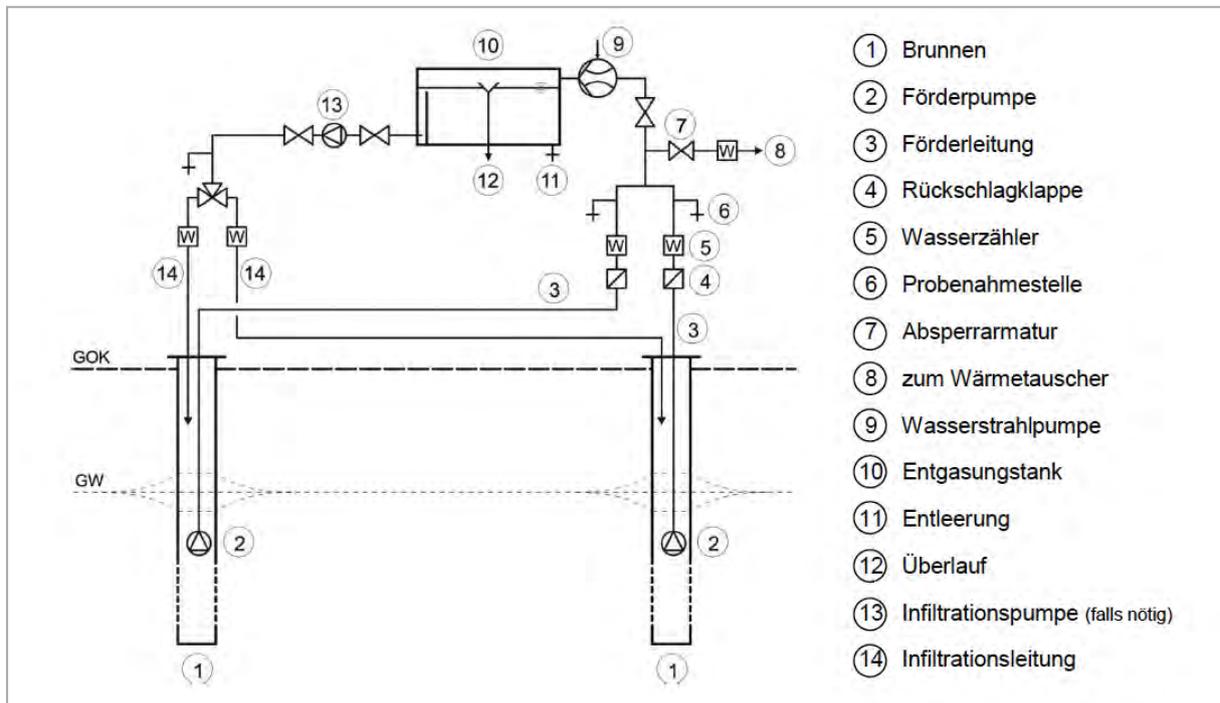


Abbildung 6: Schema beispielhafte Zweibrunnenanlage für die ISEE [2]

2.2 Vorteile der ISEE

Durch die Ausfällung der Eisen- und/oder Manganverbindungen bereits im Untergrund entstehen wesentliche Vorteile für die ISEE:

- Verockerung von Brunnen, Pumpen, Rohrleitungen, Wärmetauschern werden erheblich reduziert
- Eine aufwendige Aufbereitungstechnologie zur Oxidation und Entfernung der Eisen- und Manganverbindungen ist nicht notwendig
- Nur Luftsauerstoff ist als Betriebsstoff notwendig
- Keine Entsorgungskosten von eisen- und/oder manganhaltigen Schlämmen

3 Herausforderung der Unterirdischen Enteisenung/Entmanganung am Standort incampus

Aufgrund der Historie des incampus Geländes als ehemaliger Raffineriestandort kann das entnommene Grundwasser nicht ohne zusätzliche Behandlung zur energetischen Nutzung verwendet werden. Ebenso wenig darf ungereinigtes Wasser zur unterirdischen Enteisenung in den Untergrund reinfiltriert werden.

Daher wird das gereinigte Grundwasser der GWAA in einem Bypass mit Luftsauerstoff aufbereitet und in vordefinierten Zyklen in die jeweiligen Brunnen zur Ausbildung der Oxidationszone eingeleitet. Hierdurch ist die Reinfiltration von ausschließlich schadstofffreiem Grundwasser in die Reinfiltrationsbrunnen gewährleistet.

3.1 Aufbereitungstest am Standort incampus

Zur Überprüfung der grundsätzlichen Eignung der In-situ Enteisenung/Entmanganung am Standort incampus wird das Verfahren mittels eines Aufbereitungstests vor Ort vorab geprüft. Dabei werden sowohl die Geochemie und die Hydrologie auf Eignung überprüft sowie der Ergiebigkeitskoeffizient ermittelt. Der Ergiebigkeitskoeffizient wird aus dem Verhältnis zwischen Entnahme- und Reinfiltrationsmenge berechnet. Da am Standort aufgrund der Erfordernis einer Abstromsicherung immer ausreichend gereinigtes Grundwasser zur Aufbereitung und Reinfiltration zur Verfügung steht, ist dies energetisch nur untergeordnet relevant. Jedoch muss die Reinfiltration aus wasserrechtlicher Sicht auf einem Minimum gehalten werden, um die Funktion der hydraulischen Barriere und der Pumpengalerie aufrecht zu erhalten.

Dieser Aufbereitungstest wird an zwei Brunnen der Abstromgalerie über einen Zeitraum von einer bis mehreren Wochen durchgeführt.

Hierzu wird aus dem Reinwasser der GWAA das Grundwasser mittels Luftsauerstoff angereichert, über Entgasungstanks geführt und anschließend über die Pumpleitung und die Brunnenpumpe in den Aquifer eingeleitet. Anschließend wird Grundwasser wie bisher aus dem Brunnen entnommen und über die GWAA gefahren.

3.2 Vorteile der In-situ Enteisenung/Entmanganung für den Standort incampus

Die GWAA soll noch über viele Jahre betrieben werden. Die Nutzung zur Kühlung/Heizung bietet sich daher an.

In der GWAA erfolgt die Enteisenung des Grundwassers bisher herkömmlich über Belüftung und anschließende Kiesfiltration mit Abtrennung der Eisen- und Manganausfällungen. Dieser Eisen-/Manganschlamm wird in Schlammstapelbehältern gesammelt, eingedickt und anschließend aufgrund der PFAS-Belastung der Hochtemperaturverbrennung zugeführt. Dadurch entstehen hohe Entsorgungskosten für den PFAS-Schlamm und es ist ein sehr hoher Energieaufwand zur Hochtemperaturverbrennung von sehr dünnem, gering belastetem Schlamm notwendig.

Beim Einsatz der In-situ Enteisenung/Entmanganung verbleiben die Eisen- und Manganverbindungen im Untergrund am Bodenkorn und werden nicht oder nur in deutlich geringerem Umfang mit dem Grundwasserstrom entnommen. Daher kann beim erfolgreichen Einsatz der Technik auf die Enteisenungsstufe verzichtet werden. Dadurch ergeben sich Einsparungen nicht nur bei der Schlammentsorgung, sondern auch beim Stromverbrauch zum Belüften des Grundwassers sowie der Rückspülung in der GWAA.

Literaturverzeichnis

[1] AUDI AG und INCampus GmbH, Markus Faigl, Klaus Göttl (2019): INCAMPUS Innovative Technologien, Smarte Energie

[2] Meyer C (2012): Innovative Grundwasseraufbereitung als Voraussetzung für eine effiziente Gebäudeklimatisierung durch die Nutzung oberflächennaher Geothermie

[3] KELLNER C, EDEL, H-G, MEYER, C (2016) Unterirdische Enteisenung und Entmanganung - wirtschaftliche Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden, bbr 03/2016, 75-81, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

Kellner, C. & Grünhagen, D.:

Altlastensanierung und Energiewende – In-situ Enteisung/Entmanganung (ISEE) ermöglicht energetische Nutzung von gereinigtem Grundwasser zur Gebäude- und Prozessklimatisierung auf einem ehemaligen Raffineriestandort

Anschriften der Autorinnen/Autoren

Clarissa Kellner
Dominik Grünhagen
Züblin Umwelttechnik GmbH, Zweigstelle Nürnberg
Friedenstraße 52
90571 Schwaig
Telefon: 0911/504930-10
E-Mail: clarissa.kellner@zueblin.de, dominik.gruenhagen@zueblin.de
Internet: www.zueblin-umwelttechnik.com

PARTIKELBASIERTE GRUNDWASSER- SANIERUNG

Wir sanieren schadstoffbelastetes Grundwasser schonend, schnell und dauerhaft. Mit großer Leidenschaft und als einer der Pioniere weltweit.

Unser patentiertes Verfahren: Die partikelbasierte in situ Sanierung. Wir injizieren maßgeschneiderte Suspensionen aus Nano- und Mikropartikeln zielgenau in kontaminierte Aquifere. Dort – tief im Boden – reagieren sie mit den Schadstoffen und bauen diese rasch und nachhaltig ab.

Das Ergebnis: sauberes Grundwasser.

WIR BERATEN SIE GERN:

+49 201 858 958-0
info@intrapore.com



Abstracts

Forschung und Entwicklung

Moderation: Anke Wiener, Züblin Umwelttechnik GmbH, Markgröningen

15.

Modellversuch zur Nutzung kontaminierter Aquifere für eine Wärmebewirtschaftung mit ATEs Aquifer Thermal Energy Storage-Anlagen (KONATES) – mikrobiologische und isotopenchemische Untersuchungen

Dr. Carsten Vogt, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig

16.

Entwicklung der komponentenspezifischen Isotopenanalyse von PFAS für deren Quellenidentifizierung und Abbaubewertung

Dr. Kevin Kuntze, Isodetect GmbH, Leipzig,

Modellversuch zur Nutzung kontaminierter Aquifere für eine Wärmebewirtschaftung mit ATES Anlagen (KONATES) – mikrobiologische und isotopenchemische Untersuchungen

Jan Birkigt, Raphael Hopp, Finn Höfgen, Nina-Sophie Keller, Steffen Kümmel, Robert Köhler, Holger Weiß, Ivonne Nijenhuis, Carsten Vogt

1 Saisonale Wärmespeicherung in Aquiferen – was ist das?

Mehr als ein Drittel des gesamten Energiebedarfs in Deutschland wird zum Heizen von Gebäuden und zur Versorgung mit Warmwasser verbraucht; über 80 Prozent der Wärmenachfrage wird aktuell durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern gedeckt (BMWK, 2023). Eine Energiewende im Wärmebereich („Wärmewende“) ist deshalb entscheidend für die Erreichung des nationalen Ziels, bis 2045 klimaneutral zu werden. Die saisonale Wärmespeicherung in Aquiferen (*Aquifer Thermal Energy Storage*, ATES) ist ein nachhaltiger Ansatz, kohlenstoff- und somit klimaneutral zu heizen und zu kühlen (Fleuchaus et al., 2018, Novo et al., 2010). ATES-Anlagen werden derzeit überwiegend in klimatisch gemäßigten Zonen mit saisonalem Heiz- und Kühlbedarf betrieben, hauptsächlich in städtischen Gebieten mit hohem Heiz- und Kühlbedarf. Im Sommer wird Grundwasser aus einer gesättigten, durchlässigen unterirdischen Schicht zu Kühlzwecken entnommen. Das durch diesen Prozess erwärmte Wasser wird räumlich getrennt in demselben Grundwasserleiter gespeichert, aus dem es entnommen wurde, und im Winter zum Heizen verwendet; die jeweilige Zieltemperatur wird mit Wärmepumpen eingestellt. Durch den Heizvorgang wird das Wasser wieder abgekühlt und bis zur nächsten Warmperiode in dem Grundwasserleiter gespeichert, aus dem es ursprünglich entnommen wurde (Novo et al., 2010; Fleuchaus et al., 2018). Weltweit werden mehr als 2.800 ATES-Systeme zum Heizen und Kühlen von Gebäuden wie Wohnhäusern, Krankenhäusern, Universitäten und Einkaufszentren eingesetzt (Fleuchaus et al., 2018). Etwa 85 % dieser ATES-Systeme sind in den Niederlanden installiert, und 99 % sind Niedertemperatur-ATES (*Low Temperature-ATES*, LT-ATES), d. h. die Infiltrationstemperaturen betragen maximal 25 °C (Fleuchaus et al., 2018). Hochtemperatur (*High Temperature*, HT)-ATES-Anwendungen mit Temperaturen über 50 °C haben eine weitaus höhere Wärmespeicherkapazität pro Wasservolumen als LT-ATES-Anlagen und sparen zusätzlich Strom für Wärmepumpen ein (Fleuchaus et al., 2020). HT-ATES-Anlagen ermöglichen auch die Speicherung von überschüssiger Wärme in komprimierter Form aus erneuerbaren Energien (Geothermie, Solarenergie), Biomasse, Power-to-Heat oder industriellen Prozessen und überbrücken so Energiebedarf und -angebot. Die gespeicherte Wärme kann beispielsweise für Fernwärme, die Beheizung von Gebäudekomplexen oder für industrielle Anwendungen (z.B. Gewächshäuser) genutzt werden. Obwohl die technische Machbarkeit von HT-ATES-Systemen nachgewiesen wurde, hat sich die Technologie noch nicht auf dem Energiemarkt durchgesetzt (Fleuchaus et al., 2020).

1.1 Biogeochemische Auswirkungen von HT-ATES-Systemen

Beim Betrieb von HT-ATES-Systemen im oberflächennahen Untergrund werden Temperaturmaxima erreicht, die weit über den üblichen Temperaturen in Grundwasserleitern liegen (Fleuchaus et al., 2020). In den gemäßigten Zonen können die Grundwassertemperaturen in städtischen Gebieten bis zu 18 °C erreichen (Menberg et al., 2013) und schwanken in flachen Grundwasserleitern unter natürlichen Bedingungen das ganze Jahr über zwischen 8 - 14 °C (z. B. in Deutschland in 10 - 20 m Tiefe) (Griebler &

Avramov, 2015). Höhere Temperaturen beeinflussen nicht nur die physikalischen Eigenschaften des Grundwassers wie Dichte und Viskosität, sondern triggern auch biogeochemische Reaktionen (Fleuchaus et al., 2020) und können organische Stoffe sowie Spurenelemente und Schwermetalle mobilisieren (Bonte et al., 2011; Lüders et al., 2020). Die Löslichkeit von Gasen ist bei höheren Temperaturen im Allgemeinen geringer (Lüders et al., 2016), wodurch auch die Konzentration von Sauerstoff aufgrund höherer mikrobieller Verbrauchsrate abnehmen kann, es stellen sich anoxische Bedingungen ein. Höhere Mineralisierungsraten von organischem Kohlenstoff können zusätzlich zu einer höheren Freisetzung von Kohlenstoffdioxid führen (Brons et al., 1991). Darüber können aufgrund der veränderten biogeochemischen Bedingungen Minerale in Lösung gehen oder ausfallen, einhergehend mit größeren Veränderungen der Ionenkonzentrationen, was zu Ablagerungen führt und sich potenziell negativ auf die Porosität und damit die Durchlässigkeit des Aquifers auswirkt (Brons et al., 2010; Lüders et al., 2020; Arning et al., 2006). Abiotische und (mikro)biologische Reaktionen können gegensätzliche Auswirkungen haben, z. B. kann die Sulfatkonzentration aufgrund der Oxidation von Sulfiden ansteigen oder aufgrund mikrobieller Sulfatreduktion abnehmen (Lienen et al., 2017).

1.2 Auswirkungen von HT-ATES auf das Aquifermikrobiom

Mikroorganismen bewerkstelligen die wichtigsten Ökosystemfunktionen von Grundwasserleitern, z. B. die Wasseraufbereitung (Griebler & Lueders, 2009). In Laborstudien bei Temperaturen > 45 °C wurden Veränderungen hin zu (stärker) reduzierenden Bedingungen beobachtet, die mit Veränderungen in der Vielfalt und Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften einhergingen (Griebler et al., 2016). So verschob sich beispielsweise eine eisenreduzierende Bakteriengemeinschaft, die normalerweise bei 11 °C wuchs, zu einer Gemeinschaft, die unter thermophilen (60 °C) Bedingungen von thermophilen fermentierenden und sulfatreduzierenden Bakterien dominiert wurde (Bonte et al., 2013). Unser Labor konnte in einer Laborstudie zeigen, dass sich bei einer Temperatur von 60°C in Aquifersedimenten thermophile mikrobielle Gemeinschaften entwickeln, die weniger divers sind als das natürliche Aquifermikrobiom (Metze et al., 2021). In einem Feldexperiment haben wir die anfängliche Betriebsphase eines HT-ATES-Systems mit einem Impuls von ~75 °C Wasserinfiltration simuliert (Keller et al., 2021). Der vorübergehende Hitzestress hatte keine signifikanten Auswirkungen auf das Grundwassermikrobiom, wie Proben zeigten, die bei mäßig (< 35 °C) erhöhten Grundwassertemperaturen aus Brunnen entnommen wurden, die während der Infiltration ~65 °C erreichten. Darüber hinaus gibt es aber kaum Daten aus Feldstudien, wie und wie schnell sich HT-ATES auf die Struktur und Funktion des Aquifermikrobioms auswirkt. Die Ergebnisse von Biodiversitätsanalysen des Betriebs geothermischer Anlagen in einem tiefen salinen Aquifer deuten darauf hin, dass sich bei erhöhten Temperaturen thermophile Gemeinschaften entwickeln (Lerm et al., 2013), aber Sukzessionsmuster, detaillierte Strukturen und Stoffwechsellpotenziale von mikrobiellen Gemeinschaften, die durch den Betrieb von HT-ATES in flachen Aquiferen beeinflusst werden, wurden bisher nicht bestimmt.

1.3 Anthropogen verursachte Grundwasserkontaminationen versus ATES: Hemmnis oder Chance?

An urbanen Standorten ist Grundwasser häufig mit organischen Schadstoffen kontaminiert, z.B. mit chlorierten organischen Lösungsmitteln (CKW) oder mit Kohlenwasserstoffen (KWS). Diese kontaminierten Flächen müssen vor oder während einer (Neu-)Entwicklung saniert werden. Auf biologischen Prozessen basierende Sanierungsverfahren für CKWs und KWS sind marktreif und werden seit mehreren Jahrzehnten angewandt; beispielsweise können chlorierte Ethene wirksam und effizient entfernt werden, wenn das Grundwasser anoxisch ist sowie Elektronendonatoren und autochthone Mikroorganismen wie *Dehalococcoides spp.* vorhanden sind, die die chlorierten Ethene reduktiv dechlorieren (Bin Hudari et al., 2022). Diese *in situ* ablaufenden mikrobiellen Abbaureaktionen können unter anderem durch die

Heterogenität des Untergrunds, suboptimale geochemische Bedingungen oder durch niedrige Grundwassertemperaturen eingeschränkt sein (Simpkin & Norris, 2010).

Grundwasserkontaminationen stellen *per se* eine Herausforderung für die ATES-Technologie dar aufgrund der damit verbundenen Notwendigkeit, gegebenenfalls das für ATES zu verwendende Grundwasser zu reinigen, was die Kosten erhöhte. In der Praxis werden viele ATES-geeignete Standorte im urbanen Raum aber kontaminiert sein, so dass ein Interesse besteht, nach kostengünstigen und effektiven Lösungen zu suchen. Eine Win-Win-Situation kann entstehen, wenn durch die im Zuge des ATES-Betriebes erhöhten Temperaturen im Aquifer der natürliche Abbau der Kontaminanten am Standort beschleunigt wird, ATES quasi wie eine Enhanced Natural Attenuation-Maßnahme wirkt.

2. KONATES: Modellversuch zur Nutzung kontaminierter Aquifere für eine Wärmebewirtschaftung mit ATES Anlagen

In dem BMBF-geförderten Pilotvorhaben KONATES wird der zyklische Betrieb einer thermischen Bewirtschaftung im Temperaturintervall zwischen nativer Grundwassertemperatur bis 70°C in einem unterhalb des Leipziger Campus des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung - UFZ liegenden, hauptsächlich mit Trichlorethylen (TCE) und Dichlorethylen (DCE) kontaminierten Grundwasserleiter untersucht, um die thermische Bewirtschaftung mit einer Grundwassersanierung zu verbinden. Es werden Technologien zur Schadstoffentfernung aus geförderten Wässern, die als Wärmeträger verwendet werden, entwickelt und im Feldversuch erprobt sowie numerische Modelle entwickelt, die die Beiträge urbaner ATES-Anlagen für eine zukünftige urbane Wärmeleitplanung abschätzen und die ökonomischen Aspekte der Wärmebewirtschaftung (generische und konzeptionelle Betrachtung) systemintegrativ aufzeigen. Ein wichtiger weiterer Aspekt des Projekts ist es, biogeochemische Prozesse an den durch die Wärmebewirtschaftung verursachten thermischen Gradienten zu untersuchen; es sollen natürlich ablaufende mikrobielle Schadstoffabbauprozesse am Standort erkannt, eine mögliche thermische Beeinflussung der Abbauprozesse erfasst und Parameter zur Modellierung des mikrobiellen Abbaus in verschiedenen Zonen der Wärmefahne erarbeitet werden. Hierzu sollte die mikrobielle Diversität des Grundwassermikrobioms vor, während und nach der Wärmebehandlung in verschiedenen Bereichen des Testfelds mittels Sequenzierung des für die 16S rRNA codierenden Gens analysiert sowie die $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{37}\text{Cl}$ -Isotopensignaturen der im Grundwasser gelösten Schadstoffe TCE und *cis*-DCE bestimmt werden.

3. Erste Ergebnisse und Diskussion

3.1 HT-ATES Feldversuch

Im Sommer und Herbst 2024 wurde ein HT-ATES-Feldversuch auf dem KONATES-Testfeld des Leipziger Helmholtz Zentrums für Umweltforschung - UFZ durchgeführt. Vom 23.06. bis 4.07. wurde auf 70°C aufgeheiztes, vorab in einer *on site*-Pilotanlage von TCE und anderen Schadstoffen gereinigtes Grundwasser über einen ‚warmen‘ Injektionsbrunnen in den Aquifer eingeleitet; nach kurzer Speicherphase (1 Tag) wurde das Wasser anschließend innerhalb einer Woche wieder aus dem Injektionsbrunnen entnommen, gereinigt, heruntergekühlt und in einen knapp 30 m entfernt im Anstrom befindlichen ‚kalten‘ Brunnen reinfiltiert. Vom 18.08. bis 26.09. wurden zwei weitere identische Zyklen gefahren. Insgesamt 12 im An- und Abstrom des Injektionsbrunnens sowie außerhalb des Wärmefeldes lokalisierte Grundwassermessstellen (GWMS) ermöglichten es, die entstehende Wärmefahne im Aquifer detailliert aufzulösen und biogeochemische Prozesse zu verfolgen.

3.2 Erste Ergebnisse des Biodiversitätsmonitorings

3.2.1. Baselinemonitoring

In einem Baselinemonitoring wurde vor Beginn des Feldversuchs die natürliche Diversität des Mikrobioms in den Grundwässern der Grundwassermessstellen bestimmt. Die Grundwassermikrobiome der einzelnen GWMS unterscheiden sich zum Teil stark

voneinander, d.h. die natürliche Diversität ist räumlich heterogen, wie es auch schon in vorherigen Studien zur mikrobiellen Diversität von lokalen Grundwasserleitern festgestellt worden war (Keller et al., 2021; Zelaya et al., 2019). Am häufigsten kamen *Gamma*- und *Alphaproteobacteria* vor neben *Campylobacteria*, *Dehalococcoidia*, *Patescibacteriia* und *Nitrospira*; alle genannten Klassen bis auf *Dehalococcoidia* kommen typischerweise in höheren Anzahlen in pristinen oberflächennahen Grundwasserleitern vor (Keller et al., 2021). In einigen GWMS wurden gehäuft Organismen detektiert, die mit sulfatreduzierenden Organismen verwandt sind (Phylum *Desulfobacterota*), so dass anzunehmen ist, dass Sulfat ein wichtiger Elektronenakzeptor im untersuchten Aquifer ist, die Bedingungen strikt anoxisch sind. In sieben GWMS wurden z.T. hohe (>10%) Anzahlen von Verwandten der Klasse *Dehalococcoidia* beobachtet; in dieser finden sich typischerweise Organismen, die chlorierte organische Verbindungen wie TCE reaktiv dechlorieren können (Bin Hudari et al., 2022), ein deutlicher Hinweis, dass am Standort TCE von *Dehalococcoidia in situ* reaktiv dechloriert wurde und sich die Organismen durch diesen Prozess vermehrten. Korrespondierend dazu reduzierten mit Standortgrundwasser und -aquifersediment gefüllte und mit TCE und Lactat versetzte anaerobe Labormikrokosmen TCE zu cis-DCE und partiell weiter zu Vinylchlorid und Ethen (Daten nicht gezeigt). Von besonderer Bedeutung für das Feldexperiment ist die GWMS 2/24, da sich diese Messstelle nahe des Injektionsbrunnens des warmen Wassers befindet und dort die höchsten Temperaturen aller GWMS während der Wärmeinjektion auftraten. Das Mikrobiom des Grundwassers der GWMS 2/24 bestand zum Zeitpunkt des Baselinemonitorings zu über 80% aus *Campylobacteria* und unterschied sich deshalb deutlich von den Mikrobiomen des Grundwassers der restlichen Messstellen, in denen Vertreter dieser Klasse in weitaus geringen Anzahlen vorkamen. Die identifizierten *Campylobacteria* sind verwandt mit Organismen, die typischerweise reduzierte anorganische Schwefelverbindungen oxidieren können (Daten nicht gezeigt). Die GWMS 2/24 wurde erst kurz vor dem Baselinemonitoring errichtet, so dass anzunehmen, dass beim Bau der Messstelle Luftsauerstoff in den Aquifer gelangte und anschließend reduzierte, im Sediment festgelegte anorganische Schwefelverbindungen wie Eisensulfide durch *Campylobacteria* oxidiert wurden und sich diese deshalb stark vermehrten. Für diese Hypothese spricht, dass in den späteren Probenahmen während des Feldversuchs die *Campylobacteria* nur noch sporadisch auftraten, weil sich die geochemischen Bedingungen wieder geändert hatten hin zu einer sauerstofffreien Umgebung.

3.2.2 Einfluss der Temperatur auf die Struktur des Grundwassermikrobioms

Während der drei Zyklen des Feldversuchs zur Wärmebewirtschaftung wurden aus ausgewählten GWMS vor, während und nach der Wärmeinfiltration Grundwasserproben entnommen und die darin enthaltenen Mikrobiome analysiert. Die nahe des Wärmeinfiltrationsbrunnens lokalisierte GWMS 2/24 ermöglichte es, temperaturbedingte Veränderungen des Mikrobioms hinsichtlich thermophiler Organismen zu untersuchen, da sich in dieser GWMS die Temperatur des Grundwassers während der zehntägigen Infiltrationsphase auf über 50°C erhöhte. In Folge der ersten Wärmeinfiltration änderte sich das Grundwassermikrobiom drastisch: die im Baselinemonitoring so dominanten *Campylobacteria* waren stark reduziert, dafür hatte sich der Anteil an Vertretern des Phylums *Firmicutes* (neuerdings: *Bacillota*) deutlich erhöht. Dem Phylum *Firmicutes* gehören die endosporenbildenden Organismen an, z.B. Vertreter der Klassen *Bacilli* und *Clostridia*, in denen zahlreiche thermophile Organismen vorkommen. Innerhalb der in den Grundwässern der GWMS 2/24 gefundenen *Firmicutes* wurden auch Phylotypen identifiziert, die verwandt sind mit typischen thermophilen Taxa, z.B. die Gattungen *Thermomonas* und *Carboxydotherrmus*. Dies ist ein deutlicher Hinweis, dass sich im Zuge der zehntägigen Wärmeinfiltration in der natürlichen mikrobiellen Aquiferlebensgemeinschaft vorhandene thermophile Organismen vermehrten. Der Anteil der *Firmicutes* ging im Baselinemonitoring vor dem zweiten und dritten HT-ATES-Zyklus stark zurück, dafür tauchten Vertreter der *Desulfobacterota* gehäuft auf, ein Hinweis, dass im Umkreis der GWMS 2/24 sulfatreduzierende Prozesse im Anschluss an die Wärmeinfiltration stattgefunden hatten.

Während der zweiten und dritten Wärmeinfiltration waren die *Firmicutes* wieder stärker vertreten, deren Anteile reduzierten sich in der Extraktionsphase und insbesondere im nachfolgenden Baselinemonitoring aber wieder. Generell waren in allen Versuchsphasen bis auf das Baselinemonitoring hohe Anteile (bis über 50%) an nicht weiter klassifizierbaren Bacteria zu beobachten, deren mögliche Funktion im Mikrobiom aufgrund der fehlenden Verwandtschaft zu bekannten Organismen nicht eingeschätzt werden kann.

3.3 Isotopensignaturen

Über die Analyse von Isotopensignaturen können enzymatisch katalysierte Abbau- oder Transformationsreaktionen identifiziert und charakterisiert werden, die mit der Spaltung und Bildung von kovalenten chemischen Bindungen einhergehen (Elsner, 2010). Die reduktive Dechlorierung von TCE zu *cis*-DCE ist in der Regel mit einer signifikanten Kohlenstoff- (Cichocka et al., 2008) und Chlorisotopenfraktionierung (Lihl et al., 2019) verbunden, so dass es sich anbietet, die komponentenspezifische Isotopenanalyse als analytisches Tool zum Nachweis dieser Reaktion zu verwenden. Die *in situ*-Konzentrationen von TCE und *cis*-DCE im untersuchten Aquifer sind in der Regel kleiner als 1 mg/L, so dass im Rahmen des KONATES-Projektes zuerst eine bestehende Methode zur Analyse der Kohlenstoffisotopen in TCE und *cis*-DCE modifiziert wurde, um kleine Konzentrationen messen zu können. Diese wurde erfolgreich etabliert und erste Ergebnisse für Kohlenstoffisotopensignaturen von TCE und *cis*-DCE aus Grundwasserproben vom Testfeld liegen vor. Beim Baselinemonitoring vor Beginn der Wärmeinjektion lagen die TCE-Konzentrationen in einem Bereich <10 µg/L bis 401 µg/L und die *cis*-DCE-Konzentrationen in einem Bereich 11 µg/L bis 181 µg/L. Kohlenstoffisotopensignaturen waren für Konzentrationen ≥ 79 µg/L (TCE) sowie ≥ 60 µg/L (*cis*-DCE) messbar. Für TCE lagen die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zwischen -16,57 und -23,89, wobei die höheren Werte generell mit niedrigen Konzentrationen korrelierten, was auf *in situ*-ablaufende Abbauprozesse hinweist. Für *cis*-DCE wurden $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von -18,63 und -22,2 detektiert.

4. Bisherige Schlussfolgerungen

Die bisherigen Ergebnisse der Schadstoff- und Isotopenanalytik und der Bestimmungen der mikrobiellen Diversität auf dem Testfeld sowie der im Labor mit Aquifersediment und Grundwasser durchgeführten Mikrokosmenexperimente lassen darauf schließen, dass unter natürlichen Bedingungen im Aquifer TCE reduktiv zu *cis*-DCE dechloriert wird durch *Dehalococcoides*-ähnliche Organismen. Wie sich Wärme auf die reduktive Dechlorierung auswirkt, wird derzeit in Laborexperimenten untersucht. Ferner deuten die Daten darauf hin, dass Temperaturen um 50°C zu einer Zunahme von endosporenbildenden und potentiell thermophilen mikrobiellen Taxa des Phylums *Firmicutes* im Grundwasser führen.

Literaturverzeichnis

Arning, E., et al. (2006): Einfluss oberflächennaher Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. *Grundwasser* 11: 27-39.

Bin Hudari, M.S., et al. (2022): Effect of temperature on microbial reductive dehalogenation of chlorinated ethenes: a review. *FEMS Microbiology Ecology* 98: 1-18.

BMWK (2023): <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2023/03/05-waermewende.html>

Bonte, M., et al. (2011) Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: a case study from the Netherlands. *Water Science and Technology* 63: 1922-1931.

Bonte, M., et al. (2013): Impacts of Shallow Geothermal Energy Production on Redox Processes and Microbial Communities. *Environmental Science & Technology* 47: 14476-14484.

- Brons, H.J., et al. (1991): (Bio)Geochemical Reactions in Aquifer Material from a Thermal-Energy Storage Site. *Water Research*, 1991. 25(6): p. 729-736.
- Cichocka, D., et al. (2008): Variability in microbial carbon isotope fractionation of tetra- and trichloroethene upon reductive dichlorination. *Chemosphere* 71: 639-648.
- Elsner, M. (2010): Stable isotope fractionation to investigate natural transformation mechanisms of organic contaminants: principles, prospects and limitations. *Journal of Environmental Monitoring* 12: 2005-2031.
- Fleuchaus, P., et al. (2018) Worldwide application of aquifer thermal energy storage - A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 94: 861-876.
- Fleuchaus, P., et al. (2020): Risk analysis of High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES). *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 133: 110153
- Griebler, C. & M. Avramov (2015): Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Science* 34: 355-367.
- Griebler, C., et al. (2016): Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. *Environmental Earth Sciences* 75: 1391.
- Griebler, C. & T. Lueders (2009): Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. *Freshwater Biology* 54: 649-677.
- Keller, N.S., et al. (2021): Monitoring of the effects of a temporally limited heat stress on microbial communities in a shallow aquifer. *Science of the Total Environment* 781: 146377.
- Lee, K.S. (2010): A Review on Concepts, Applications, and Models of Aquifer Thermal Energy Storage Systems. *Energies* 3: 1320-1334.
- Lerm, S., et al. (2013): Thermal effects on microbial composition and microbiologically induced corrosion and mineral precipitation affecting operation of a geothermal plant in a deep saline aquifer. *Extremophiles* 17(2): 311-327.
- Lienen, T., et al. (2017): Effects of thermal energy storage on shallow aerobic aquifer systems: temporary increase in abundance and activity of sulfate-reducing and sulfur-oxidizing bacteria. *Environmental Earth Sciences* 76: 261.
- Lihl, C., et al. (2019): Mechanistic Dichotomy in Bacterial Trichloroethene Dechlorination Revealed by Carbon and Chlorine Isotope Effects. *Environmental, Science & Technology* 53: 4245-4254.
- Lüders, K., et al. (2016): Gas-phase formation during thermal energy storage in near-surface aquifers: experimental and modelling results. *Environmental Earth Sciences* 75: 1404.
- Lüders, K., et al. (2020): Temperature influence on mobilisation and (re)fixation of trace elements and heavy metals in column tests with aquifer sediments from 10 to 70 degrees C. *Water Research* 169: 115266.
- Menberg, K., et al. (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of The Total Environment* 442: 123-133.
- Metze, D., et al. (2021): Temperature management potentially affects carbon mineralization capacity and microbial community composition of a shallow aquifer. *FEMS Microbiology Ecology* 97: fiae261.
- Novo, A.V., et al. (2010): Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. *Applied Energy* 87: 390-397.

Simpkin, T.J. & Norris, R.D. (2010): Engineering and implementation challenges for chlorinated solvent remediation. In: In situ remediation of chlorinated solvent plumes (Editoren: Stroo, H.F. & Ward, C.H.). Springer Science+Business Media: New York, S. 109-143.

Zelaya, A.J., et al. (2019): High spatiotemporal variability of bacterial diversity over short time scales with unique hydrochemical associations within a shallow aquifer. Water Research 164: 114917.

Anschriften der Autorinnen/Autoren

Jan Birkigt, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Technische Biogeochemie, Permoserstraße 15, 04288 Leipzig, +49 341 2049, jan.birkigt@ufz.de

Raphael Hopp, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Technische Biogeochemie, Permoserstraße 15, 04288 Leipzig, raphael.hopp@ufz.de

Finn Höfgen, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Technische Biogeochemie, Permoserstraße 15, 04288 Leipzig, finn.hoefgen@ufz.de

Nina Sophie Keller, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Technische Biogeochemie, Permoserstraße 15, 04288 Leipzig, nina-sophie.keller@ufz.de

Steffen Kümmel, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Technische Biogeochemie, Permoserstraße 15, 04288 Leipzig, steffen.kuemmel@ufz.de

Robert Köhler, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Technische Biogeochemie, Permoserstraße 15, 04288 Leipzig, robert.koehler@ufz.de

Holger Weiß, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Umweltinformatik, Permoserstraße 15, 04288 Leipzig, holger.weiss@ufz.de

Ivonne Nijenhuis, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Technische Biogeochemie, Permoserstraße 15, 04288 Leipzig, ivonne.nijenhuis@ufz.de

Carsten Vogt, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Technische Biogeochemie, Permoserstraße 15, 04288 Leipzig, +49 341 6025 1357, carsten.vogt@ufz.de

Entwicklung der komponenten-spezifischen Isotopenanalyse von PFAS für deren Quellenidentifizierung und Abbaubewertung

Kevin Kuntze, Steffen Kümmel, Anett Georgi, Anko Fischer

1 Einleitung

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind Industriechemikalien mit teils äußerst problematischen Eigenschaften. Aufgrund ihrer extremen Langlebigkeit und Toxizität stellt die Reinigung von PFAS-belasteten Grundwässern und Böden eine erhebliche Herausforderung dar. Umweltbehörden und Fachverbände fordern detaillierte Untersuchungsmethoden, um daraus effiziente Sanierungsstrategien abzuleiten.

Eine Schlüsselmethode für eine fundierte Quellenidentifizierung und Schadstoffabbau-bewertung ist die Analyse stabiler Isotope [1]. Isotope sind Atome ein und desselben Elements, die sich nur durch die Zahl der Neutronen unterscheiden. Die stabilen Isotope eines Elements stehen in einem bestimmten Verhältnis zueinander (z.B. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$; $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$), das analytisch bestimmt werden kann. Entscheidend dabei ist, dass sich dieses Isotopenverhältnis durch Abbauprozesse verändert (sog. Isotopenfraktionierung). Dadurch lassen sich nicht nur die Abbauewege von Schadstoffen bestimmen, sondern auch das Ausmaß des Schadstoffabbaus (z.B. die Abbaurate) direkt quantifizieren. Diese Informationen sind essentiell für die Planung und Kontrolle von energieeffizienten und kostensparenden Sanierungstechnologien.

Darüber hinaus ermöglicht der isotopische Fingerabdruck von Schadensquellen eine Rückverfolgung der Schadensverursacher. Bei der Herstellung organischer Verbindungen können unterschiedliche Ausgangsstoffe verwendet werden, die jeweils charakteristische Isotopenverhältnisse aufweisen. Zudem kann der Herstellungsprozess selbst diese Isotopenverhältnisse weiter beeinflussen. Daher weisen organische Verbindungen je nach Herstellungsprozess und Isotopensignaturen ihrer Ausgangsprodukte verschiedene Ausgangsisotopenverhältnisse (Primärisotopensignaturen) auf.

Daher sollte erstmals ein solches Untersuchungsverfahren speziell für PFAS entwickelt werden.

2 Entwicklung einer Kohlenstoffisotopenanalyse

Bei der Kohlenstoffisotopenanalyse ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -CSIA) ist eine vollständige chemische Umsetzung (Oxidation) der Analyten zu CO_2 erforderlich. Dieses dient als Messgas zur Bestimmung des Kohlenstoffisotopenverhältnisses ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) im Isotopenverhältnis-Massenspektrometer (IRMS). Eine unvollständige Oxidation kann zu einer unzureichenden Messgenauigkeit und folglich fehlerhaften Isotopenwerten führen.

Als Herausforderungen für die Kohlenstoffisotopenanalyse an PFAS erwiesen sich die vollständige Umsetzung der thermostabilen Verbindungen zum Messgas (CO_2) für die Isotopenanalyse, die Bildung unerwünschter Nebenprodukte (u.a. HF) sowie die eingeschränkte Eignung gaschromatographischer Trennverfahren für Gaschromatographie-(GC)-IRMS. Trotz dieser großen Herausforderungen ist es uns gelungen, eine Methode zur Kohlenstoffisotopenanalyse von Perfluorcarbonsäuren zu entwickeln. Das Verfahren basiert auf der Derivatisierung der Carbonsäuregruppe mittels Methylierung, wodurch die Perfluorcarbonsäuren durch Gaschromatographie (GC) analysierbar (Abbildung 1).

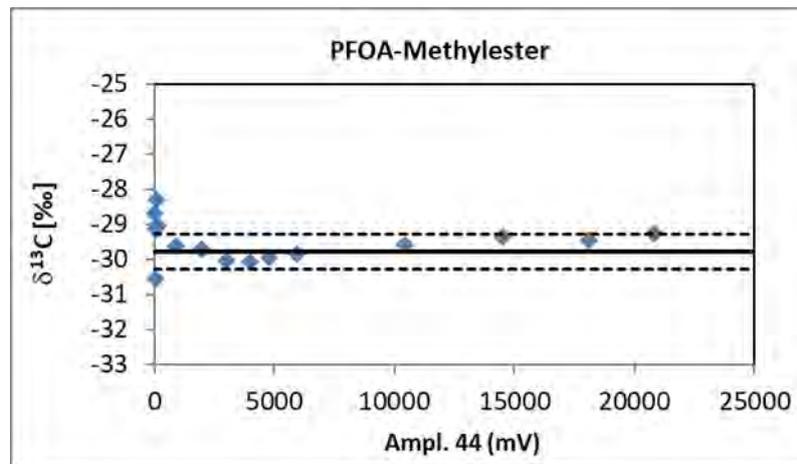


Abb.1: Ermittelte $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (blaue Dreiecke) von PFOA-Methylester in Abhängigkeit von der Signalintensität (Ampl. 44). Die schwarze Linie zeigt den Soll- $\delta^{13}\text{C}$ -Wert von PFOA, die gestrichelten Linien zeigen den typischen Fehlerbereich ($\pm 0,5$ ‰) von Kohlenstoffisotopenanalysen organischer Schadstoffe an [2].

3 Bestimmung der Isotopenfraktionierung im chemischen Abbau von PFOA

Aufgrund ihrer chemischen Stabilität und Persistenz gegenüber biologischem Abbau stellen PFAS eine erhebliche Herausforderung für traditionelle Wasseraufbereitungstechnologien dar. Die Adsorption an Aktivkohle bzw. Ionenaustauschern sowie die Umkehrosmose können PFAS zwar effektiv aus dem Wasser entfernen, doch die endgültige Zerstörung dieser persistenten Verbindungen bleibt eine Herausforderung. Dies gilt auch für die Schaumfraktionierung, die insbesondere langkettige PFAS sehr gut anreichert [3,4].

In Labor- und Pilotstudien haben sich verschiedene Abbauverfahren für PFAS als potenziell geeignet erwiesen, darunter die Aquasonolyse, die elektrochemische Oxidation, die Photokatalyse, die chemische Reduktion sowie die chemische Oxidation mittels Sulfatradikalen [5]. Die Anwendbarkeit der Isotopenanalytik für die Sanierungsbewertung dieser innovativen Methoden wurde anhand von Laborversuchen zum reduktiven und oxidativen Abbaubewertungen näher untersucht.

3.1 Oxidativer Abbau über Sulfatradikale

Für die Gruppe der Perfluoralkansäuren (PFCAs) sowie polyfluorierte Verbindungen wie Fluortelomere (nicht jedoch für Perfluoralkansulfonsäuren wie PFOS) ist ein Abbau durch Sulfatradikale möglich. Diese können durch katalytische, thermische oder photochemische Aktivierung von Persulfaten erzeugt werden [6,7]. Der initiale Abbauschritt für Perfluoralkansäuren erfolgt über einen Elektronentransfer auf das Sulfatradikal.

Ein Vergleich des PFOA-Abbaus mit Persulfat direkt im Wasser zeigte Unterschiede in der Reaktionsgeschwindigkeit bei 70°C und bei Raumtemperatur. Der PFOA-Abbau mit Persulfat bei niedrigen Temperaturen ist insbesondere für in-situ-Anwendungen im Grundwasserleiter interessant, da eine moderate Erwärmung des Grundwassers auf 20 bis 40°C technisch durchaus realisierbar wäre. Allerdings verläuft die Persulfatzersetzung bei niedrigen Temperaturen wesentlich langsamer ab, was zu einer geringeren Konzentration an gebildeten Sulfatradikalen und somit zu einem verlangsamten PFOA-Abbau führt.

Die Ergebnisse zur Kohlenstoffisotopenanalyse des oxidativen Abbaus mittels aktiviertem Persulfat zeigten für alle untersuchten Reaktionsbedingungen eine Verschiebung hin zu

positiveren $\delta^{13}\text{C}$ -Werten für PFOA (Abbildung 2). Es wurde demnach erstmalig ein Isotopeneffekt bzw. eine Isotopenfraktionierung im oxidativen Abbau von PFOA nachgewiesen.

3.2 Reduktiver Abbau

Eine weitere Möglichkeit zum Abbau von PFAS ist die chemische Reduktion, die auf der Bildung von hydratisierten Elektronen basiert. Diese können durch eine photolytische Aktivierung von Sulfid oder Iodid mittels UV-Strahlung erzeugt werden. Die hochreaktiven hydratisierten Elektronen sind in der Lage direkt die C-F-Bindungen anzugreifen und ermöglichen somit einen schrittweisen Abbau der PFAS-Kette.

Die Ergebnisse der Isotopenuntersuchung zur reduktiven Defluorierung zeigen eine deutliche Kohlenstoffisotopenfraktionierung. Im Verlauf des PFOA-Abbaus wurde der $\delta^{13}\text{C}_{\text{PFOA}}$ -Wert zunehmend positiver.

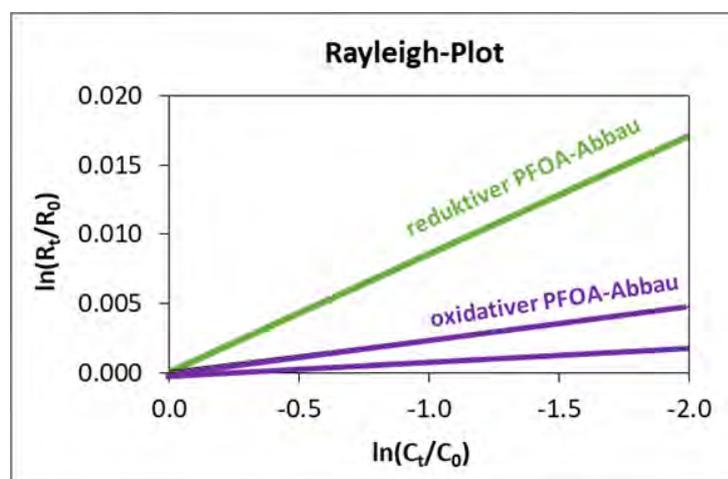


Abb.2: Rayleigh-Plot zur Unterscheidung verschiedener Reaktionsprozesse im chemisch induzierten PFOA-Abbau.

Die aus den Laborversuchen gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Etablierung von Machbarkeitsstudien zu möglichen standortspezifischen PFAS-Sanierungsverfahren.

Derzeit existieren noch keine in-situ Sanierungsverfahren, die eine vollständige Zerstörung von PFAS in kontaminierten Böden und Grundwasser ermöglichen. Lediglich Adsorptionsverfahren werden zur Immobilisierung von PFAS eingesetzt. Ein vielversprechender Ansatz ist die Anwendung von Zeolithen in kolloidaler Form zur PFAS-Adsorption und nachfolgenden Zerstörung der adsorbierten PFAS durch Persulfat. Diese Methode kann sowohl für Anwendungen als Festbettadsorber mit vor-Ort-Regenerierung zur Wasserreinigung als auch für die in-situ-Sanierung eingesetzt werden, da die Zeolithpartikel in kolloidaler und somit einspülbarer Form verfügbar sind. Die ermittelten Isotopenfraktionierungsfaktoren für den PFOA-Abbau stellen Werkzeuge zum Nachweis des Abbaus der Verbindungen während dieser Sanierungsmethoden dar.

3.3 Feldanwendung

Für die erstmalige Feldanwendung des entwickelten Methodenpakets wurden verschiedene Standorteigner und Behörden kontaktiert und die entsprechenden Proben bezogen. Die analysierten $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von PFOA zeigten zum Teil deutliche Unterschiede auf. Einige PFOA-

Proben wiesen sehr ähnliche $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (-33,5 ‰ bis -34,0 ‰), was auf eine gemeinsame PFOA-Quelle hindeutet. Im Vergleich dazu wiesen andere PFOA-Proben zwar ebenfalls zueinander ähnliche Werte auf, waren jedoch deutlich positiver (bis zu -29,4 ‰). Dies könnte entweder auf unterschiedliche PFOA-Eintragsquellen oder auf einen bereits fortgeschrittenen Abbau von PFOA in einigen Proben hinweisen, der zu einer Verschiebung hin zu positiveren $\delta^{13}\text{C}$ -Werten führt.

Da ein natürlicher PFOA-Abbau bisher noch nicht in-situ nachgewiesen werden konnte, erscheint die Möglichkeit von zwei unterschiedlichen PFAS-Schadstoffquellen als die plausibelste Erklärung. Die Bildung aus Vorläufern wäre eine weitere Möglichkeit eines veränderten Isotopenverhältnisses.

4 Ausblick

Die Entwicklung der komponenten-spezifischen Isotopenanalyse von PFAS eröffnet neue Möglichkeiten zur verlässlichen Erfolgskontrolle von nachhaltigen PFAS-Sanierungsverfahren sowie zur präziseren PFAS-Quellenerkundung. Durch diese neuartigen Informationen können die Effektivität von PFAS-Sanierungsmethoden energie- und kosteneffizienter bewertet sowie PFAS-Eintragsquellen präziser identifiziert werden.

Bei der Herstellung von organischen Verbindungen können unterschiedliche Ausgangsstoffe mit variierenden Isotopenverhältnissen verwendet werden. Darüber hinaus kann sich das Isotopenverhältnis während des Herstellungsprozesses verändern. Organische Verbindungen weisen demnach je nach Herstellungsprozess und Isotopensignaturen ihrer Ausgangsprodukte verschiedene Ausgangsisotopenverhältnisse (Primärisotopensignaturen) auf, die eine Zuordnung von Schadstoffbelastungen zu potenziellen Kontaminationsquellen ermöglichen.

Zusätzlich zur Kohlenstoffisotopenanalyse eröffnet die Schwefelisotopenanalyse völlig neue Möglichkeiten und Perspektiven zur Abbaubewertung und Quellenidentifizierung von PFAS an kontaminierten Standorten. Da die initialen Reaktionsschritte beim oxidativen Abbau von Perfluorsulfonsäuren an den funktionellen Schwefelgruppen stattfinden, ist beim Abbau eine signifikante Schwefelisotopenfraktionierung zu erwarten. Die Analyse von Schwefelisotopenverhältnissen ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{33}\text{S}/^{32}\text{S}$) hat daher großes Potenzial zum qualitativen und quantitativen Monitoring von PFAS-Schadensfällen. Zukünftig könnte eine mehrdimensionale Isotopenanalyse mit Korrelation von Kohlenstoff- und Schwefelisotopenverhältnissen die Differenzierung von Abbauprozessen weiter verbessern. Ein Schwerpunkt der Forschung könnte daher die Entwicklung einer universellen Methode für die komponenten-spezifische Schwefelisotopenanalyse mittels GC-MC-ICPMS (gas-chromatography inductively-coupled-plasma mass-spectrometry) sein [8].

Literaturverzeichnis

- [1] Kuntze K. et al. (2019) Compound-Specific Stable Isotope Analysis (CSIA) for Evaluating Degradation of Organic Pollutants: An Overview of Field Case Studies. In: Boll M. (eds) Anaerobic Utilization of Hydrocarbons, Oils, and Lipids. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Springer, Cham.
- [2] US EPA (2008) A guide for assessing biodegradation and source identification of organic ground water contaminants using compound specific isotope analysis (CSIA). United States Environmental Protection Agency. EPA 600/R-08/148.
- [3] Wang, Yifei; Ji, Yuqing; Tishchenko, Viktor; Huang, Qingguo (2023): Removing per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water by foam fractionation. In: Chemosphere 311 (Pt 2), S. 137004. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137004.
- [4] Smith, Sanne J.; Lauria, Melanie; Ahrens, Lutz; McCleaf, Philip; Hollman, Patrik; Bjälkefur Seroka, Sofia et al. (2023): Electrochemical Oxidation for Treatment of PFAS in Contaminated Water and Fractionated Foam-A Pilot-Scale Study. In: ACS ES&T water 3 (4), S. 1201–1211. DOI: 10.1021/acsestwater.2c00660.
- [5] Lu, Dingnan; Sha, Sha; Luo, Jiayue; Huang, Zhuangrong; Zhang Jackie, Xiaoqi (2020): Treatment train approaches for the remediation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A critical review. In: Journal of hazardous materials 386, S. 121963. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121963.
- [6] S. Sühnholz et al. (2021) Evidence of heterogeneous degradation of PFOA by activated persulfate–FeS as adsorber and activator. Chem. Engin. J. 423, 130102.
- [7] L. Qian et al. (2021) Enhanced degradation of perfluorooctanoic acid by heat-activated persulfate in the presence of zeolites, Chem. Engin. J. 132500.
- [8] Kümmel et al. (2020) Simultaneous compound-specific analysis of $\delta^{33}\text{S}$ and $\delta^{34}\text{S}$ in organic compounds by GC-MC-ICPMS using medium- and low-mass-resolution modes. Anal. Chem. 92, 14685-14692.

Anschriften der Autorinnen/Autoren

Dr. Kevin Kuntze, Dr. Anko Fischer
Isodetect GmbH
Deutscher Platz 5b
04103 Leipzig
0341 35535851
kuntze@isodetect.de
www.isodetect.de

Dr. Steffen Kümmel, Dr. Anett Georgi
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
Department Technische Biogeochemie
Permoserstraße 15, 04318 Leipzig
0341 60251362
steffen.kuemmell@ufz.de
www.ufz.de

Kompetenz, Innovation und Zuverlässigkeit sind die wesentlichen Säulen der M&P Gruppe

M&P
GROUP



Unsere Expertise

Innovative Dienstleistungen für den Kunden stehen im Mittelpunkt unseres Handelns. Deshalb sind wir mit unserer Vision, das führende deutsche Ingenieurunternehmen zu sein, erfolgreich und entwickeln uns ständig weiter, um unserer Vision treu zu bleiben.

Warum wir das tun?

Weil wir mit unseren Ingenieurleistungen eine bessere Zukunft schaffen wollen!

Unsere Gruppe



 www.mup-group.com
 info@mup-group.com

Abstracts

Neues zu PFAS

*Moderation: Dr. Annegret Biegel-Engler, Umweltbundesamt,
Dessau-Roßlau*

**17.
Elimination von PFAS durch ein On-Site-Bodenwaschverfahren**

Harald Oeder, GEOlogik Wilbers & Oeder GmbH, Münster

**18.
Identifizierung & Differenzierung von PFAS-Quellen im Grundwasser mittels
Multi-Vektor-Analyse auf Basis künstlicher Intelligenz (MVA-AI)**

Dr. Frank Karg, HPC INTERNATIONAL, Duisburg

**19.
Neue Technologien zur Entfernung von PFAS aus Wasser –
aber bitte nachhaltig!**

Dr. Katrin Mackenzie, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig

Elimination von PFAS durch ein On-Site-Bodenwaschverfahren

Harald Oeder

1 Einleitung

Poly- und perfluorierte alkylierte Substanzen (PFAS) gewinnen aufgrund ihrer Persistenz und ubiquitären Nachweisbarkeit im Altlastenmanagement eine immer größere Bedeutung. Insbesondere für die Sanierung von PFAS-Belastungen in der ungesättigten Bodenzone konnte bisher noch kein kosteneffizienter Sanierungsansatz entwickelt werden. Hier wird i.d.R. auf Deponierung oder Hochtemperaturverbrennung zurückgegriffen.

Im Forschungsvorhaben **FABEKO** (BMBF-Förderung, FKZ.: 02WQ1577) wurde aufbauend auf dem im Projekt **BioKon** (BMBF-Förderung, FKZ: 02WQ1397) entwickelten In-Situ-Bodenwaschverfahren ein dreistufiges On-Site-Verfahren zur Reinigung PFAS-belasteter Böden entwickelt. Ziel von FABEKO ist es, den Boden vor Ort in Haufwerken mittels einer speziell auf PFAS abgestimmten, vollständig biologisch abbaubaren Polymerlösung aufzureinigen und nach der Sanierung auf der Fläche wieder einzubauen. Die im Sanierungsverfahren anfallenden Reinigungswässer werden durch Flotation und eines im Projekt neu entwickelten Elektroad-/desorptionsverfahren (mittels elektrostimulierter Aktivkohlevliese) aufgereinigt und anschließend dem Spülkreislauf wieder zugeführt. Durch ein entwickeltes Standortbewertungstool (Prognosemodell) wird die Einsetzbarkeit der neuen Technik für unterschiedliche Standorte überprüft.

2 On-Site-Sanierungsverfahren (FABEKO)

Für das On-Site-Sanierungsverfahren wird der belastete Bodenbereich zunächst am Standort abgetragen und in ein Haufwerk (auch Bodenmiete genannt) eingebaut. Das Haufwerk verfügt über eine Basisabdichtung aus PE-Folie und einem Drainagesystem mit Gefälle zu einem Pumpensumpf, sodass das gesamte auf die Miete aufgegebene Wasser im Pumpensumpf gefasst wird. Mittels einer Sanierungsanlage, verbaut in einem 20' Container, wird Wasser bzw. ein niedrigkonzentriertes Wasser/Biopolymergemisch auf das Haufwerk aufgegeben. Durch die Bodenpassage werden die PFAS aus dem Boden in die wässrige Phase überführt. Das stark PFAS-haltige Perkolat wird im Pumpensumpf aufgefangen und über zwei Wasseraufbereitungsschritte wieder im Kreislauf auf das Haufwerk aufgebracht. Die

Wasseraufbereitung setzt sich aus der Flotation und der Elektroad-/desorption zusammen. Während die Flotation bereits bei BioKon zur Anwendung gekommen ist, wurden die Elektroad-/desorptionsmodule im FABEKO-Vorhaben neuentwickelt.

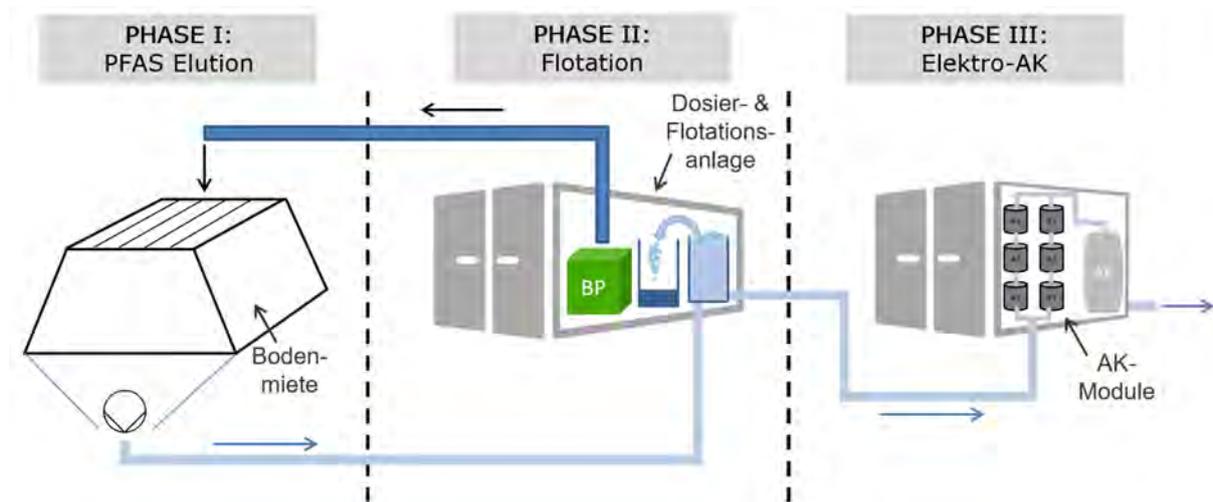


Abb. 1: Verfahrensschema der On-Site Methode im Forschungsvorhaben FABEKO

3 Vorarbeiten für die Pilotversuche

3.1 Optimierung des Biopolymere-Einsatzes

Die Wirksamkeit der biopolymergestützten PFAS-Elution wurde bereits in Laborstudien und im Feldmaßstab in situ mit einer Abreinigung der perfluorierten Carbon- und Sulfonsäuren von bis zu 99% bewiesen. Um das Verfahren an die On-Site-Elution anzupassen, wurden im Rahmen des FABEKO Forschungsvorhabens zunächst weitere Säulenuntersuchungen zur Minimierung des Biopolymerbedarfs bei gleichbleibender PFAS-Elution (Optimierung der Spülzyklen Wasser/Biopolymer) durchgeführt. Die beste Elutionsvariante wurde dann in einem Kleinmietenversuch im Technikumsmaßstab umgesetzt. Hier wurde untersucht, wie eine optimale Verteilung der Biopolymerlösung zur Sättigung der Miete erreicht werden kann, sowie in welcher Größenordnung eine PFAS-Elution möglich ist.

Im Rahmen des Technikumsversuches an der Kleinmiete aus Bodenmaterial von Hügelsheim wurden insgesamt 25 Porenvolumenaustausche (= PVA) durchgeführt. Hierbei erfolgte ein mehrfacher Wechsel der Beaufschlagung mit Wasser bzw. Biopolymer. Des Weiteren wurde je Porenvolumenaustausch das aufgefangene Perkolat auf PFAS analysiert.

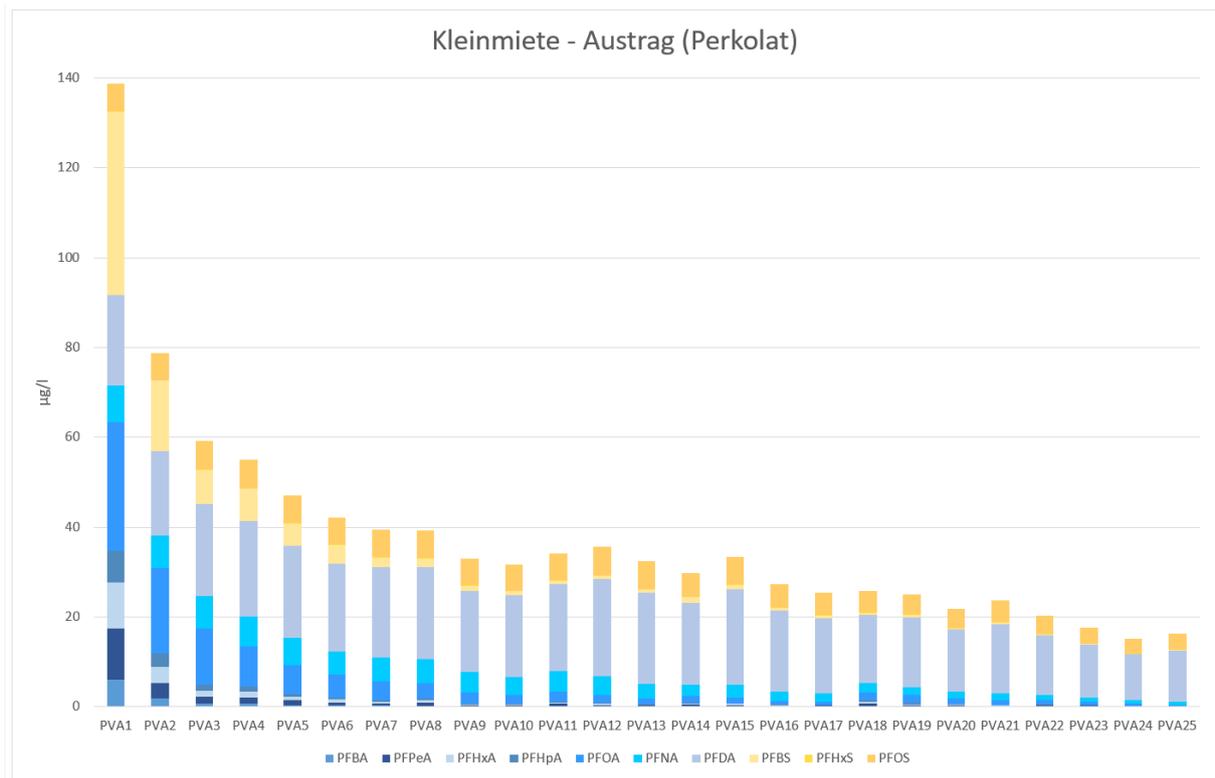


Abb. 2: Ergebnisse der PFAS-Untersuchung der Perkolate der Kleinmiete aus Hügelsheim

Vor und nach dem Versuch wurden Bodenmischproben (MP_{vor} und MP_{nach}) aus der Kleinmiete entnommen und auf PFAS untersucht. Alle nachgewiesenen PFAS-Einzelsubstanzen zeigten eine deutliche Abreinigung von bis zu 98 %; außer für PFDA. Hier wurde trotz kontinuierlichem Austrag mit dem Perkolat eine Anreicherung festgestellt. Die Anreicherung ist sehr wahrscheinlich auf den Zerfall von Precursor-Substanzen (im Raum Rastatt sog. PAP und diPAP aus den Papierschlämmen) zurückzuführen. Der Vergleich der Eluatuntersuchungen aus den Bodenmischproben vor und nach dem Technikumsversuch zeigt eine Abreinigungsleistung von 82 %.

3.2 Schaumfraktionierung (Flotation)

Die Feinreinigung des Wassers mittels Flotation hat das Ziel, die PFAS-Konzentration der abgegebenen Wasser zuverlässig zu senken. Hierbei werden die PFAS durch Aufschäumung und Flotation physikalisch vom Prozesswasser getrennt. Durch feinblasige Luftzugabe (sog. Micro-Bubbles) schäumen die Biopolymere im Prozesswasser auf und bilden darüber eine Schaumschicht, in der die PFAS hochkonzentriert vorliegen. Der PFAS-haltige Schaum wird dann vom Prozesswasser abgescummt und nach Zerfall der Entsorgung (Hochtemperaturverbrennung) zugeführt. Das vorgereinigte Prozesswasser kann dann zur Feinreinigung zum Elektroad-/desorptionsmodul oder zu konventionellen Aktivkohlefiltern geleitet werden.

3.3 Standortbewertungstool (Prognosemodell)

Auf Grundlage der bisherigen Untersuchungsergebnisse wurde ein Standortbewertungstool [1] (basierend auf einem 3D FE-Modell) erstellt. Dieses bildet die wesentlichen Wasser- und Stofftransportprozesse mitsamt der dafür relevanten Standortparameter ab. Die komplexe Modellierung der Stofftransportparameter beruht dabei auf Erkenntnissen von Fabregat et al. (2021) [4].

Die entwickelte Modellierung kann als ressourceneffiziente Abschätzung des Erfolgs der Sanierung an einem Standort angesehen werden, bevor weitere Untersuchungen und Maßnahmen durchgeführt werden. Auch dient sie der Abschätzung der Sensitivität verschiedener systemrelevanter Parameter wie Spülmenge, Biopolymereinsatz und Sanierungsdauer sowie von hydraulischen und physikochemischen Bodeneigenschaften und unterstützt einen optimalen standortspezifischen Aufbau des Systems.

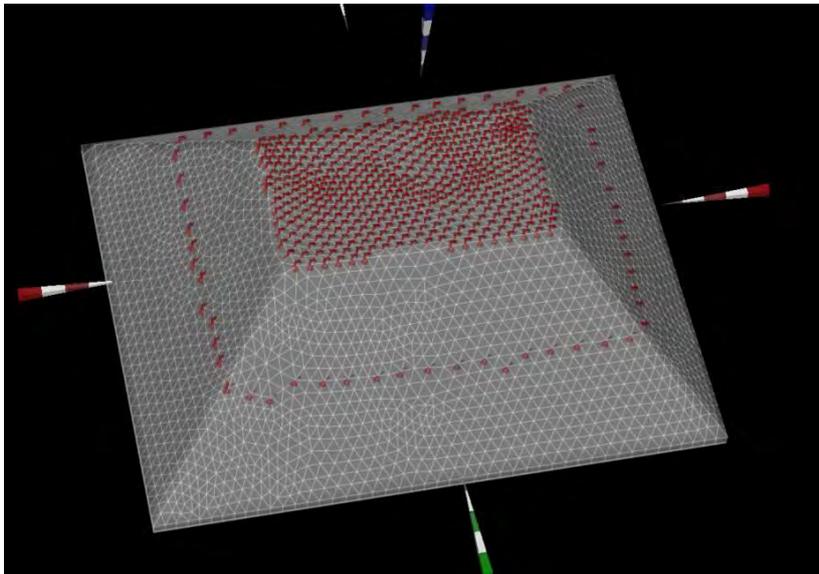


Abb. 3: Haldenmodell mit Bewässerungsgeometrie (rote Symbole)

3.4 Elektroad-/desorption

Das im Pumpensumpf anfallende PFAS-haltige Perkolat wird zur Feinreinigung über mehrere in Reihe und/ oder parallel geschaltete Elektroad-/desorptionsmodule geführt. Durch Elektroadsorption an den in den Modulen verbauten Aktivkohlevliesen wird das Wasser vollständig gereinigt und kann in den Spülkreislauf zurückgeführt werden [2]. Bei Erreichen der Beladungskapazität werden die AK-Vliese dann durch Elektrodesorption regeneriert [3]. Als Adsorber wird Aktivkohle in Form flächiger, feinfaseriger Vliese eingesetzt, die eine speziell auf PFAS abgestimmte hohe Adsorptionsselektivität aufweisen [5] [6]. Neu ist bei der Verwendung der Aktivkohleadsorber die potentialgesteuerte Desorption der PFAS in ein

Konzentrat geringeren Volumens, die für die perfluorierten Tenside PFOA, PFOS und PFBA an den Vliesen in Laborversuchen bereits belegt werden konnte.

4 Pilotversuche

Nach erfolgreichem Abschluss der Labor- und Technikumsversuche wurden im Sommer bzw. Herbst 2023 Feldversuche zur On-site-Sanierung im statischen Mietenverfahren auf zwei Projektstandorten für die Aufreinigung von Papierschlamm- bzw. AFFF-Schäden durchgeführt.

4.1 Feldversuch Hügelsheim

Zur Quantifizierung der Abreinigungsleistung der PFAS-Elution aus dem zu einer Miete aufgeschichteten Oberbodenmaterial mittels Biopolymerlösung wurden vor und nach Durchführung des Feldversuches Bodenproben aus der Miete entnommen (hierbei wurde eine Mischprobe MP_{Gesamt} aus der gesamten Miete sowie MP 1_{außen} und MP 1_{innen} bis MP 4_{außen} und MP 4_{innen} aus den Flanken der Miete aus jeweils 0,0 – 0,3 m und 0,3 – 0,8 m Einstichtiefe entnommen (8 Einstiche pro Fläche) und in die chemische Analytik gegeben.

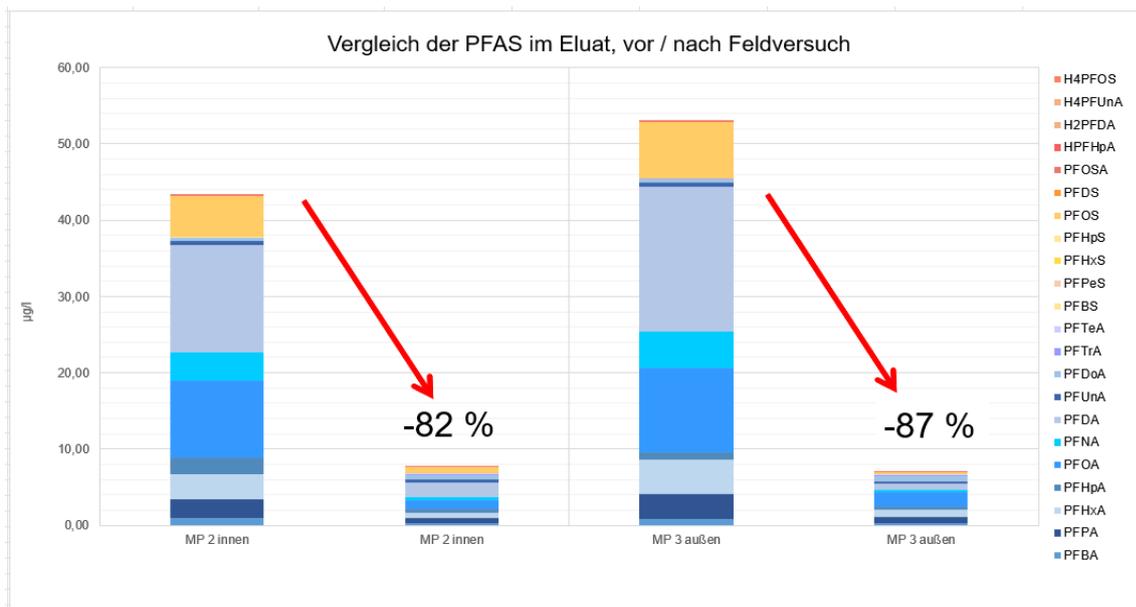


Abb. 4: Vergleich der Eluat-Gehalte aus den Mischproben vor und nach dem Feldversuch

Mengenmäßig wurden aus der Miete am stärksten PFDA, PFOA und PFOS entfernt, die auch im Feststoff im unveränderten Boden bereits den höchsten Anteil in Hügelsheim ausmachten.

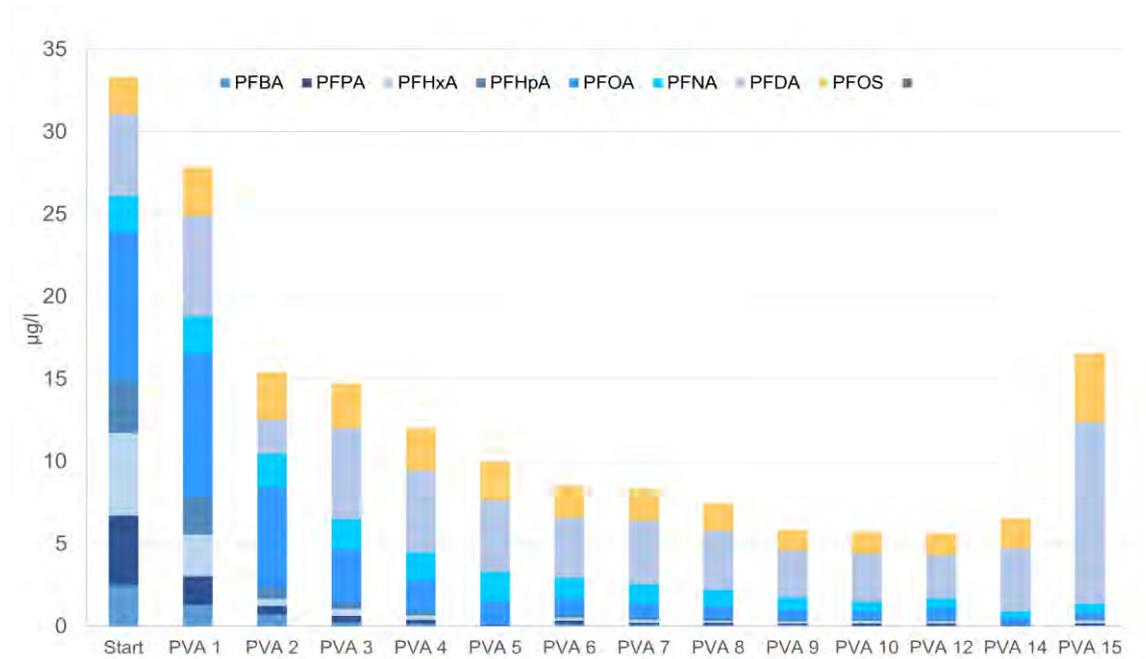


Abb. 5: Perkolat-Austrag aus der Miete beim Feldversuch in Hügelsheim

In Abb. 5 ist der Perkolataustrag im Rahmen der Haufwerksbeschickung in Hügelsheim (definierter mehrfacher Wechsel zwischen Wasser und Biopolymerbeschickung) dargestellt. Auffallend ist der deutliche Rückgang des Austrags zu Beginn des Versuches, der sich im weiteren Verlauf der Durchspülungen bis PVA 14 verlangsamt, aber im Anschluss bei PVA 15 wieder deutlich ansteigt. Offensichtlich wird das Biopolymer beim Durchspülen der Miete retardiert, so dass seine Wirkung erst zeitlich versetzt auftritt. Aufgrund technischer Probleme an der Anlage konnte die eigentliche Versuchsdauer von 25 Tagen (1 PVA/Tag) nicht eingehalten werden und es kam zu längeren Standzeiten. Hierdurch musste auch der Anteil an Porenvolumenaustauschen von 25 auf 15 reduziert werden, wodurch die geplante Abreinigungsleistung nicht voll ausgeschöpft werden konnte

4.2 Feldversuch Flughafenstandort (gesättigtes System)

Um ein vollständig gesättigtes System zu testen, wurde am Flughafenstandort zusätzlich zum aufgehaldeten Boden ein IBC-Container mit belastetem Bodenmaterial gefüllt. An welchem vergleichbare, wenn auch im Volumendurchfluss angepasste Spülzyklen wie in Hügelsheim durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der Feststoffanalytik zeigen eine Abreinigung von 92 % im Feststoff (von 244,2 µg/kg auf 17,9 µg/kg) und für das Eluat eine Abreinigung von 97 %. Als Ergebnis ist hieraus ableitbar, dass die vollständige Aufsättigung des Bodens für den Erfolg der Sanierung sehr vorteilhaft ist. Im größeren Maßstab eines weiteren Testversuchs wäre ein solches System beispielsweise durch die Befüllung von Containern denkbar, welche entsprechend der Bewässerungsplanung zu modifizieren wären.

5 Schlussfolgerungen für die Analytik

Die Gegenüberstellung der PFAS-Standardanalytik im Feststoff und des TOP-Assay belegt für die am Standort **Hügelsheim** untersuchten Mischproben keine Abreinigung, sondern eher eine Zunahme der PFAS-Gehalte nach Durchführung des Feldversuches.

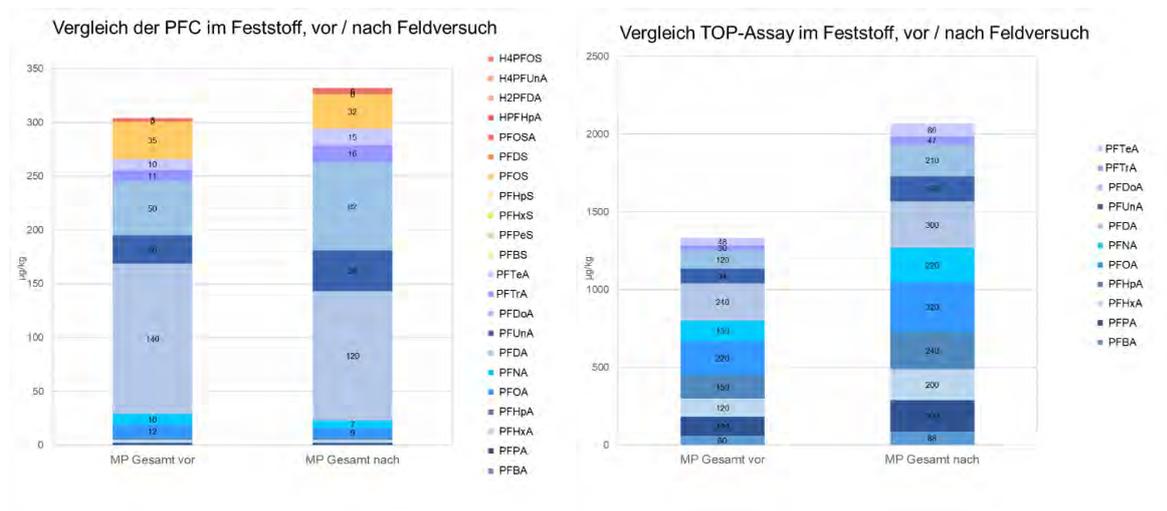


Abb. 6: Vergleich der PFC- (linke Seite) und TOP-Assay-Gehalte (rechte Seite) im Feststoff, jeweils vor und nach dem Feldversuch

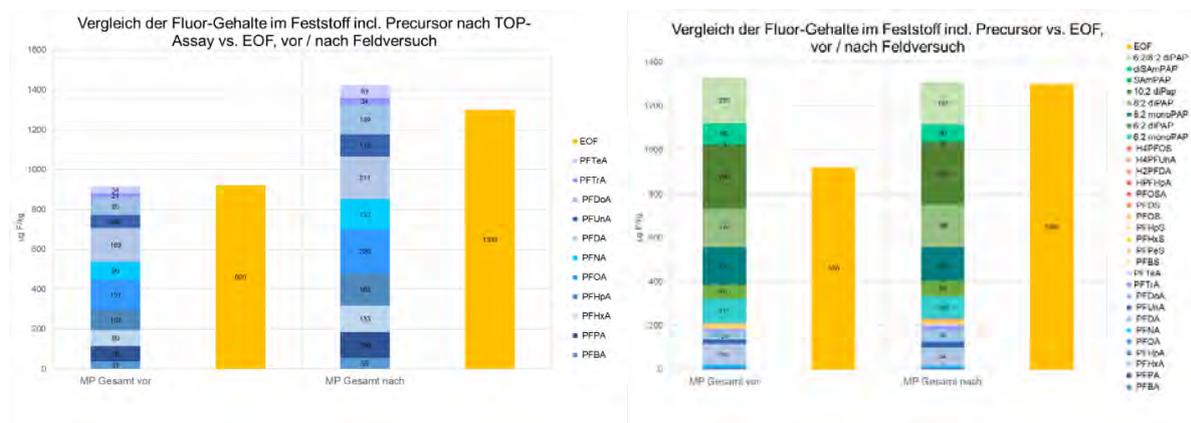


Abb. 7: Vergleich der Fluor-Gehalte im Top-Assay gegenüber EOF (linke Seite) und der Fluor-Gehalte im Feststoff incl. "Precursor" gegenüber EOF (rechte Seite), jeweils vor und nach dem Feldversuch

Im Vergleich Top-Assay (blaue Säule) und EOF (orange Säule) fällt auf das die EOF-Gehalte vergleichbare Größenordnungen aufweisen wie der Top-Assay, d.h. die vorliegenden Precursor-Substanzen werden durch den Top-Assay vollständig aufgeschlossen. Somit ist am Standort Hügelsheim sowohl die EOF-Analytik als auch der Top-Assay zur größenordnungsmäßigen Klassifizierung der Precursor geeignet. Im Vergleich der Fluor-Gehalte im Feststoff einschl. Precursor (grüne Säule) gegenüber EOF (orange Säule) fällt auf, dass auch hier die EOF-Gehalte vergleichbare Größenordnungen aufweisen wie die Summe

der Feststoff- und Precursor-Gehalte. Somit kann der EOF-Gehalt auch quantitativ zur Bestimmung des Fluor-Nachlieferungspotenzials am Standort Hügelsheim herangezogen werden.

Im Rahmen des früheren Forschungsvorhabens BioKon war zumindest „kurzzeitig“ im Feststoff eine Abreinigung feststellbar gewesen (die nach 3 Jahren Standzeit jedoch nicht mehr nachweisbar war). Im TOP-Assay war sowohl bei BioKon als auch bei FABEKO keine Abreinigung feststellbar. Die fehlende Abreinigung im Feststoff bei FABEKO konnte bisher nicht eindeutig geklärt werden. Ggf. hat das on-site-Verfahren aufgrund des stärkeren Einflusses der Sonne auf die Temperaturen im abgeplanten Haufwerk zu einem schnelleren Zerfall der Precursor geführt oder die Masse an Feststoff ist so hoch, dass die geringe Menge an Eluataustrag sich nicht in der Feststoffanalytik wiederfinden lässt (Eluat << Feststoff << Top-Assay \leq EOF). Festzuhalten bleibt, dass die Analytik auf PFAS im Feststoff und/oder Eluat zum Nachweis des Sanierungserfolges nicht ausreicht. Hier sollten im Vorfeld immer Top-Assay oder EOF-Analysen durchgeführt werden, um sicher ausschließen zu können, dass durch den Zerfall von Precursoren keine Nachlieferung mehr erfolgen kann.

Am **Flughafenstandort** als klassischer Feuerlöschschaum-Schadensfall war neben den perfluorierten Stoffen vor allem mit den polyfluorierten Precursorsubstanzen Capstone A und B und 6:2-FTSA (=H₄PFOS) zu rechnen. Diese Stoffe dienen seit 2011 als Substitutionsmittel für PFOS, welches heute in Feuerlöschschäumen einem Verwendungsverbot unterliegt. Somit lässt sich anhand des Vorhandenseins von PFOS bzw. Capstone-Produkten oder 6:2-FTSA eine grobe Abschätzung über das Alter des Schadensfalls treffen.

Die Konzentrationen von sowohl Capstone A und B als auch 6:2-FTSA lagen im Bodenmaterial und auch im Perkolat unterhalb der Bestimmungsgrenze. Dafür lagen die PFOS-Konzentrationen zu Beginn des Verfahrens mit knapp 70 % der Gesamtbelastung sehr hoch, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Feuerlöschschäume am Standort bereits vor längerer Zeit in die Umwelt gelangt sind. Die historische Recherche hat dies bestätigt.

6 Ergebnis

Im Rahmen des Projektes FABKEO konnten im On-Site-Verfahren erfolgreich Polymerkondensate für die Mobilisierung von PFAS eingesetzt werden. Die Verfahrenstechnik konnte im Labor und den Feldversuchen umfassend entwickelt, getestet und verbessert werden. Die Abreinigungen in Hügelsheim waren mit einer Abreinigungsleistung von bis zu 87 % PFAS im Bodeneluat nach Biopolymerspülung und ohne Beeinträchtigung der Bodenfunktionen durchaus erfolgversprechend. Der IBC am Flughafenstandort lieferte ebenfalls sehr gute Ergebnisse mit einer Abreinigungsleistung von 92%, was ein vollständig

aufzusättigendes System mittels Container o. Ä. ebenfalls sinnvoll erscheinen lässt. Mit der Entwicklung eines ersten Pilotmoduls für die Elektroadsorption/-desorption von PFAS aus Wasser wurde ein wesentlicher Fortschritt für diese neue Technologie erzielt, die eine Vor-Ort-Regenerierung beladener Adsorber erlaubt. Für PFBA als kurzkettiger PFAS-Vertreter konnte die Aufkonzentrierung durch Adsorption und nachfolgende elektrostimierte Desorption im Pilotmaßstab nachgewiesen werden. Diese Technik kann nachgeschaltet hinter konventionellen Aktivkohlebehältern in Wasserwerken eine längere Einsatzdauer der Aktivkohlen erlauben und somit zu einer Verringerung der Kosten beitragen. Die weiterentwickelte Flotation zur Abreinigung von PFAS lieferte mit bis zu 75% Abreinigung ebenfalls vielversprechende Ergebnisse, muss jedoch noch weitergehenden Optimierungsschritten unterzogen werden. Mit den aus den Labor- und Feldanwendungen gewonnenen Daten konnte ein ressourceneffizientes Standortbewertungsmodell (Prognosetool) zur Prüfung der Erfolgchancen einer geplanten Sanierung an einem spezifischen Standort erstellt werden. Dies ermöglicht eine Planung der Dimensionierung der Anlagentechnik und der erforderlichen Zeitdauer sowie der benötigten finanziellen Mittel.

7 Fazit

Die in diesem Forschungsprojekt gesammelten Erkenntnisse zum Verhalten von PFAS verschiedener Schadensherkünfte bzw. PFAS-Einzelsubstanzen in Reaktion mit Biopolymeren im Boden und Wasser zusätzlich zu den Vorkenntnissen aus dem BioKon Projekt haben es erlaubt, ein robustes Sanierungsverfahren für PFAS kontaminierte Böden zu entwickeln (on-site und in-situ) und dessen mögliche Anwendungsbereiche zu definieren. Das entwickelte Verfahren soll als Nischenprodukt für kleine bis mittlere Mengen von Bodenmaterial (bis 5.000 t) zur Anwendung kommen.

Literaturverzeichnis

- [1] **Bendrien, L.** (2022): Modellbasierte Standortbewertung zur möglichen on-site-Sanierung von PFAS-Schäden mittels biopolymergestütztem soil leaching am Beispiel von Referenzstandorten, Universität Osnabrück.
- [2] **Bennert, J.** (2021): Charakterisierung und Vergleich verschiedener Aktivkohletextilien für die PFAS-Adsorption, HTWK Leipzig.
- [3] **Bennert, J.** (2022): Entwicklung eines Durchflussmoduls für die Wasserbehandlung durch PFAS-Adsorption an Aktivkohlevliesen in Verbindung mit einem elektrostimulierten Aktivkohle-Regenerierungsverfahren, HTWK Leipzig.
- [4] **Fabregat-Palau, J., Vidal, M., und Rigol, A.** (2021): „Modelling the Behaviour of Perfluoroalkyl Carboxylates and Perfluoroalkane Sulfonates in Soils,“ *Science of the Total Environment*.

- [5] **Saeidi, N., Harnisch, F., Presser, V., Kopinke, F.-D. und Georgi, A.** (2023): Electrosorption of organic compounds: State of the art, challenges, performance, and perspectives, *Chemical Engineering Journal*, 144354.
- [6] **Saeidi, N., Kopinke, F.-D. und Georgie, A.** (2021): „Controlling Adsorption of Perfluoroalkyl Acids on Activated Carbon Felts by Means of Electrical Potentials,“ *Chemical Engineering Journal*, p. 129070.

Autorinnen:

M. Eng. Anja Wilken
Leiterin F&E
Sensatec GmbH
Friedrichsorter Str. 32
24159 Kiel
+49-431-389009-11
a.wilken@sensatec.de
www.sensatec.de

Dipl.-Geologe Harald Oeder
Geschäftsführer
GEOlogik Wilbers & Oeder GmbH
Feldstiege 98
48161 Münster
+49-2533-93433-20
oeder@geologik.de
www.geologik.de

Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wieschemeyer
Geschäftsführer
Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH
Neulandstraße 2 – 4
49084 Osnabrück
+49-541-915327-11
m.wieschemeyer@mup-group.com
www.mup-group.com

Dr. rer.nat. Katrin Mackenzie
Leiterin des Departments Technische Biogeochemie
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ
Department Technische Umweltchemie
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
+49-341-6025-1760
katrin.mackenzie@ufz.de
www.ufz.de

Ihr Spezialist für In-situ Sanierungen

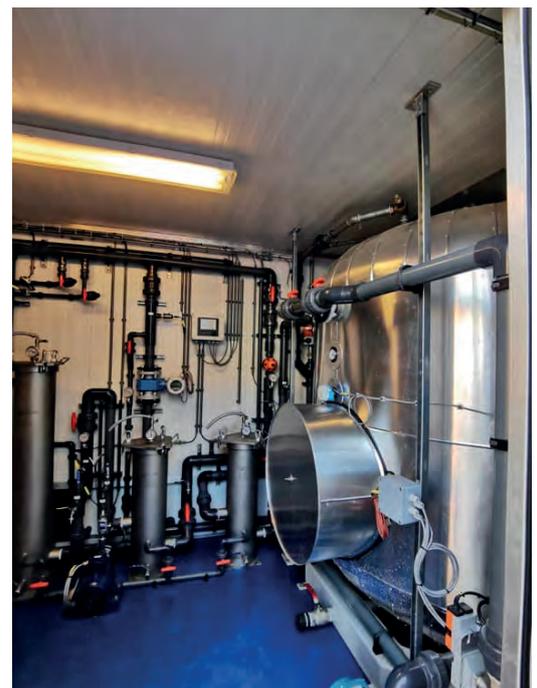
- Projektumsetzung
- Konzeptentwicklung
- Beratung / Bauteam
- Anlagenbau
- Innovative Techniken



Der richtige Ansprechpartner für In-situ Konzepte: Rückblickend auf mehr als 20 Jahre Erfahrung im Anwendungsbereich innovativer Techniken bietet NTP Umwelt die Expertise für die Konzeptentwicklung, den Anlagenbau sowie die Umsetzung herausfordernder Sanierungsprojekte.

Wir unterstützen Sie mit folgenden Verfahren:

- In-situ chemische Oxidation
- In-situ chemische Reduktion
- In-situ biologisch anaerobe Dechlorierung
- In-situ biologisch aerober Abbau
- On-site Bioreaktoren
- PFAS Sanierung



Identifizierung & Differenzierung von PFAS-Quellen im Grundwasser mittels Multi-Vektor-Analyse auf Basis künstlicher Intelligenz (MVA-AI)

Dr. rer. nat. Frank KARG

Wissenschaftlicher Direktor / HPC INTERNATIONAL & ITVA-Fachausschussleiter: Gefährdungsabschätzung
/ HPC INTERNATIONAL Duisburg

Kurzfassung:

Poly- und per-fluorierte Alkyl-Substanzen (PFAS, früher auch PFC & PFT genannt) sind synthetische Moleküle und existieren nicht natürlich. Ihre weltweite Verbreitung in Grundwasser, Böden, Oberflächengewässern, Luft, Ökosystem und Nahrung sowie deren toxikologische Effekte und Umweltpersistenz veranlassen immer mehr zur Sorge. PFAS verursachen oft größere Grundwasserkontaminationsfahnen aus mehreren PFAS-Eintrittsquellen.

Typische PFAS-Schadenseintrittsquellen sind z.B. Industrien der PFAS-Polymererzeugung und Verarbeitung, Galvanikaktivitäten wie zur Verchromung, landwirtschaftliche Ausbringung mit PFAS-kontaminierten Klärschlämmen oder Düngemitteln, Aufbringung von Wasser-abweisenden und z.T. glänzenden Beschichtungen auf Papier, Karton und Textilien und vor allem durch Feuerlöschschäume (AFFF = Aqueous Film Forming Foam), z.B. durch Brandschutzübungen und Brandfällen auf Flughafengeländen, Raffinerien und Tanklagern, etc. aber auch bei der Anwendung als Flammschutzmittel in der Elektro- und Elektronikindustrie.... Die Liste der Eintragsquellen von PFAS in die Umwelt ist lang und es existieren auch flüchtige PFAS-Schadstoffe, die über die Bodenluft in die Raumluft gelangen können, wie z.B. Fluortelomer-alkohole (FTOH), etc.

Eine der heutigen Herausforderungen beim Management von Umweltproblemen mit PFAS liegt darin, festzustellen welche die verschiedenen PFAS-Schadensquellen bzw. kommerziellen Ausgangsprodukte z.B. bei größeren PFAS-Grundwasserschäden sind.

Erfahrungen und Auswertungen von über 800 000 PFAS-Analysen in Böden, Grundwässern und Oberflächengewässern zeigen für gewisse industrielle und andere PFAS-Aktivitäten typische Anwesenheiten von verschiedenen PFAS-Gruppen (Cluster) und -Substanzen, wie z.B. die Perfluorocarboxylsäuren (PFCA), Perfluorsulfonsäuren (PFSA) oder Polyfluortelomer-Sulfonsäuren (FTS) und -Alkoholen sowie Sulfo-Betainen etc. von insgesamt 33 verschiedenen PFAS-Gruppen.

Bei der PFAS-Quellenidentifizierung und -Differenzierung werden unter anderem, verschiedene relative Konzentrationsverteilungen, Verhältnisse zwischen und auch zu Perfluorcarboxylsäuren (PFCA) und auch mit verschiedenen poly-fluorierten PFAS als „Precursors“, wie auch verschiedene statistische Verteilungsmuster berücksichtigt.

Kommerzielle PFAS-Produkte werden dazu mit non-Target-Analysen auf die größtmögliche Anzahl von PFAS-Einzelsubstanzen untersucht, um kontinuierlich eine PFAS-Produktdatenbank zu pflegen. Dazu erfolgten auch Säulenversuche mit integrierter, natürlicher aber verschnellter Alterung von „frischen“ kommerziellen PFAS-Produkten an Lysimetern mit bakteriologischen Beaufschlagungen zur Biotransformation von poly-fluorierten PFAS (Precursors) sowie durch Boden-Chromatographie-Effekte (F. Karg et al.: 2023 & 2024), um typische HR-MS-Spektren (High-Resolution-Mass-Spectrometrie) von frischen und degradierten kommerziellen PFAS-Produkten in einer umfassenden Datenbank aufzunehmen.

Die Identifizierung von PFAS-Quellen kann dabei aus dieser PFAS-Datenbank durch altlasten-relevante Standard-Umweltanalytik und der Anwendung eines multivarianten, statistischen Identifizierungsprogramms erfolgen. Die Multi-Vektor-Analyse (MVA) erfolgt in mehreren Dimensionen mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (sowie Machine-Learning) damit auch PFAS-Quellen bei Grundwasserschäden mit einer Vermischung von mehreren verschiedenen PFAS-Quellen ermittelt werden können.

Außer der Anwendung einer altlastenrelevanten Standard-Umweltanalytik zur MVA-Identifizierung der verschiedenen PFAS-Schadensquellen sind gegebenenfalls auch weitere Analytik-Tools anwendbar, wie z.B. der „Top-Assay“ (Houtz & Sedlak: 2012, Glöckner et al. 2021) zur größtmöglichen Ermittlung der anwesenden Masse an poly-fluorierten Precursors, welche zu per-fluorierten Carboxylsäuren (PFCA) oxidiert werden können (siehe Abb. 1). Weiterhin können Messungen von Isotopenverhältnissen in PFAS-Quellbereichen und -Fahnenbereichen (Quian et al. 2023) zur PFAS-Quellen-Ermittlung erfolgen sowie die Anwendung umfassender „Non-Target-Analysen“, bei welchen hunderte von Einzel-PFAS-Molekülen identifiziert und zumindest semi-quantifiziert werden können.

Solche Anwendungen sind Zeit- und Kostenintensiver als eine normale altlastenrelevante PFAS-Standardanalytik welche vorrangig zur Identifizierung von PFAS-Quellen eingesetzt werden soll. **Die MVA-Anwendung kann dies vermeiden.**

Mehr als 9 000 PFAS belasten seit Jahrzehnten die Umwelt und Gesundheit. Dazu gehören auch flüchtige PFAS, wie z.B. Fluortelomeralkohole (6:2- oder 8:2-FTOH etc.). Das Problem der PFAS-Altlastenerkundung stellt vor allem die enorme Anzahl von poly-fluorierten PFAS dar, die aber mit der Zeit zu per-fluorierten PFAS biotransformiert werden. Dabei können auch einzelne poly-fluorierte PFAS in der Umwelt relativ resistent sein und sich nur recht langsam zu per-fluorierten PFAS transformieren (wie z.B. Capstone B, FTS oder FTOHs). Um bei der transparenten Gefahrenabwehr dieser großen Anzahl an PFAS-Schadstoffen gerecht zu werden, gibt es mehrere Vorgehensweisen bei der PFAS-Erkundung, Bewertung und Sanierung:

<i>PFAS-Management-Optionen bei Altlasten (Erkundung, Bewertung & Sanierung)</i>		<i>Vorteile</i>	<i>Nachteile</i>
A	Limitierung auf <u>einige ausgewählte PFAS-Parameter</u> (z.B. 13 - 28 Einzelsubstanzen). Bewertung mit Listenwerten.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vereinfachte Untersuchungsanalytik und relativ simple Bewertung einiger Einzelstoffe mit Listenwerten sowie starke Limitierung der Sanierungsziele 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ausblendung des tatsächlichen Ausmaßes der PFAS-Belastung. ➤ Unterbewertung der Expositionsrisiken durch die tatsächlichen PFAS-Belastungen (z.B. durch flüchtige PFAS) sowie ungenügende Sanierung ohne transparente Gefahrenabwehr.
B	Anwendung eines erweiterten Parameterumfangs (PFAS 36 – 40) <u>sowie Top Assay-Anwendung und Einzelfallbewertung per TERQ*</u>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ermittlung, Einzelfallbewertung und transparente Sanierung von wichtigen Einzelsubstanzen der per- & poly-fluorierten PFAS sowie fast aller poly-fluorierten PFAS nach Oxidation in die einschlägig bekannten per-fluorierten PFAS. ➤ Transparenz in der Gefährdungsabschätzung sowie Gefahrenabwehr der Vielstoffbelastung bei der Sanierung. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Etwas höherer Kostenaufwand durch die Top Assay-Analytik und Einzelfallbewertung, z.B. gemäß BBodSchG § 9.1., BBodSchV § 15.4. und Bundesanzeiger 161a.
C	Anwendung der <u>Non-Target Analytik</u> und Identifizierung und Quantifizierung von bis zu über 500 Einzelsubstanzen der-PFAS	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Einbindung in die Erkundung, Bewertung und Sanierung von bis zu über 500 Einzelsubstanzen. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Hoher Analytik-, Zeit und Kosten-Aufwand. ➤ Nicht viele Labore können diese Analytik realisieren.
D	Zusätzliche Anwendung der TOF (Total Organo-Fluorine) oder AOF-Analytik	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kann als Kontrollparameter alle Vorgehensweisen unterstützen (A, B & C). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gibt keine Auskunft zu PFAS-Einzelparametern. ➤ Zur Gefahrenabwehr nicht ausreichend.

Tabelle 1: PFAS-Altlasten-Management-Optionen mit Vor- und Nachteilen (* Toxikologische Expositions-Risiko-Quantifizierung, gemäß BBodSchV §15.4)

Ein wichtiges Merkmal der PFAS ist ihr umweltchemisches Verhalten, da **poly-fluorierte PFAS** (Precursors) durch Biotransformation in stabile **per-fluorierte PFAS** umgewandelt werden. Die Einzelfallprüf-

ung über eine TERQ^(*)-Anwendung kann dabei auch zukünftige Risiken aller „Precursors“ mitbetrachten, da eine Untersuchungsanalytik, basierend auf 30-40 Einzel-PFAS vor und nach einer **TOP-Assay-Untersuchung** erfolgt (siehe B). Bei der der Top-Assay-Untersuchung (Abb. 1) werden die poly-fluorierten PFAS durch Oxidation via Persulfat in die stabilen per-fluorierten PFAS umgewandelt, in welche diese generell nach einer gewissen Umweltverweilzeit Biotransformiert werden (siehe Abb. 1). Durch den Top-Assay integriert die Einzelfallprüfung dabei alle transformierbaren „Precursors“ sowie die verbleibenden per-fluorierten PFAS-Endprodukte.

^(*)TERQ : *toxikologische Expositions-Risiko-Quantifizierung und standortnutzungs- & Schadstoffmischungsspezifische Definition von Sanierungszielwerten. Siehe auch die Einzelfallprüfung, gemäß BBodSchV § 15.4.*

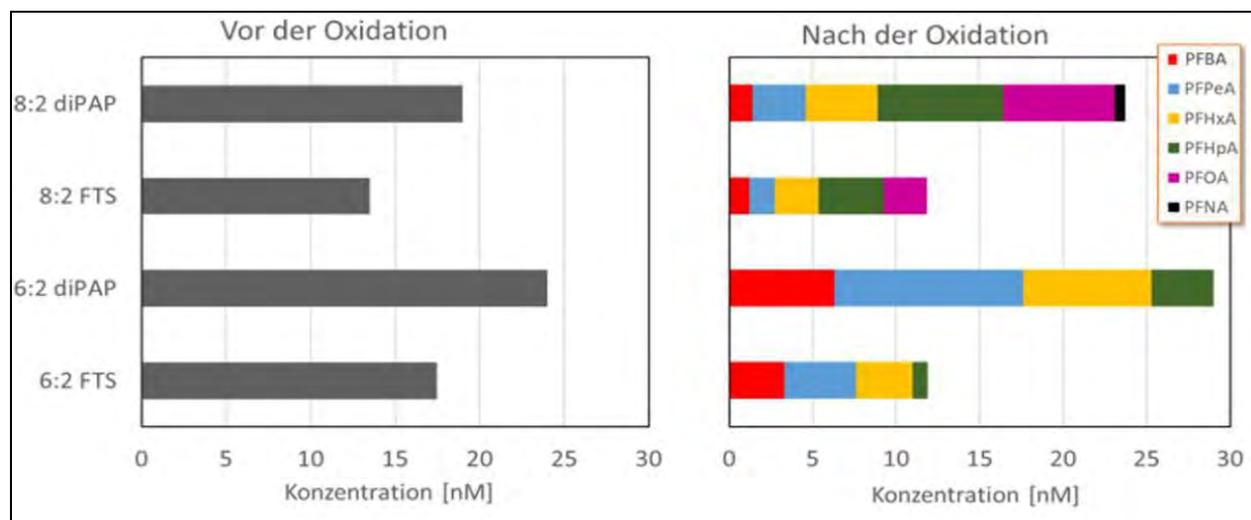


Abb. 1: Top-Assay (Total Oxidizable Precursor-Verfahren) zur Quantifizierung oxidierbarer poly-fluorierter PFAS, transformierbar in per-fluorierten Carboxylsäuren (Houtz & Sedlac 2012).

Vereinfachte Gefährdungsabschätzungen basieren i.d.R. vor allem auf dem Vergleich von Konzentrationswerten im Boden oder Grundwasser mit Vorsorgewerten wie GFS (Geringfügigkeitsschwellen) oder Prüfwerten von einigen Einzelparametern. Diese zeigen zwar, ob eine PFAS- Belastung vorliegt und/oder weitere Untersuchungen bei einer Prüfwertüberschreitung durchzuführen sind, helfen aber nicht aufgrund fehlender Maßnahmenwerte (MW) zu entscheiden, ob eine Behandlung/Sanierung erforderlich ist. Die **Einzelfallprüfung** zu Maßnahmenanforderungen der Nachsorge bei Altlasten, gemäß der neuen **BBodSchV § 15.4**, kann z. B. über die **TERQ-Methodik** (toxikologische Expositions-Risiko-Quantifizierung) zur Ableitung von standortspezifischen Maßnahmenwerten eingesetzt werden. Die Ermittlung von standortspezifischen Maßnahmenwerten in der Nachsorge führt so zu einer transparenten Gefahrenabwehr. In der Umsetzung werden standortspezifische, **tägliche Expositionsdosen (TED)** sowie **toxikologische Dosis-Wirkungs-Referenzwerte (TDWR)** der EU & USA angewendet.

Auch für zukünftige standortspezifische Nutzungen werden dabei **alle relevanten Expositionspfade** über Boden, Bodenluft, Grundwasser und Innenraumluft berücksichtigt. Standortspezifische Maßnahmenwert-Überschreitungen können kartiert werden, um den tatsächlichen **Sanierungsbedarf** flächenmäßig und in der Vielstoffbetrachtung zu ermitteln. Diese Vorgehensweise führt dabei zu einer besseren Budget- und Rechtsicherheit bei Vielstoffbelastungen.

Die folgenden Beispiele zeigen diese Anwendungsmöglichkeiten der PFAS-Quellenidentifizierung mit einer gewissen Standardanalytik unter Berücksichtigung der Erfahrungen von auf künstlicher Intelligenz basierter MVA-Anwendungen in Europa (EU) und den USA:

Typische PFAS-Quellen existieren an Brand- und Brandschutzübungsplätzen, zivile und militärische Flughäfen (Löschschäume / AFFF), aber auch andere Aktivitäten können die Ursache für PFAS-Kontaminationen im Boden und Grundwasser sein. Diese Aktivitäten sind z.B. die Aufbringung von Klärschlämmen aus Abwasseraufbereitungsanlagen, galvanische Verchromung, Deponiesickerwässer, Papierproduktionen, Textilimprägnierungen, Elektor- & Elektronikindustrie, Farben- und Reinigungsmittelbetriebe, etc.

Verschiedene statistischen Analysen und Visualisierungen, basierend auf den Erfahrungen und PFAS-Clustern von über 800 000 Boden- und Grundwasseranalysen (NAS: 2023, F. Karg: 2024) ermöglichen dabei zu helfen die PFAS-Quellen zu identifizieren.

Die Methodik der Differenzierung von PFAS-Quellen kann in drei Hauptkategorien eingeteilt werden.

- I. Die erste ist eine Prüfung der verfügbaren Daten und Informationen, die verwendet werden können, um potenzielle PFAS-Quellen auf verschiedenen Standorten (spezifische Industriestandorte, Flughäfen, Deponien, etc.) zu identifizieren.**
- II. PFAS-Analysemethoden in Laboratorien von Umweltproben.**
- III. Erweiterte forensische Untersuchungen zur weiteren Differenzierung von potenziellen PFAS-Quellen.**

Der Punkt I. umfasst folgende Etappen:

- Historische Erkundung potenzieller PFAS- Quellen von Verdachtsflächen. Ziel ist eine Auflistung und Kartierung von Zonen potenzieller PFAS-Quellen.
- Bewertung von Gebieten im hydrogeologischen Aufstrom von Verdachtsflächen, um festzustellen, ob es Aktivitäten gibt (oder gab), die PFAS verwenden (oder verwendet haben).
- Herbeiführung eines detaillierten Verständnisses der Geologie, Hydrogeologie, Hydrologie und der Regenwasserinfrastruktur sowie des Oberflächenwasserabflusses eines Standortes. Dies bezieht sich auch auf die Bodenbeschaffenheit, der Lage und Tiefe nahegelegener Brunnen sowie der Tiefe und Fließrichtung von Oberflächengewässern und Grundwasser.
- Erstellung eines konzeptionellen Standortplans bezüglich PFAS-Quellen, Transferpfaden und Schutzziele.

Die Kategorien II und III konzentrieren sich auf:

- Auswertung von (Standard-)PFAS-Analysedaten als Screening-Schritt, um festzustellen, ob Indizien oder Beweise zur Quellendifferenzierung erkennbar sind.
- Anwendung von erweiterten forensischen PFAS-Analysen an ausgewählten Proben, um potenzielle PFAS-Quellen zu unterscheiden (z.B. Strukturisomerie, Isotopenuntersuchungen, Topp Assay, MVA-Anwendungen etc.).

Generelle PFAS-Unterschiede bei kommerziellen PFAS-Produkten können identifiziert werden, wie z.B. durch folgende Differenzierungen:

- **Moderne Löschschäume (AFFF)** basieren auf Fluortelomeren vor allem mit C6-PFAS-Molekülen. Obwohl diese Löschschäume weder PFOS noch PFOA enthalten oder sich in diese umwandeln, wenn sie in die Umwelt freigesetzt werden, können sie zu anderen relevanten kurzkettigen PFAS wie Perfluorhexansäure (PFHxA), Perfluorpentansäure (PFPeA) und 5:3-Fluortelomercarbonsäure (FTCA) abgebaut werden.
- Anfang der 2000er Jahre wurde (nach allgemeinen Behördenverlangen in den USA und EU) durch die chemische Industrie gestartet **C8-PFAS-Löschschäume** auslaufen zu lassen, da PFOS und PFOA als zu stark toxikologisch relevant eingestuft wurden. Es wurde daraufhin bei Löschschäumen auf Fluortelomerbasis zu den kurzkettigen PFAS-Formen mit sechs fluorierten Kohlenstoffen (als **C6-PFAS** bezeichnet) gewechselt, die weder PFOS noch PFOA enthielten oder zu diesen abgebaut werden können. Diese C6-PFAS-Löschschäume können noch PFHxA, PFPeA und auch 6:2-Fluortelomersulfonat (6:2-FTS) sowie Fluortelomere enthalten, welche sich im Laufe der Zeit in ihre terminale Endgruppe den Perfluorcarbonsäuren mit weniger als sechs Kohlenstoffatomen umwandeln können. Der Zeitpunkt der Umstellung von C8-PFAS- auf C6-PFAS-Löschschäumen variiert je nach Anwendungsstandort (ziviler oder militärischer Flughäfen, Brandschutzübungsplätze, Mineralölstandorte etc.).
- Vor 2016 enthielten viele Löschschäume PFAS mit acht fluorierten Kohlenstoffketten. Einige dieser langkettigen oder C8-PFAS-Löschschäume enthielten **bis Anfang der 2000er Jahre PFOS und bis etwa 2015 PFOA und andere langkettige PFCAs**, bis diese Produkte dann vom Markt genommen wurden.

- **Die chemischen Strukturen einzelner PFAS können hilfreich sein**, wenn sie mit vorhandenen Informationen wie Herkunft, Zeitrahmen und wahrscheinlicher Verwendung verglichen werden. Zu den strukturellen Unterschieden gehört z.B. die Strukturisomerie (lineare Isomere und verzweigte Isomere).
- Wenn z.B. ein bestimmtes zyklisches PFAS mit acht Kohlenstoffketten wie **Perfluorethylcyclohexansulfonat** (PFECHS: CAS 335-24-0) beobachtet wird, könnte es von einem **Korrosionsinhibitor** stammen, **der in Flugzeughydraulikflüssigkeiten verwendet wird** (MPART: 2020). Es ist nicht bekannt, dass PFECHS ein Bestandteil von Löschschäumen ist.
- **Spezifische PFAS können als Marker für die Herstellung von Fluorpolymeren, Lebensmittelverpackungen und Papierbeschichtungen sowie Körperpflegeprodukte** verwendet werden. Es wird derzeit nicht davon ausgegangen, dass diese mit Löschschaumprodukten in Zusammenhang stehen.
- **Einige PFAS können chemisch biotransformiert werden** (d. h. in kleinere, stabile Chemikalien zerfallen), aber diese poly-fluorierten PFAS (Precursors) wandeln sich häufig in andere PFAS um, insbesondere in per-fluorierte PFAAs.

Identifizierung verschiedener PFAS-Quellen

Umwelt-Standardanalysen, die bei der Erkundung von PFAS-Standorten angewendet werden, können im Prinzip zur Identifizierung und Differenzierung von PFAS-Quellen genutzt werden. Dabei werden 28 – 70 Einzel-PFAS-Stoffe untersucht. Die ermittelten Analysedaten können aufgrund des Vorhandenseins vieler verschiedener PFAS in einer Umweltprobe sehr komplex sein und stellen eine Herausforderung bei der Dateninterpretation dar. Aus diesem Grund ist eine informatisierte MVA-Anwendung mit künstlicher Intelligenz notwendig.

Aufgrund dieser Komplexität müssen große Datenmengen auf Basis statistischer Erfahrungswerte großer Analysenmengen in der **Multi-Vektor-Analyse (MVA oder Poly-Topic-Analysis) mit künstlicher Intelligenz** so interpretiert werden, dass mit einer **sehr hohen Wahrscheinlichkeit PFAS-Quellen identifiziert und differenziert werden können**. Dies kann nur in einer **parallelen Analyse verschiedener Beweisketten** erfolgen, da jede für sich genommen meist nicht ausreichend aussagekräftig ist. Die Basis dazu sind „Target-“, (und „Non-Target“-)Analysen sowie **Top Assay** und **Total Organic Fluorine** oder **AOF (Adsorbable Total Organic Fluorine)** sowie **Isotopenanalysen** (siehe Abb. 2):

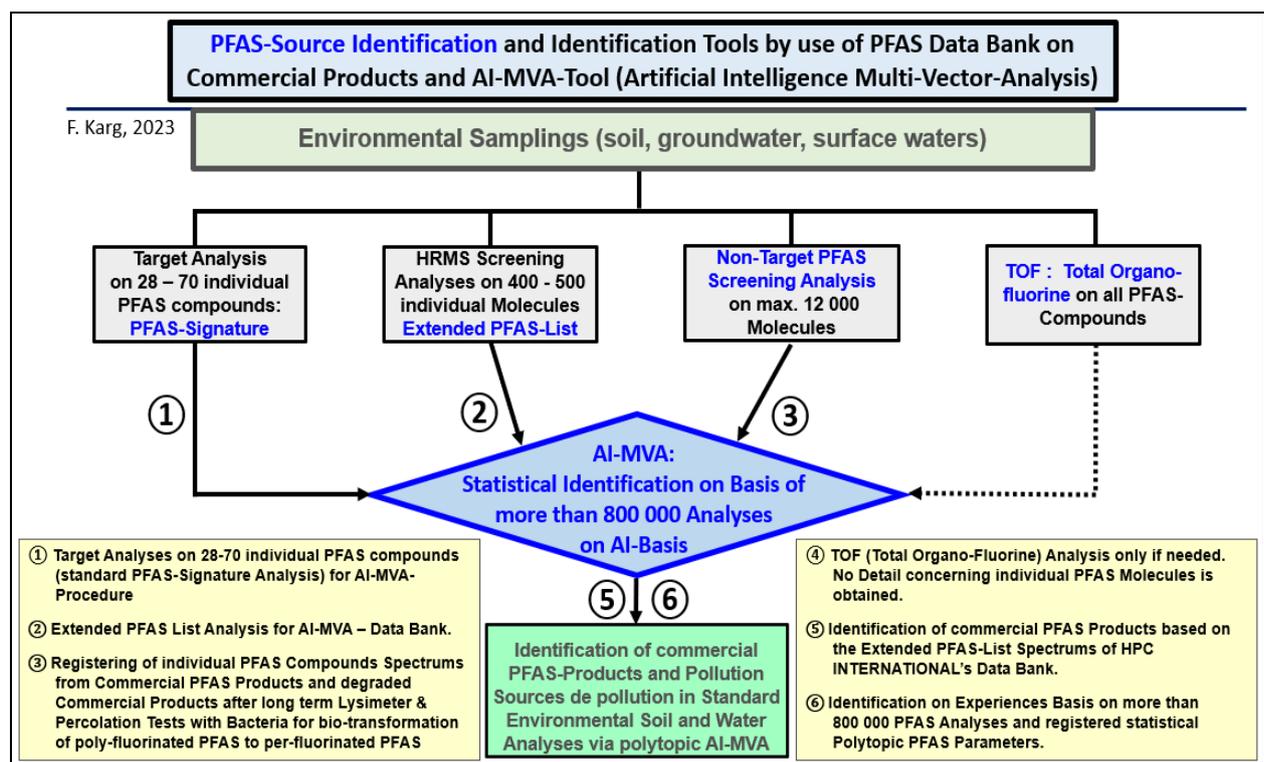


Abb. 2: Analytische Vorgehensweisen zur Anwendung der PFAS-Quellen-Identifizierung & -Differenzierung durch einer Multi-Vektor-Analyse (MVA oder Poly-Topic-Analysis) mit künstlicher Intelligenz (F. Karg et al.: 2023 & 2024).

Die Abb. 3 zeigt die Vorgehensweise um mit auf künstlicher Intelligenz basierter MVA-Analyse potentielle PFAS-Quellen zu identifizieren und zu differenzieren (z.B. AFFF-Löschschäume, Klärschlämme, Galvanik-Aktivitäten, Textilen- und Papierindustrie, Abfalldeponien, etc.).

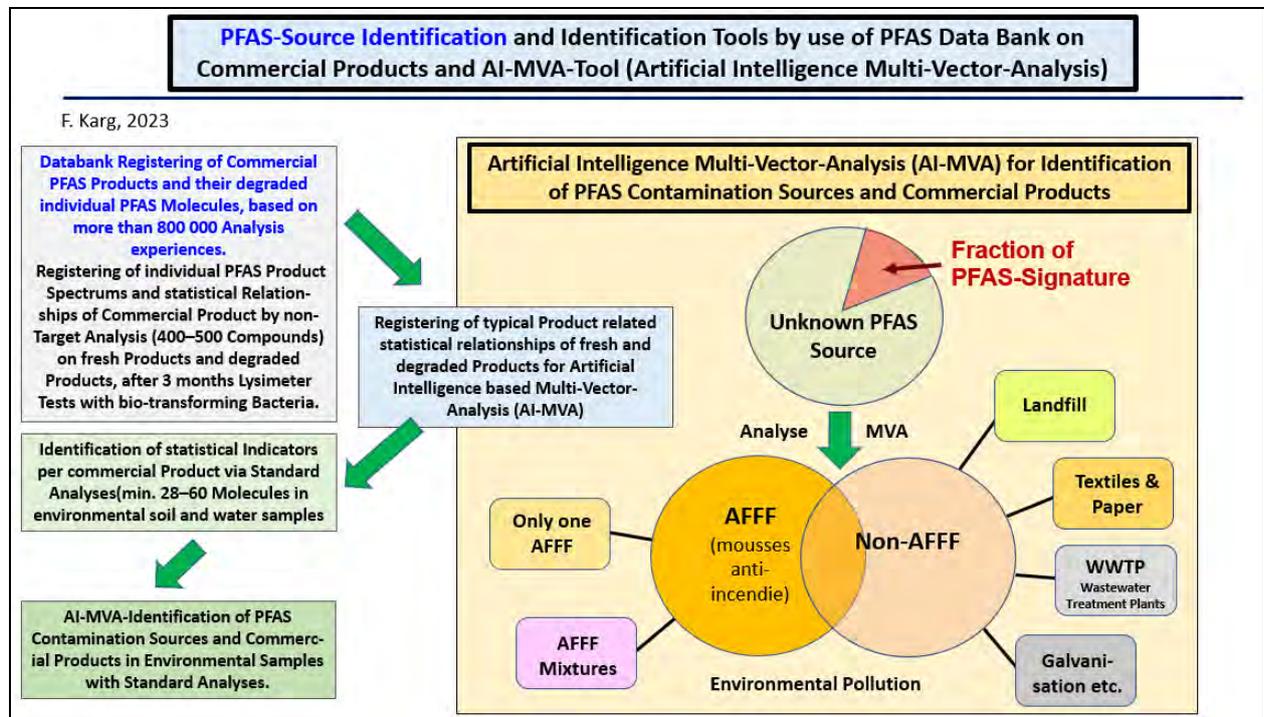


Abb. 3: Auf künstlicher Intelligenz basierte Vorgehensweise der MVA-Analyse zur Identifizierung und Differenzierung von PFAS-Quellen (z.B. AFFF-Löschschäume, Klärschlämme, Galvanik-Aktivitäten, Textilen- und Papierindustrie, Abfalldeponien, Mineralölstandorte, etc.) (F. Karg et al.: 2023 & 2024).

Die „Non Target-Analyse“, ist aufgrund der vielen einzelnen PFAS innerhalb dieser Chemikalienfamilie die Möglichkeit auch unbekannte Moleküle zu ermitteln, da das Ergebnis offen ist und keine vorher geicher Standard-Schadstoffliste untersucht wird. Hunderte einzelner Verbindungen können identifiziert werden. Der Nachteil ist, dass die Non Target-Analyse relativ Kosten- & Zeit-aufwändig ist. Die Tabelle 1 sowie die Abb. 2 zeigen die Unterschiede zur Standardanalytik einiger ausgewählter PFAS-Parameter.

Die Abb. 4 und 5 zeigt die PFAS-Cluster-Analysen zur Differenzierung mehrerer PFAS-Quellen.

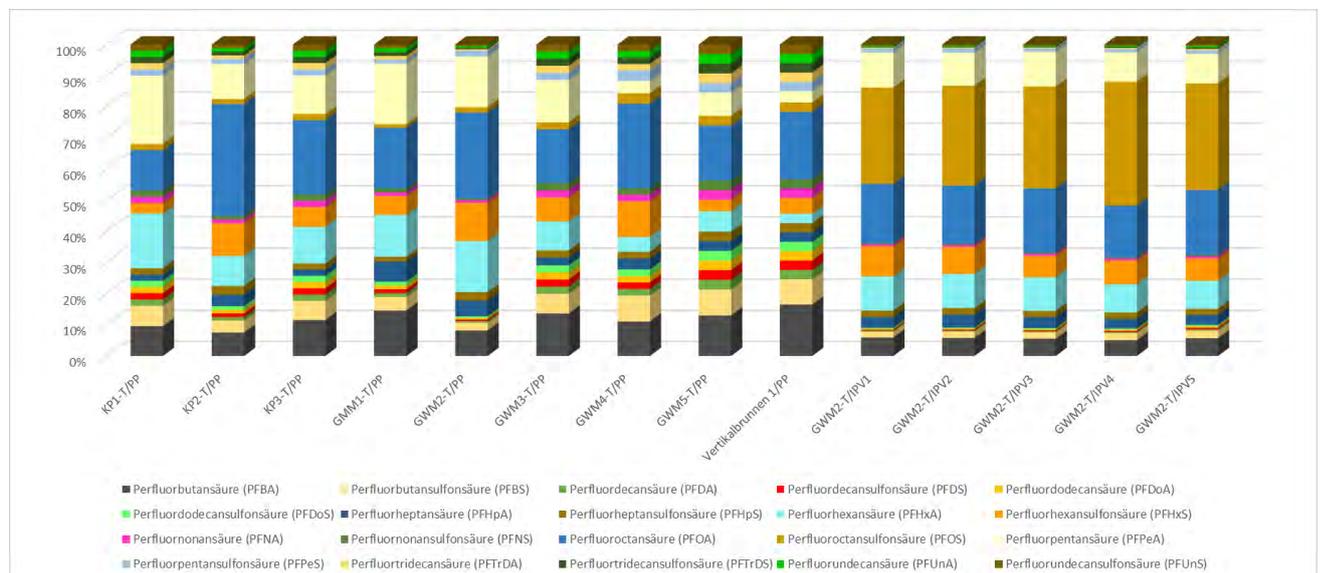


Abb. 4: Verschiedene ermittelte PFAS-Cluster zur Identifizierung und Differenzierung von PFAS-Quellen (F. Karg et al., 2023, 2024)

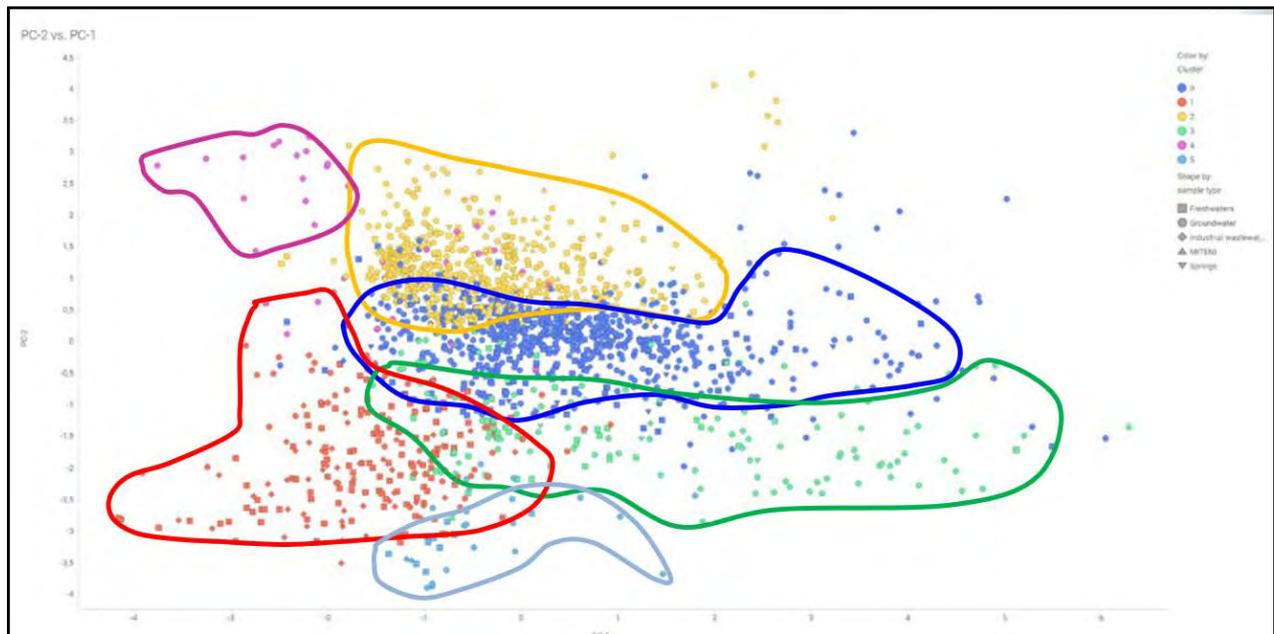


Abb. 5: Identifizierung und Differenzierung von 6 verschiedenen PFAS-Quellen und kommerziellen PFAS-Produkten anhand der Analysen der PFAS-Cluster (Gebiet von 761 ha) anhand von 472 Analysen des Grundwassers und der Oberflächengewässer) in Nord-Ost-Italien (C. Monti et al.: 2023 & F. Karg: 2023).

Das **Informatik-Tool der Multi-Vektor-Analyse (MVA) mit künstlicher Intelligenz** zur Identifizierung & Differenzierung von PFAS-Cluster-Quellen wurde, auf der Grundlage statistischer Erfahrungen von über 800 000 Umweltanalysen, von HPC-International erstellt. Die Grundlage sind unter anderem die Erfahrungen des US Airport Cooperative Research Programms (ACRP), der Airports Council International - North America (ACI-NA), die American Association of Airport Executives (AAAE), der USA National Academy of Sciences Guide (NAS: 2023) sowie die durch die HPC International durchgeführten chemischen Cluster-Bestimmungen von kommerziellen frischen PFAS-Produkten und gealterten kommerziellen PFAS-Produkten (F. Karg et al. 2023 – 2024) als Basis der MVA-PFAS-Datenbank. Die Alterung der kommerziellen PFAS-Produkte erfolgte dazu durch Lysimeter-Tests mit Beaufschlagung von abbauenden Bakterien, welche die poly-fluorierten PFAS in per-fluorierte PFAS bio-transformieren (F. Karg et al. 2023 – 2024).

Die Analyse von PFAS-Clustern findet unter Berücksichtigung der Umweltchemie der PFAS und insbesondere der Metabolisierung bzw. der Biotransformation von poly-fluorierten PFAS zu stabilen per-fluoriertem PFAS, z. B.: 6:2-FTS \rightarrow 6:2-FTOH \rightarrow PFHxA & PFPeA usw statt, um bei Umweltkontaminationen mit PFAS-Mischungen durch die Biotransformationskette die „Precursors“ zu ermitteln.

Für die standortspezifische Bewertung und PFAS-Quellen-Identifizierung & -Differenzierung gehören die folgenden, im MVA-Tool angewendeten Multikriterien. Dabei werden immer alle Kriterien gleichzeitig angewendet:

- A. Konzentrationsverhältnisse zwischen PFAS:** Als einfache Screening-Technik können ein oder mehrere Konzentrationsverhältnisse zwischen zwei und mehreren verschiedenen PFAS-Verbindungen angewendet werden. Beispielsweise wurden **PFHxS/PFOS-Verhältnisse** innerhalb eines bestimmten Bereichs als Indikator für eine Löschschaum-Quelle verwendet (McGuire et al. 2014), und **PFHxS/PFOA-Verhältnisse** haben sich als identifizierend bei der Unterscheidung von Löschsäumen (AFFF) von industriellen PFAS-Produktionsquellen erwiesen (Guelfo und Adamson 2018).
- B. Kreisdiagramme und andere Datenvisualisierungen:** Hierbei handelt es sich um statistische Diagramme, die den **relativen Beitrag mehrerer Moleküle** zur gesamten PFAS-Konzentration im selben Untersuchungsgebiet aufzeigen. Sie können dabei helfen, Zusammensetzungsunterschiede zwischen PFAS-Mischungen in verschiedenen Proben zu visualisieren, um festzustellen,

ob chemische Indizien oder Beweise aus verschiedenen PFAS-Quellen bestehen. Dies hilft ebenso Vermischungen aus verschiedenen PFAS-Quellen oder Änderungen in den Quellensignaturen entlang eines Transportwegs (z. B. während der Migration im Grundwasser) zu ermitteln und auch Biotransformationen und Boden-Chromatographie-Effekte aufzeigen.

- C. Isomerenverhältnisse:** Einzelne PFAS können in verschiedenen isomeren Formen vorliegen und die relative Häufigkeit verschiedener Isomere in einer Probe kann verwendet werden, um auf die Quelle der PFAS zu schließen (Charbonnet et al. 2021). Das Vorhandensein **verzweigter Isomere** (Strukturisomere) in einer Probe kann mit Standardmethoden gemessen werden (die etwa 60 – 70 Einzelsubstanzen analysieren). Die beiden unterschiedlichen Herstellungsverfahren für PFAS, ECF (Electrochemical fluorination) und Telomerisierung, führen entweder zu einer Mischung aus verzweigten und linearen PFAS (ECF) oder rein linearen PFAS-Isomeren.

Diese Informationen könnten als Beweismittel zur Unterscheidung der PFAS-Quellen nützlich sein. **Verzweigte Isomere weisen darauf hin, dass PFAS aus dem spezifischen Herstellungsprozess ECF (elektrochemische Fluorierung) stammen.** Der Anteil verzweigter Isomere in ECF-Produkten liegt in einem relativ engen Bereich (ITRC 2022a&b). Wenn der Anteil verzweigter Isomere in einer Probe unter diesem Bereich liegt, ist dies ein potenzieller Hinweis darauf, dass auch PFAS-haltige Produkte vorhanden sind, die durch Telomer basierte Herstellungsprozesse erzeugt wurden.

Moderne Feuerlöschschäume (AFFF) enthalten PFAS, die nur über Telomerisationsverfahren hergestellt werden. Ältere AFFF-Mischungen können PFAS enthalten, die durch ECF-Herstellung oder Telomerisierung hergestellt wurden. In den Vereinigten Staaten und wenig später auch in West-Europa wurde die Produktion von AFFF-Mischungen mithilfe der ECF-Herstellung Anfang der 2000er Jahre eingestellt.

Eine weitere wichtige Tatsache ist, dass verzweigte Isomere bestimmter PFAS (z. B. PFOS) aufgrund unterschiedlicher Wechselwirkungen der Isomere mit dem Boden sich schneller im Grundwasser ausbreiten als die linearen Isomere derselben Verbindung (unterschiedliche chromatographische Effekte im Boden). Dies kann zu einer **Anreicherung verzweigter Isomere** in Grundwasserproben führen, die hydrogeologisch stromabwärts einer PFAS-Quelle entnommen wurden (Nickerson et al. 2020).

- D. PFAS-Hauptkomponentenanalyse und hierarchische Klassifizierungsuntersuchung von PFAS-Clustern:** Diese statistischen Methoden werden verwendet, um Daten, die mit vielen Variablen verknüpft sind (z. B. der in einer Probe gemessenen PFAS), zu analysieren, um Unterschiede zwischen PFAS-Clustern grafisch darzustellen. Dadurch werden die Analysendaten so analysiert, dass leichter zu erkennen ist, ob es unterschiedliche Gruppen von PFAS-Mischungszusammensetzungen und -Clustern gibt (von denen jede aus unterschiedlichen Quellen oder kommerziellen PFAS-Produkten stammen kann (siehe auch Abb. 3 & 4) und welche PFAS-Cluster sich überlagern können. Ein anderer Ansatz ist möglich (welcher von den Autoren bevorzugt wird), um Proben mit ähnlichen PFAS-Clustermerkmalen zu gruppieren und diese Beziehungen in einem Dendrogramm (als hierarchisches Clusterdiagramm) darzustellen.

E. Suchmethoden (Screening): PFAS-Quellen-Identifizierung und -Differenzierung:

- **Detektionsfrequenz: Die Statistiken der Erfahrungen** (aus über 800 000 Einzelanalysen von verschiedenen PFAS-Quellstandorten) **zur relativen Auffindung einzelner PFAS** (in jedem Analysendatensatz) **helfen bei der Unterscheidung verschiedener PFAS-Quellen.** Das Fehlen (oder die geringe Nachweishäufigkeit) spezifischer PFAS in Proben eines Standorttyps kann ebenfalls auf die gleiche Weise genutzt werden. Die Erfahrungen aus über 800 000 Einzelanalysen von Proben verschiedener PFAS-Quellstandorte zeigen diese Unterschiede je nach PFAS-Quelle sehr deutlich (NAS: 2023).
- **Konzentrationsverteilungen:** Diese Daten helfen dabei, die relative Verteilung einzelner PFAS zu ermitteln, die in Umweltproben von verschiedenen Standorten gefunden wurden. Die mittlere Konzentration einzelner PFAS der untersuchten Proben wird in der MVA-Bewertung verwendet (siehe Abb. 5a – d). Diese Daten geben Aufschluss über den relativen Anteil **verschiedener PFAS-Quellen innerhalb eines bestimmten Standorttyps sowie über die relative Anwesenheit von PFAS im Zusammenhang mit verschiedenen Quellen.**

- **PFAS-Zusammensetzungsverhältnisse:** Diese Verhältnisse zeigen die **allgemeine Verteilung von PFAS innerhalb von Beprobungsgruppen**. Dazu gehört der **Prozentsatz der Perfluorcarboxylsäuren (PFCA), Perfluoralkylsulfonsäuren (PFSA) und nicht-Perfluoralkylsäuren (nicht-PFAA) der gesamten sich überlagernden PFAS-Mischungen** (die z.B. im Grundwasser vorhanden sind). Die Anwendung dieser Methodik umfasst auch die Quantifizierung der Konzentrationsverhältnisse zwischen einzelnen häufig nachgewiesenen PFAS.

F. PFAS-Quellen-Identifizierungs- & Differenzierungsstatistik durch die Multi-Vektor-Analyse (MVA):

Die Ergebnisse der PFAS-Quellenbestimmungen werden in fünf verschiedenen Typen von statistischen Visualisierungen der PFAS-Quellenkategorien dargestellt. Diese fünf MVA-Typen, sind folgende:

- **MVA1: Kreisdiagramme zur Verteilung der Zusammensetzung von PFAS,**
- **MVA2: Verteilung der PFAS-Boxplot-Konzentrationen,**
- **MVA3: Mittlere PFAS-Konzentrationen und Nachweishäufigkeit: Heat-Maps,**
- **MVA4: Mittlere PFAS-Konzentration und Nachweishäufigkeit: Cross-Plots,**
- **MVA5: Mittleres logarithmisches Konzentrationsverhältnis von PFAS: Verhältnispunkt- und Radialdiagramme.**

Einige Beispiele der MVA-Auswertungen (MVA 2, 4 & 5):

MVA2: Verteilung der PFAS-Boxplot-Konzentrationen:

Die analytisch ermittelten PFAS-Cluster der Umweltproben werden auf Basis von Erfahrungen aus PFAS-Umweltanalysen eingestuft. Die Abb. 5a – d zeigen eine Reihe von Boxplots der PFAS-Konzentrationen für vier wichtige PFAS-Quellenkategorien (aus über 800 000 Beprobungen aus Grundwasser, Boden und Oberflächengewässer, NAS: 2023). Zur einfacheren Visualisierung werden einzelne PFAS in jeder Graphik in der gleichen Reihenfolge platziert, um die relative Größe der mit jedem Standorttyp verbundenen Konzentrationen anzuzeigen.

Die an einem Standort gemessenen PFAS-Werte werden in der MVA-Bewertung einer der Kategorien (z.B. in Fig. 5a - d) zugeordnet, um einige der Parameter der PFAS-Quellen-Identifizierung und -Differenzierung anzuwenden.

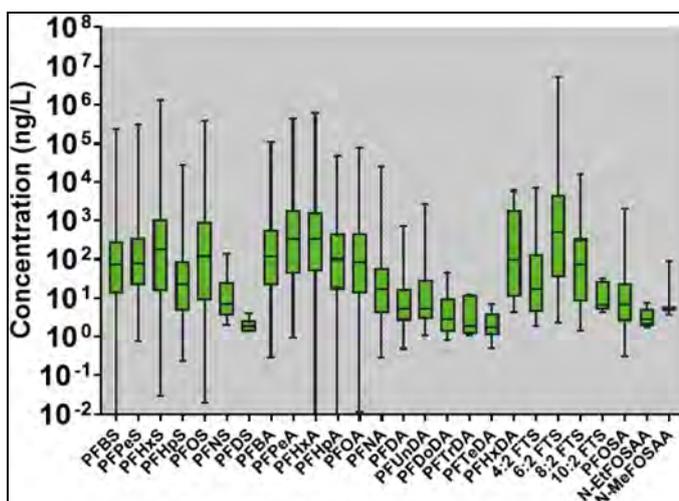


Abb. 5a: Typische PFAS-Verteilung in Umweltproben von zivilen Flughäfen (NAS: 2023)

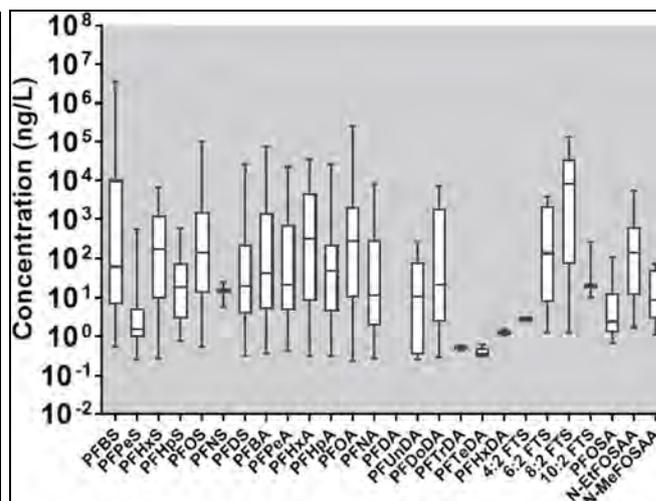


Abb. 5b: Typische PFAS-Verteilung in Umweltproben von industriellen PFAS-Polymerstandorten (NAS: 2023)

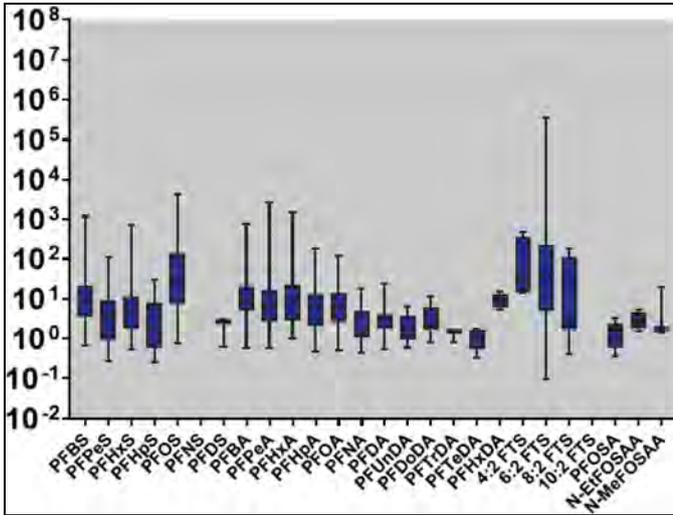


Abb. 5c: Typische PFAS-Verteilung in Umweltproben bei Galvanikbetrieben (Chrom) (NAS: 2023)

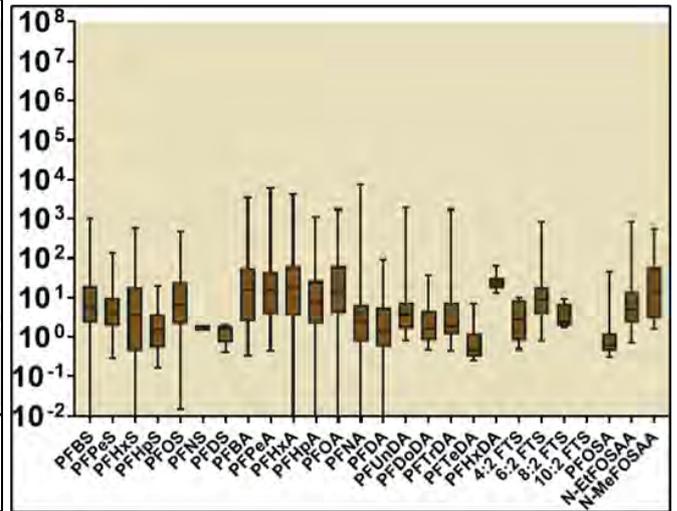


Abb. 5d: Typische PFAS-Verteilung in Umweltproben bei Hausabfalldeponien (NAS: 2023)

MVA4: Mediane PFAS-Konzentration und Nachweishäufigkeit: Cross-Plots:

Die Erfahrungen (aus über 800.000 PFAS-Umweltanalysen) zur statistischen Häufigkeit der mittleren Konzentration einzelner PFAS-Verbindungen können auch in Cross-Plots (Kreuzdiagrammen) zusammengefasst werden, die als repräsentative PFAS-Signatur für jede Schadstoffquellenkategorie dienen (siehe Abbildungen 6a – b, NAS: 2023). **Die im farbigen Bereich oben rechts in jedem Diagramm gefundenen Verbindungen stellen PFAS dar, die häufig und in relativ hohen Konzentrationen pro PFAS-Quellentyp nachgewiesen werden.** Für jedes PFAS-Molekül wird die prozentuale Häufigkeit des Nachweises angegeben (y-Achse) und dies im Verhältnis zur mittleren Konzentration (in ng/l) in allen untersuchten Grundwasserproben (x-Achse).

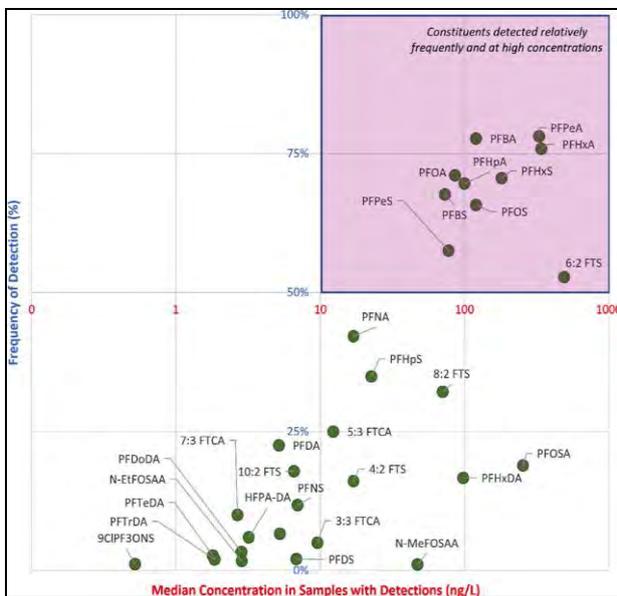


Abb. 6a: Typische PFAS-Verteilung in Umweltproben von zivilen Flughäfen (NAS: 2023)

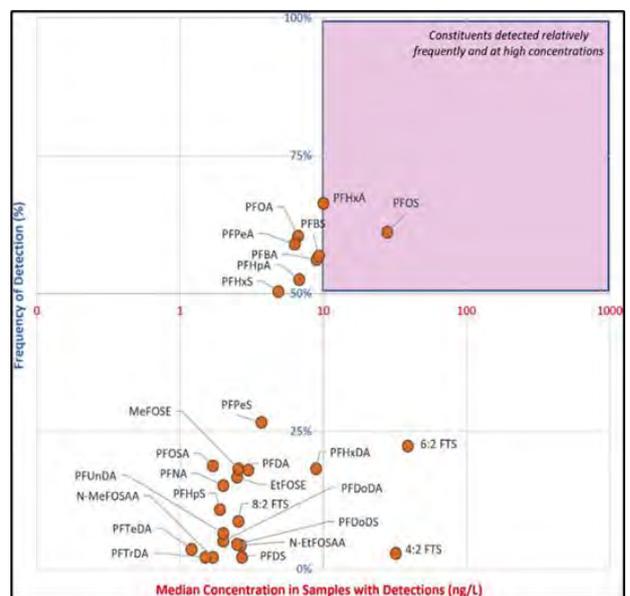


Abb. 6b: Typische PFAS-Verteilung in Umweltproben von industriellen Galvaniken (Chrom) (NAS: 2023)

MVA5: Medianes logarithmisches Konzentrationsverhältnis von PFAS / Verhältnispunkt- und Radialdiagramme:

Zusätzliche grafische Darstellungen verschiedener statistischer Analysen sind nützlich, um einen PFAS-Analysensatz zusätzlich auf PFAS-Quellenzugehörigkeiten zu prüfen. Die Abb. 7 & 8 (NAS: 2023) zeigen die Ergebnisse einer logarithmischen Median-Konzentrations-verhältnisanalyse. Die Ergebnisse werden statistisch ausgewertet und visuell geprüft. Diese Vorgehensweise bietet Möglichkeiten für eine ver-

gleichende Untersuchung der auf einem Standort ermittelten PFAS-Daten und verdeutlicht auch, dass unterschiedliche Visualisierungen oft geeignet sind, um komplexe Ergebnisse verschiedener PFAS-Quellen besser zu kommunizieren. Bei den in diesen Abbildungen gezeigten Punkt- und Radialdiagrammen stellt jedes Symbol den Median des logarithmischen Konzentrationsverhältnisses der bezeichneten PFAS-Verbindungsreihe dar.

Alle diese Auswertungsschritte erfolgen parallel durch das MVA-PFAS-Quellen-Identifizierungstool

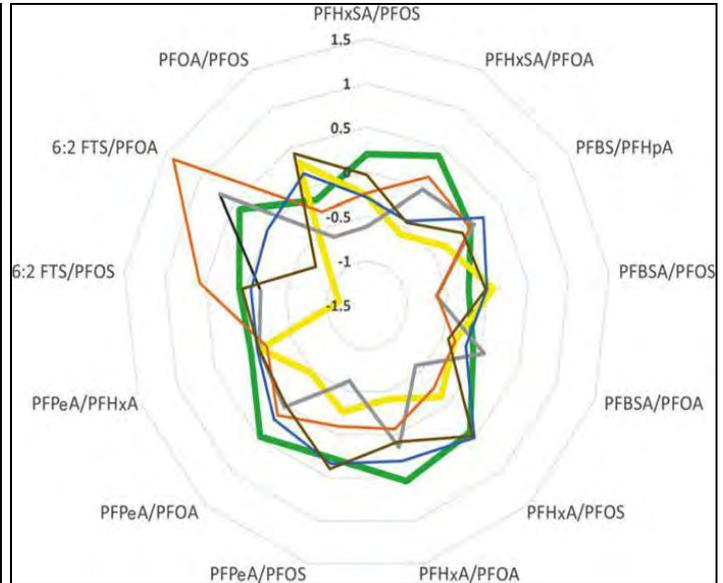
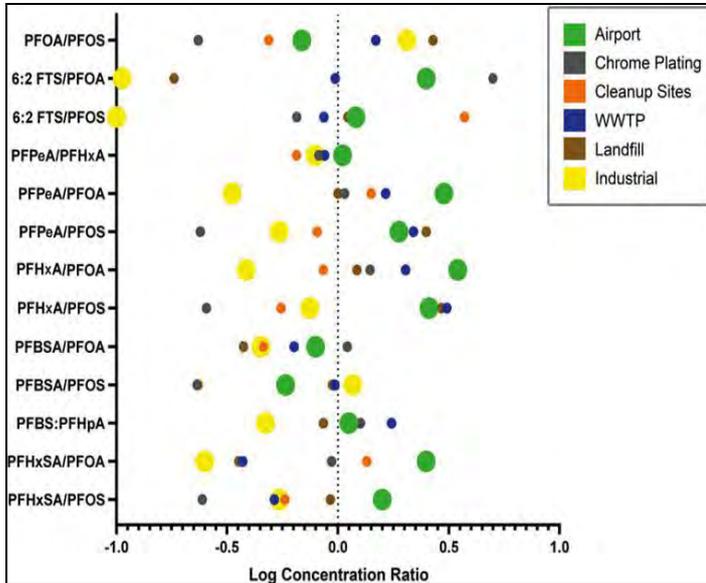


Abb. 7: Typische PFAS-Verteilung in Umweltproben von verschiedenen PFAS-Quellentypen als Verhältnispunkt-Diagramme (NAS: 2023)

Abb. 8a: Typische PFAS-Verteilung in Umweltproben von verschiedenen PFAS-Quellentypen als Radialdiagramme (NAS: 2023)

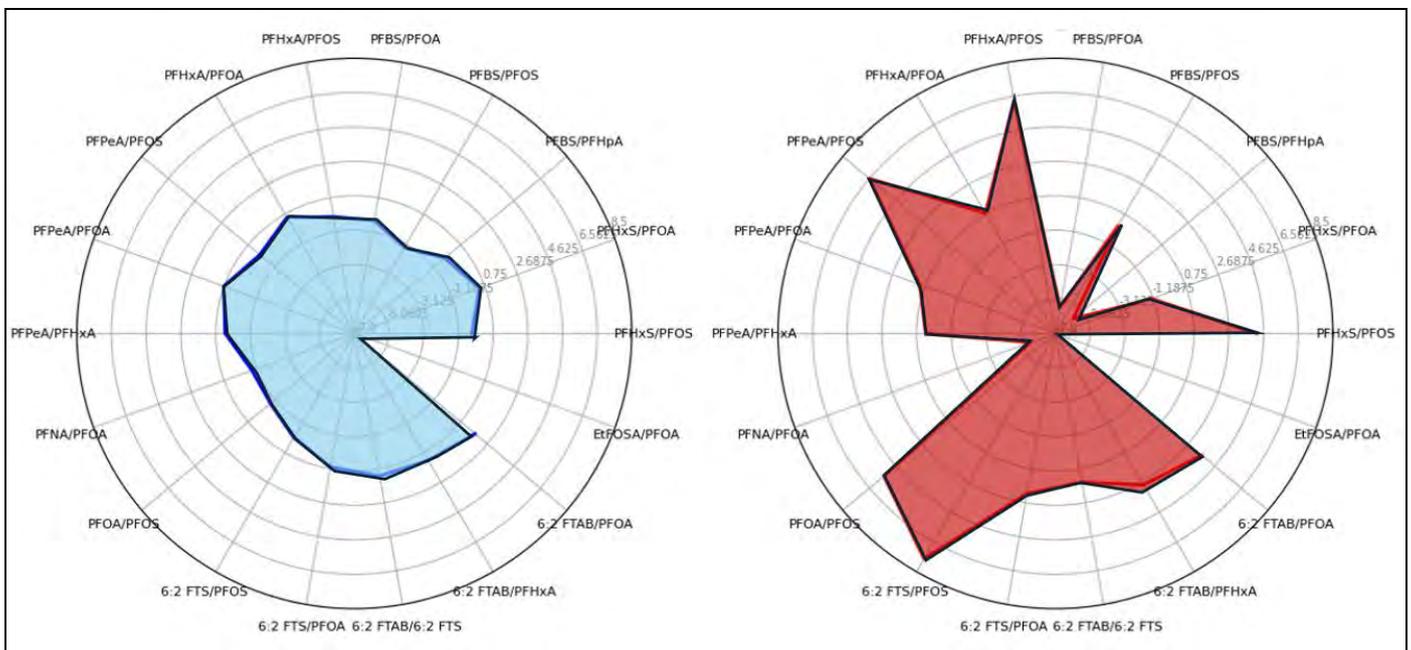


Abb. 8b: Typische PFAS-Verteilung in verschiedenen Löschschäume (AFFF), Quelle F. KARG, 2025

Die Abb. 9 zeigt zusammenfassend die Parameter die für eine PFAS-Quellen-Identifizierung und -Differenzierung AI-MVA (künstlicher Intelligenz basierte Multi-Vektor-Analyse) bewertet werden.

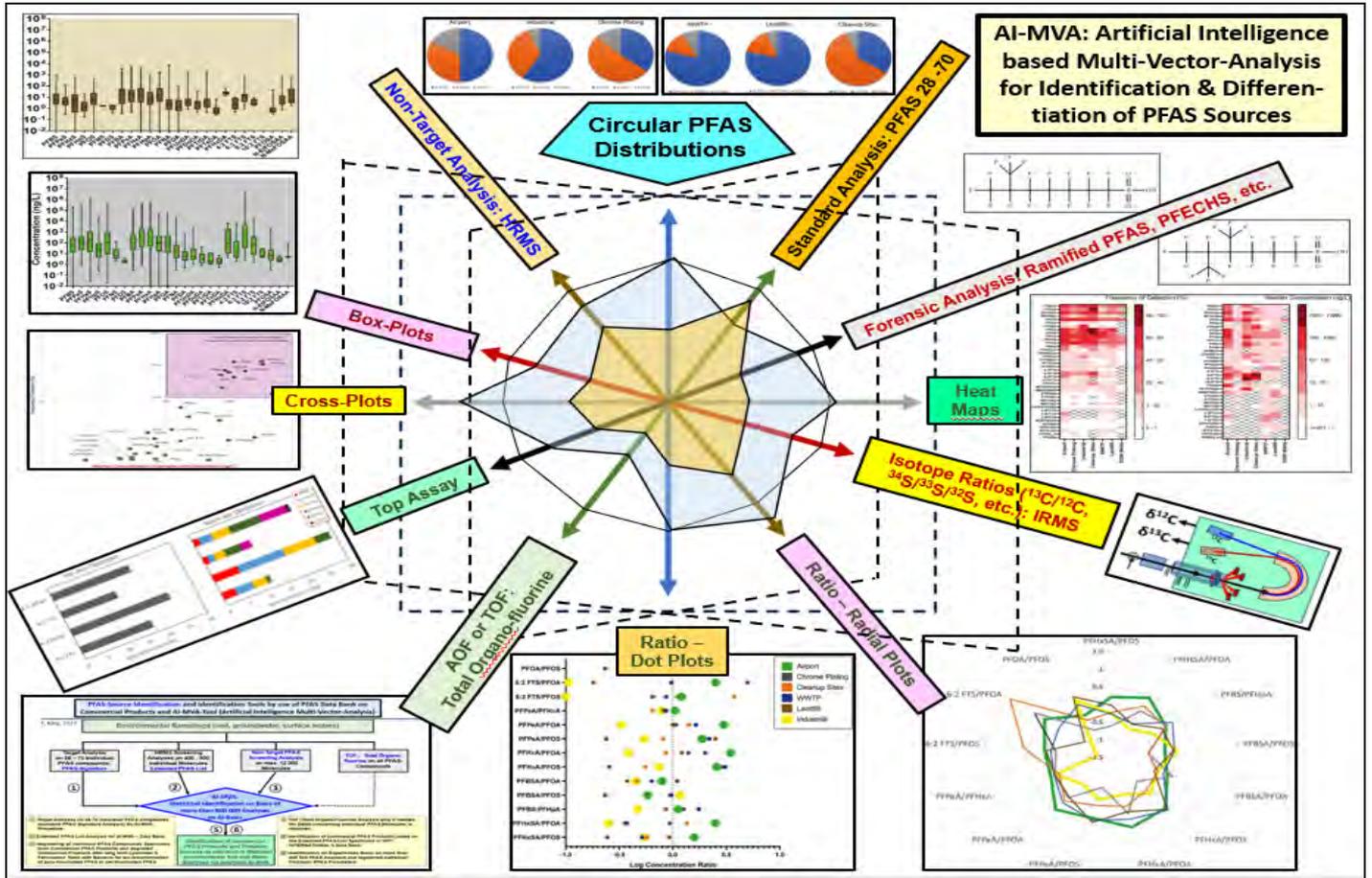


Abb. 9: Parameter die für eine PFAS-Quellen-Identifizierung und -Differenzierung AI-MVA (künstlicher Intelligenz basierte Multi-Vektor-Analyse) bewertet werden.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass es heute möglich ist, mit einer umfassenden statistischen Aufbereitung von Standard-PFAS-Umweltanalysen durch eine Multi-Vektor-Analyse (MVA) in mehreren Dimensionen (und mit Hilfe von künstlicher Intelligenz), PFAS-Kontaminationen im Boden, Grundwasser und in Oberflächengewässern verschiedenen PFAS-Quellen und kommerziellen PFAS-Produkten zuzuordnen*.

(*) Empfohlene Analysen-Parameter der Standardanalytik zur Anwendung des Informatik-Tools der Multi-Vektor-Analyse (MVA) können auf Wunsch kommuniziert werden.

Referenzen:

Charbonnet, J. A., A. E. Rodowa, N. T. Joseph, J. L. Guelfo, J. A. Field, G. D. Jones, C. P. Higgins, D. E. Helbling, and E. F. Houtz. 2021. Environmental Source Tracking of Per- and Polyfluoroalkyl Substances Within a Forensic Context: Current and Future Techniques. *Environmental Science & Technology*, Vol. 55, No. 11, pp. 7237–7245. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08506>.

Göckener, B., Fliedner, A., Rüdell, H. et al. (2021): Exploring unknown per- and polyfluoroalkyl substances in the German environment – The total oxidizable precursor assay as helpful tool in research and regulation. *Science of The Total Environment*, 782, 146825. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146825>

Guelfo, J. L., and D. T. Adamson (2018): Evaluation of a National Data Set for Insights into Sources, Composition, and Concentrations of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in U.S. Drinking Water. *Environmental Pollution*, Vol. 236, pp. 505–513. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.066>.

Houtz, E.F., Sedlak, D.L. (2012): Oxidative conversion as a means of detecting precursors to per-fluoroalkyl acids in urban runoff. *Environ. Sci. Technol.* 46, 9342-9349.

Huang, S. & Jaffé, R. (2019): Defluorination of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) by Acidimicrobium sp. Strain A6. *Environmental Science & Technology*. 2019 Oct 1; 53(19):11410-11419. doi: 10.1021/acs.est.9b04047. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.9b04047>

-
- ITRC (2022a): PFAS Technical and Regulatory Guidance Document. Interstate Technology Regulatory Council. https://pfas-1.itrcweb.org/#1_7.
- ITRC (2022b): PFAS – Per- and Polyfluoroalkyl Substances. Interstate Technology Regulatory Council. <https://pfas-1.itrcweb.org/>.
- Karg, F. (2022): PFAS: Management of Pollution and Health Risks: Site Investigations, Environmental Chemistry, Risk Assessment (sensitive ERP and others), Regulatory Thresholds and Treatments (including volatile PFAS FTOH in soils, groundwater, soil gas & ambient air). International PFAS-Congress ARET-SFSE-HPC INTERNATIONAL, Paris 20 October 2022. Minutes of Congress. https://www.saturne.net/mud/index.php?d=pfas_congress22_abstracts_pg
- Karg, F. (2023); Karg, F., Hintzen, U., Robin-Vigneron, L. et Girard, P. (2023): PFAS: Environmental Chemistry Investigations, Source Identification, Toxicology and TERQ Risk Assessments, including FTOH. Minutes of International Congress PFAS – Management of Environmental and Health Risks”. Paris, June 13-14, 2023. <https://hpc.ag/wp-content/uploads/PFAS-Congress-Abstract-KARG-HPC-INTERNATIONAL-2023-E.pdf>
- Karg, F. (2024) : PFAS-Source Identification and Differentiation in Environmental Pollution by use Multi Vector Analysis (MVA) on artificial Intelligence Basis – Application on standard Soil & Water Analysis. Congress-Manuscript for the International PFAS-Congress at 05 June 2024 in Paris.
- LANUV (2022): Bewertungsmaßstäbe für PFAS-Konzentrationen für NRW. Leitfaden des Bundes zur PFAS-Bewertung, in NRW per Erlass vom 04.03.2022 eingeführt. <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/gefahstoffe/pfc/bewertungsmaassstaebe#c6521>
- LAWA/LABO – Bund/Länderarbeitsgemeinschaften Wasser und Bodenschutz (2021): Fachbericht der PFAS-Koordinierungsgruppe - Fragestellungen zur konsistenten Ableitung von Bewertungskriterien für die Medien Grund- und Oberflächenwasser sowie Boden vor dem Hintergrund neuer EFSA-Empfehlungen. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, & M. Rosenkavalierplatz 2, © München, September 2021. https://www.lawa.de/documents/lawa-labo-fachberich-umk-fassung-211125-2_2_1649169943.pdf
- Liu, J., Avendaño, S.M. (2013): Microbial degradation of polyfluoroalkyl chemicals in the environment: a review. Environment international. 1 November 2013, DOI:10.1016/j.envint. 2013.08.022. Corpus ID: 28773717. <https://www.semanticscholar.org/paper/Microbial-degradation-of-polyfluoroalkyl-chemicals-Liu-Avenda%C3%B1o/cd3c413c79adf7cec83822997cf350a9705cd23d>
- McGuire, M. E., C. Schaefer, T. Richards, W. J. Backe, J. A. Field, E. Houtz, D. L. Sedlak, J. L. Guelfo, A. Wunsch, and C. P. Higgins (2014): Evidence of Remediation-Induced Alteration of Subsurface Poly- and Perfluoro- alkyl Substance Distribution at a Former Firefighter Training Area. Environmental Science & Technology, Vol. 48, No. 12, pp. 6644–6652. <https://doi.org/10.1021/es5006187>.
- MPART (2020): Perfluoroethylcyclohexane Sulfonate (PFECHS): Current Knowledge of Physicochemical Properties, Environmental Contamination and Toxicity. Michigan PFAS Action Response Team. <https://www.michigan.gov/-/media/Project/Websites/pfasresponse/documents/MPART/Workgroups/Human-Health/White-Paper-Physicochemical-Properties-Environmental-Contamination-Toxicity-ECHS.pdf?rev=677c70c658e44688aa72e440c7847dac>
- Monti C & K. Dasu (2023): Advanced fingerprinting analysis of PFAS in groundwaters: the use of advanced multivariate statistics and Machine learning techniques. Abstract submitted to the Congress “PFAS – Management of Environmental and Health risks”. Paris, June 13-14, 2023, 6 pp.
- NAS: US National Academy of Science (2023): PFAS Source Differentiation Guide for Airports. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/27164>
- Nickerson, A., A. C. Maizel, P. R. Kulkarni, D. T. Adamson, J. J. Kornuc, and C. P. Higgins (2020): Enhanced Extraction of AFFF-associated PFASs From Source Zone Soils. Environmental Science & Technology, Vol. 54, No. 8, pp. 4952–4962.
- Qian, L; Sühnhholz, S., Kümmel, S., Georgi, A., Fischer, A., Kuntze, K. (2023): Compound-Specific Stable Isotope Analysis to Determine Sources and Sinks of PFAS. AquaConSoil 2023, Session 3b17, Prague, Sept 13, 2023. Congress Minutes.
- Wang, N. Szostek, B., Buck, R.C., Folsom, P.W., Sulecki, L.M., Gannonet, J.T. (2009): Fluortelomer alcohol aerobic soil biodegradation: Pathways, metabolites and metabolite yields. Chemosphere. Volume 75, Issue 8, May 2009, Pages 1089-1096 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653509000496>
- Karg, F. (2024): PFAS-Quellendifferenzierung sowie Einzelbewertung der Vielstoffbelastungen gemäß BBodSchV § 15.4. für verhältnismäßige Sanierungen unter Berücksichtigung der flüchtigen Fluortelomeralkohole (FTOH). Seminar-Manuscript für das Karlsruhe-her Altlasten-PFAS-Seminar - Perflursan-Workshop, Karlsruhe: 18/06/2024. ICP perflusan (icp-ing.de)
- Karg, F. (2024): Die Bedeutung der Identifizierung und Differenzierung von PFAS-Quellen im Grundwasser mittels Multi-Vektor-Analyse. Seminar-Script. BEW. BEW-Altlastenseminar: BEW & Umweltministerium NRW - Duisburg / Germany. 06/09/2024.
- Karg, F. (2024) : PFAS-Quellen Identifizierung & Differenzierung via AI-MVA (Multi-Vektor-Analyse auf Basis von künstlicher Intelligenz). Symposium Script. BAFU Altlasten Symposium (Bundesamt für Umwelt), 31.10.2024. Solothurn – Schweiz / Switzerland. <file:///C:/Users/fka/Downloads/Symposium%202024%20Pr%C3%A4sentationen-1.pdf>
- Monti, C. & Karg, F. (2025): Identification and Differentiation of PFAS Contamination Sources in Groundwater and Surface Water for identification of technico-financial Re-sponsibilities. 4th International PFAS Conference; 04th Feb. 2025, Milano – Italy. Conference Script. https://www.webs-event.com/fr/event/PFAS_Italy/programme
-

Neue Technologien zur Entfernung von PFAS aus Wasser – aber bitte nachhaltig!

Katrin Mackenzie, Anett Georgi und Ariette Schierz

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind aufgrund ihrer nützlichen Eigenschaften in vielen Alltags- und Industrieprodukten enthalten. Diese Eigenschaften stellen jedoch zunehmend ein Problem für Mensch und Umwelt dar. PFAS werden auch als „Forever Chemicals“ bezeichnet, da sie in der Umwelt nicht natürlich abgebaut werden und sich weltweit in Spurenkonzentrationen ubiquitär verbreitet haben. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von punktuellen Kontaminationen, z.B. durch die Verwendung von PFAS-haltigen Feuerlöschschäumen oder durch Emissionen aus Industrie und Verbraucherprodukten, aber auch durch die Ausbringung von Klärschlamm zur Bodenverbesserung. Aufgrund ihrer hohen Mobilität in aquatischen Systemen kontaminieren sie auch Grund- und Trinkwasser. Einmal in die Umwelt gelangt, lassen sie sich nur schwer wieder entfernen [1]. Die Suche nach neuen Methoden ist daher eine wichtige Aufgabe der Forschung.

1 Welchen Herausforderungen müssen wir uns stellen?

Leider gibt es kein „Allheilmittel“ gegen alle PFAS. Im Gegenteil, es werden spezifische Lösungen benötigt, die in Kombinationsverfahren münden müssen. Dazu kommen Herausforderungen, denen wir uns stellen müssen. Hier eine Auswahl:

- Die Natur bietet keine wesentlichen Selbstheilungskräfte gegenüber PFAS, auch nicht gegenüber Precursoren, die als teilweise abbaubar gelten, während die daraus gebildeten Perfluorverbindungen nicht weiter bioabbaubar sind. Natural Attenuation ist also keine Reinigungsoption.
- PFAS werden durch konventionelle Abwasserbehandlungsverfahren in unseren kommunalen Kläranlagen nicht ausreichend oder gar nicht zurückgehalten. Bewährte herkömmliche Reinigungsverfahren wie Sandfiltration, chemische Fällung oder einfache physikalische Trennmethode sind bei diesen langlebigen Substanzen nur bedingt wirksam. Auch die alleinige Ozonierung als Maßnahme der 4. Reinigungsstufe ist gegenüber PFAS weitgehend unwirksam.
- Großflächig in der Umwelt ausgebreitete PFAS sind nicht rückholbar. Deshalb gilt es, die Ausbreitung bestehender PFAS-Kontaminationen in der Umwelt wirksam zu stoppen, um Wasserressourcen zu schützen. Es werden Technologien benötigt, um Spurenkonzentrationen in sensiblen Gütern wie Trinkwasser sicher und kostengünstig zu entfernen. Diesen Anforderungen steht wegen der extremen Stabilität der PFAS ein begrenztes Spektrum an Behandlungsoptionen gegenüber. Umso wichtiger sind Maßnahmen (regulatorisch aber auch technologisch), um Vertreter dieser Stoffgruppen nicht in die Umwelt gelangen zu lassen (End-of-Pipe-Lösungen statt Einleitung in die Kläranlage) und auch nicht weiter verbreiten zu lassen (Grundwasserfahnen abschneiden, belastete WWTP-Abflüsse adsorptiv aufreinigen).
- Anders als in Industrieabwässern, finden wir in der Umwelt (Grundwasser, Oberflächenwasser) nur sehr geringe Konzentrationen an einer Vielzahl verschiedener Einzelsubstanzen, von denen einige noch gar nicht auf dem „Radar“ für die analytische

Erfassung sind. Es fehlen gute und vor allem allgemein gut zugängliche Erfassungsmethoden für diese komplexen Mischungen. Obwohl die vorliegenden Zahlen zu Fällen von PFAS-Verunreinigungen schon erschreckend genug sind, ist das genaue Ausmaß nicht bekannt. Die niedrigen Konzentrationen stellen extrem hohe Anforderungen an Methoden zur Entfernung, aber vor allem ihre Effizienz.

- Die klassische Adsorption funktioniert für langkettige PFAS recht gut, für kurzkettige, und hier vor allem für Carbonsäuren, weniger gut.
- Verbindungen aus der Klasse der PFAS werden zunehmend in Stadtgebieten und damit in Straßenabläufen gefunden.
- Im Vergleich zum Trinkwasser ist die Einleitung von PFAS-haltigen Industrieabwässern derzeit kaum reguliert. In der Zukunft ist hier mit deutlichen Verschärfungen der Richtlinien zu rechnen. Dadurch wird die Nachfrage nach effizienten Technologien zur Entfernung der persistenten PFAS aus kontaminierten Wässern stark steigen.

2 Wie ist der Stand der Technik? (Kurzabriss)

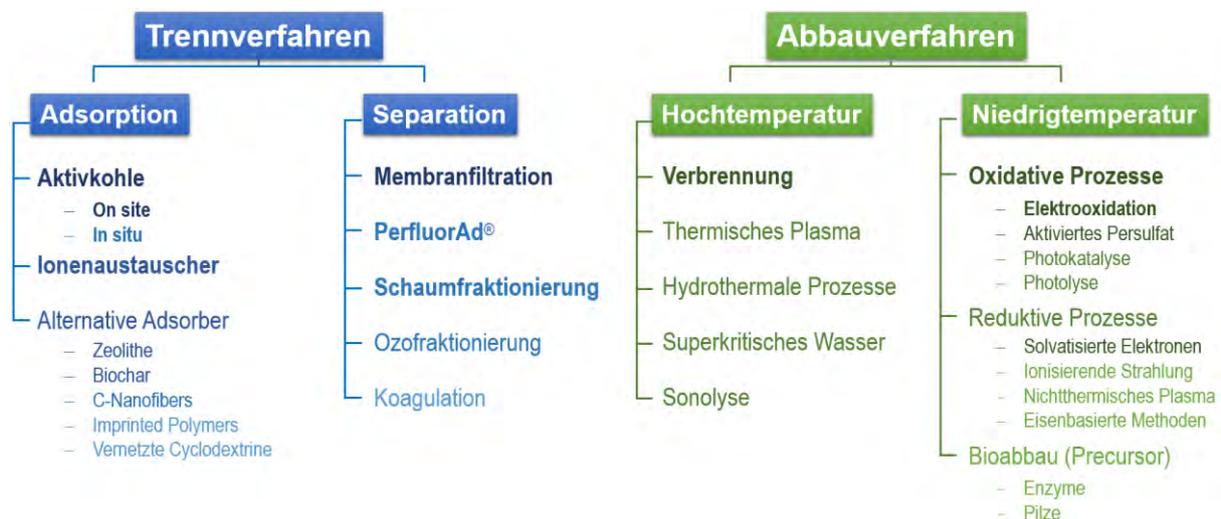


Abb. 1: Methoden zur PFAS-Entfernung aus Wasser

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die derzeit am häufigsten verwendeten (fett und dunkler dargestellt) und beforschten Methoden zur PFAS-Entfernung aus der Wasserphase. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob es sich bei den verfügbaren Verfahren um die Abtrennung von PFAS aus dem Wasser oder um die Zerstörung der Verbindungen handelt. Im großtechnischen Maßstab werden bisher vor allem Trennverfahren wie die Adsorption an Aktivkohle (AK) und Ionenaustauschern sowie die Membranfiltration eingesetzt.

2.1 Abtrennung von PFAS aus der Wasserphase

Die Adsorption von Schadstoffen an AK-Filtern ist die am besten etablierte Methode zur Wasserreinigung [2]. Für die PFAS gilt, dass langkettige Verbindungen in der Regel gut adsorbierbar sind, bei kurzkettigen PFAS stößt die Methode jedoch schnell an ihre Grenzen. Substanzen wie Perfluorbutansäure oder Perfluorpentansäure haben eine geringere Affinität zu AK und werden daher oft nur unzureichend entfernt. Perfluorsulfonsäuren gleicher Kettenlänge sind in der Regel besser adsorbierbar als die Carbonsäure-Pendants. Der frühe Durchbruch der kurzkettigen PFAS durch das Filterbett bestimmt deshalb die Häufigkeit des

Filterwechsels. Damit sind kurzkettige PFAS nicht nur Kostentreiber, sondern erhöhen gleichzeitig den ökologischen Fußabdruck der Methode durch den erhöhten Bedarf an AK, die in den meisten Fällen auf Basis fossiler Rohstoffe wie Steinkohle hergestellt wird, dramatisch. Ob nun AK-Filtration oder Ionenaustausch, Trennverfahren verlagern die Kontamination vom Wasser in eine zweite Phase, die als Abfall entsorgt oder weiter behandelt werden muss. Dennoch haben sie ein hohes Potenzial für die Behandlung von PFAS, da sie für große Wasserströme einfach anwendbar und sehr sicher sind, während Abbauprozesse in der Regel energieintensiv sind oder harsche Bedingungen erfordern oder nur langsam vorstattengehen.

Versucht man, Methoden zu nutzen, die für „konventionelle“ Schadstoffe Stand der Technik sind, kann man bei PFAS so manchen Aha-Effekt erleben:

Beispielsweise verhalten sich AK für die Wasserreinigung, die im Allgemeinen nach ihrer inneren Oberfläche (BET) und Adsorptionskennzahlen wie der Jodzahl ausgewählt werden, für die klassischen hydrophoben Schadstoffe vorhersehbar und wenig unterschiedlich. Für die große Zahl an Perfluoralkylsäuren allerdings, die unter Umweltbedingungen dissoziiert (sehr niedrige pKs-Werte), also als Anionen vorliegen, kann man zwischen diesen Kohlen Sorptionseffizienzen finden, die sich für die gleiche PFAS-Substanz um mehrere Größenordnungen voneinander unterscheiden [3]. Je kürzer die Kette wird, umso größer werden die Unterschiede im Vergleich der Kohlen. Für die Adsorption von PFAS spielen anders als für „konventionelle“ Kontaminanten (neutrale hydrophobe Adsorption) die chemischen Oberflächeneigenschaften der AK eine wesentliche Rolle (s. Punkt 3.).

Da AK häufig als „Einweg-Adsorber“ gesehen wird, existiert natürlich der Wunsch nach einer unkomplizierten On-site-Regenerierbarkeit. Auch bei Ionenaustauschfiltern ist das nicht ohne Abstriche erfüllbar. Wenn die Ionenaustauscherharze (IXR) gesättigt sind, erfolgt ihre Entsorgung normalerweise in speziellen Hochtemperaturanlagen durch Verbrennung bei Temperaturen von über 1.000 °C [4]. Dabei sollten die PFAS vollständig zerstört werden. Je nach Beladungsgrad und chemischen Eigenschaften der Harze ist aber auch eine Regeneration möglich – bei sehr geringer Beladung mit Lauge, ansonsten mit alkalischen alkoholischen Lösungen. Die erzeugten Konzentrate müssen wiederum der Entsorgung zugeführt werden.

Neben den beiden etablierten Adsorptionsprozessen, die AK- oder Ionenaustauschfilter bevorzugen, kommen immer neue alternative Produkte in die Anwendung (s. Abbildung 1), die noch als Nischenprodukte zu betrachten sind (hoher Preis, geringe Verfügbarkeit oder auch geringere Adsorptionsleistung bei niedrigerem Preis) aufweisen. Trotzdem haben einige dieser Alternativen ein hohes Potenzial für Spezialfälle der Wasseraufbereitung (s. Beispiele in Abschnitt 3).

Die Separation von PFAS aus der hochverdünnten Wasserphase in ein Konzentrat, das effektiver entsorgt werden kann, ist ein weiterer vielversprechender Ansatz, größere Wasserströme zu behandeln. Membranverfahren wie Nanofiltration und Umkehrosmose werden deshalb als Alternativen zu den Adsorptionsverfahren beworben. Die Wirksamkeit ist aber oft unzureichend und es stellen sich Fragen nach der Lebensdauer der Membranen und der Aufbereitung der Konzentrate, welche häufig recht komplexe Gemische bilden. Trotzdem werden hier neue Entwicklungen aus der Wissenschaft erwartet, die Membranverfahren zum einen preiswerter und effektiver gestalten und zum anderen auch die Lebensdauer der Membranen verlängern [5].

Stark verschmutzte Wässer wie Industrieabwässer oder Deponiesickerwasser erfordern oft eine Vorbehandlung bevor sie weiter gereinigt werden. Zum Beispiel kann die Ausfällung der anionischen PFAS mit kationischen Flüssigpolymeren wie PerfluorAd[®] auch in komplexen Medien erfolgen und damit leichter zu reinigende Fraktionen erzeugen [6].

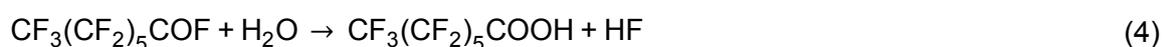
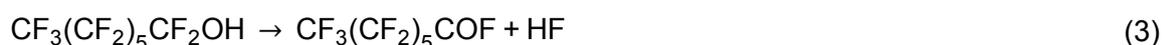
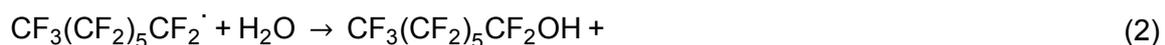
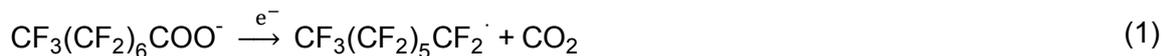
Fraktionierungsverfahren wie Schaumfraktionierung oder die Ozofraktionierung beruhen auf der Anreicherung der PFAS an Grenzflächen. Die Ozofraktionierung ermöglicht zusätzlich die (Teil)Oxidation von Vorläufersubstanzen. Wie für Koagulate oder Elektrokoagulate ist für alle Separationsverfahren auch hier die Nachbehandlung der Konzentrate erforderlich.

2.2 Verfahren und Methoden zum Abbau von PFAS

Die Kohlenstoff-Fluor-Bindung ist die stärkste, die wir aus der organischen Chemie kennen. Die Bindungsdissoziationsenergie bei $T = 298 \text{ K}$ ist mit $D_{298^\circ, \text{C-F}}^0 = 520 \text{ kJ mol}^{-1}$. Im Vergleich dazu sind die C-H- und C-C-Bindungen deutlich leichter zu knacken (gerundete Werte für $D_{298^\circ}^0$ C-H: 340 kJ mol^{-1} , C-C: 350 kJ mol^{-1} , C-Cl: 300 kJ mol^{-1}) [7]. Das erklärt auch, warum der Abbau der PFAS besonders schwierig ist und einen hohen Energieeinsatz benötigt.

Hochtemperaturprozesse wie die Verbrennung von PFAS-haltigen Medien nutzen Temperaturen von 1000°C . Hier kann die C-F-Bindung thermolytisch spalten (mit oder ohne Anwesenheit von Sauerstoff). Dabei wird zunächst die Kopfgruppe der PFAS aufgrund der geringeren Stabilität der C-C- bzw. C-S-Bindung abgespalten. Das dadurch entstehende Fluoralkylradikal ist deutlich instabiler als die jeweilige Ausgangsverbindung und zersetzt sich je nach Gasatmosphäre zu Fluorethenen und Fluorcarbenen (Pyrolyse) oder zu CO , CO_2 und HF (Verbrennung). Energetisch gesehen ist die Verbrennung eher für reinen PFAS-Abfall sinnvoll, da für Lösungen oder adsorbierte Verbindungen ein Teil der Energie für die Umwandlung der Matrix verbraucht wird. Thermisches Plasma ist in der Lage, PFAS nach Anreicherung an der Gas-Wasser-Grenzfläche thermolytisch, aber auch mit energiereichen (hydratisierten) Elektronen und Gasionen zu zerstören. Eine weitere Variante zur Erzeugung von hohen Temperaturen ist die Sonolyse bei hohen Frequenzen. Die erzeugten Kavitationen erzeugen Temperatur- und Druckniveaus ($\geq 5000 \text{ K}$, 10^5 Pa), bei denen PFAS pyrolysieren und Wasserstoffatomen und Hydroxylradikalen ausgesetzt werden. Die Sonolyse führt zu einer schnellen und effektiven Mineralisierung von PFAS, aber im Vergleich zu anderen Techniken ist das Up-Scaling herausfordernd und der Prozess sehr energieaufwendig. Plasma- und Sonolyse-basierte Verfahren werden durch die Reaktion an der Gas-Wasser-Grenzfläche weniger von Co-Verunreinigungen beeinflusst.

Perfluorierte Ketten $-\text{[CF}_2\text{]}_x-$ sind nahezu resistent gegenüber Oxidationsprozessen bei moderaten Temperaturen. Ein geeigneter Weg zum Abbau perfluorierter Carbonsäuren sind radikalgetragene (advanced) Oxidationsprozesse (AOPs), bei denen diese Verbindungen durch Elektronentransfer beginnend von der Kopfgruppe her schrittweise abbauen können [8]. Dieser Transfer ist mit dem am häufigsten genutzten Oxidationsmittel, dem Hydroxylradikal, allerdings nicht möglich [9]. Sulfatradikale sind in der Lage, über Elektronentransfer zu reagieren. Photolyse, Photokatalyse und auch die elektrochemische Oxidation können der Kopfgruppe ein Elektron entziehen, wodurch die Decarboxylierung stattfindet und durch weitere Prozesse in einem „Reißverschluss-Mechanismus“ schrittweise kürzerkettige Carbonsäuren entstehen. Durch Wiederholung dieser Reaktionsschritte verkürzt sich die Säure jeweils um ein CF_2 -Glied, bis zur vollständigen Mineralisierung (siehe Gl. (1)- (4)) [10].



Die elektrochemische Oxidation (kurz Elektrooxidation) mit bordotierten Diamantelektroden oder anderen neueren Elektrodenmaterialien (Titansuboxid) ist in der Lage, eine vollständige Mineralisierung von PFAS zu erzielen. [11]. Das dabei gebildete Perfluoralkylradikal kann

anschließend mit Hydroxylradikalen oder Sauerstoff weiter reagieren und wird sukzessive bis zum CO_2 abgebaut. Allerdings ist die Zusammensetzung des zu behandelnden Wassers entscheidend für die Anwendbarkeit. Bei der Behandlung komplexer Wassermatrizes (wie Deponiesickerwässer, PFAS-Konzentraten aus der Membranfiltration oder Regeneratlösungen von Ionenaustauschern) ist Vorsicht angemahnt. Die Effizienz des Prozesses verringert sich durch zahlreiche leichter oxidierbare Inhaltstoffe. Gleichzeitig können Perchlorat, Chlorat und Bromat als Nebenprodukte entstehen und in Folgereaktionen mit vorhandenen organischen Resten nicht nur den AOX-Wert erhöhen, sondern potentiell toxische anoxidierte CKW erzeugen. Eine zusätzliche Nachreinigung ist dringend erforderlich. Ablagerungen auf der Anode können zudem die Standzeit verringern. Photolyse mit harter UV-Strahlung bei Wellenlängen < 200 nm ermöglicht den PFAS-Abbau ebenfalls, wobei auch Sulfonsäuren reagieren, aber deutlich langsamer. Leider dringt diese hochenergetische UV-Strahlung in wässrige Medien kaum ein (< 100 nm) und wird vom Wasser schnell absorbiert. Für die effizientere Nutzung von Strahlung können Halbleiter-Photokatalysatoren verwendet werden, die durch Absorption von Photonen positiv geladene Löcher zur Oxidation der PFAS einsetzen [12].

PFAS benötigen auch für die reduktive Zerstörung hochreaktive Spezies wie solvatisierte Elektronen (e_{aq}^-) und H-Atome (H^\cdot), wie sie z.B. bei der Elektronenstrahlbestrahlung von Wasser entstehen. Zusätzlich zu genannten Spezies wurden Sulfit-Radikalanionen ($\text{SO}_3^{\cdot-}$) und Schwefeldioxid-Radikalanionen ($\text{SO}_2^{\cdot-}$) als Reduktionsmittel beschrieben. Allerdings sind alle diese reaktiven Spezies extrem kurzlebig und werden ebenfalls in unselektiven Reaktionen von einer Vielzahl an organischen und redoxaktiven anorganischen Stoffen verbraucht, was den reduktiven Abbauprozess von PFAS wenig effizient gestaltet [13].

Die hohe Persistenz der perfluorierten PFAS-Vertreter und auch der meisten Polyfluorverbindungen zeigt, dass die Biotransformation problematisch ist. Neue Studien zeigen jedoch, dass spezielle (gentechnisch angepasste) Mikroorganismen in der Lage sind, Abbauleistungen zu erbringen [14]. Allerdings bleibt es unklar, ob das Potenzial der Biosanierung als praktikable Technologie zur Behandlung von PFAS in der Umwelt dienen kann. Beobachtete Biotransformationsreaktionen von PFAS führten bisher nicht zu einer vollständigen Defluorierung und/oder Detoxifikation der Ausgangsmoleküle. In vielen Fällen werden die Vorläuferverbindungen in endständige Perfluorcarbonsäuren umgewandelt, die persistent in der Umwelt verbleiben [15].

3 Neue Methodenentwicklungen

Es konnte gezeigt werden, dass die effektive Entfernung aber auch der Abbau von PFAS nicht einfach sind, aber möglich. Genau hier setzen mehrere Entwicklungen aus unseren Arbeitsgruppen an, die bestehende Methoden aufgreifen, die die Verbesserung der Effektivität dieser Methoden und die nachhaltigere Nutzung von eingesetzten Materialien zum Ziel haben.

3.1 Worin sehen wir Ansätze, die klassische Adsorption nachhaltiger zu gestalten?

Die Erkenntnis, dass sich verschiedene Aktivkohleprodukte drastisch in ihrer Adsorptionsleistung für PFAS unterscheiden können macht Mut, diese Unterschiede explizit ausnutzen zu können. Dazu kommt, dass wir einen massiven Einsatz von AK zur Entfernung selbst hochmobiler Verunreinigungen (z.B. kurzkettige PFAS) sehen, was aber mit einem sehr hohen Kohlenstoff-Fußabdruck verbunden ist. Hier gilt es,

- i. die Aktivkohlen selber zu ertüchtigen für eine effektivere PFAS-Adsorption auch der kurzkettigen PFAS sowie Nutzer für die Auswahl an den geeignetsten kommerziell verfügbaren AK zu sensibilisieren,

- ii. alternative Lösungen zu finden, die AK-Filter vor allzu schnellen Durchbrüchen kurzketziger PFAS zu schützen und damit häufigen Filtertausch bei geringen PFAS-Gesamtbelastungen zu vermeiden und
- iii. regenerierbare Adsorber und Methoden zur effizienten On-site-Regeneration bereit zu stellen.

3.2 Aktivkohleadsorption

Ob für die On-site-Anwendung oder den Einsatz kolloidaler AK in der *In-situ*-Anwendung, ein tieferes mechanistisches Verständnis der adsorptiven Wechselwirkungen zwischen den PFAS und den Adsorbentien kann helfen, die AK so zu „tunen“, dass sie längere Standzeiten ermöglichen und so den Aktivkohleverbrauch insgesamt minimieren [3]. Das UFZ hat für die *In-situ*-Anwendung im Grundwasser PFAS-spezifische Aktivkohlen entwickelt, die auf Kombination von hydrophober Adsorption und Ionenpaarbildung basieren und auch in ihrer Langzeitwirkung erhalten bleiben. Die Oberflächenchemie dieser AK wäre auch für On-site-Anwendungen in Filterbetten zu empfehlen. Neben den Eigenschaften der PFAS und des Wassers sind die Eigenschaften der Adsorptionsmittel, einschließlich der physikalischen Eigenschaften des Sorptionsmittels und der Oberflächenchemie wichtige Einflussfaktoren für die Entfernung von PFAS [16]. Die AK-Oberfläche ist für PFAS-Adsorption besser geeignet, wenn sie folgende Eigenschaften aufweist:

- geringer Gesamtsauerstoffgehalt,
- geringer Gehalt an sauren Gruppen und damit eine höhere Basizität,
- einen hohen Ladungsnullpunkt,
- geringe Kationenaustauschkapazität und höhere Anionenaustauschkapazität.

Diese Eigenschaften lassen sich durch verschiedene Varianten der Verfahrensführung in der AK-Aktivierung bzw. durch entsprechende Nachbehandlung erreichen.

Mit Blick auf den Kohlenstoff-Fußabdruck ist es erstrebenswert, AK zu verwenden, die nicht auf Basis fossiler Rohstoffe, wie Steinkohle, hergestellt wird und zudem Transportwege über den halben Globus absolviert hat. Mit Hilfe einer Bottom-up-Synthesestrategie konnte gezeigt werden, dass nachwachsende Rohstoffe durch Kopplung von hydrothormaler Carbonisierung und nachfolgender milder Aktivierung nicht nur mit geringem Energieaufwand nachhaltiger synthetisiert werden kann, sondern auch speziell für die *In-situ*-Anwendung zur PFAS-Adsorption als kolloidales Material getuned werden kann [17]. Dieser Prozess befindet sich derzeit im erweiterten Up-Scaling. In spätestens einer Dekade wird die Nachfrage nach Pulveraktivkohle drastisch steigen, wenn in einer Vielzahl deutscher Wasseraufbereitungsanlagen die 4. Reinigungsstufe eingeführt werden muss, nach Pulver-AK, die spezialisiert ist auf persistente, mobile, funktionalisierte Substanzen [18], die die Kläranlagen derzeit passieren und die der Ozonierung widerstehen (wie einige Pharmareistoffe aber auch PFAS) bzw. durch Ozonierung erst gebildet werden.

Der Wunsch, AK on site nicht-thermisch zu regenerieren, führte zur Entwicklung der elektrounterstützten Adsorption/Desorption mit AK-Vliesen als elektrisch leitfähige Adsorber [19,20]. Diese neue Technologie ist zur Entfernung von vor allem kurzketzigen PFAS und anderen ionisierten organischen Schadstoffen aus Wasser besonders gut geeignet. Die leitfähige AK wird mit geringfügigen elektrischen Potentialen (< 1 V) beaufschlagt und durch einfaches Umschalten der elektrischen Potentiale regeneriert, so dass die vorher aus großen Wasservolumina „eingesammelten“ Schadstoffe in einem kleinvolumigen Konzentrat abgegeben werden. Damit wird der Adsorber unter sehr milden Bedingungen regeneriert. Die gute Nachricht für die Nachbehandlung des Konzentrats ist, dass hier – anders als bei Retentaten der Membranfiltration und Regeneraten der Ionenaustauscher – ein sehr sauberes Konzentrat ohne wesentliche Matrixbestandteile entsteht, das sich für die nachhaltige Zerstörung durch fortgeschrittene Oxidationsverfahren eignet, ohne Gefahr zu laufen, unerwünschte Nebenprodukte zu produzieren [21]. Der Nachweis, dass die Methode der

elektrounterstützten Adsorption/Desorption mit AK-Vliesen auch im Up-Scaling funktioniert konnte bereits im Projekt FABEKO (BMBF, FKZ 02WQ1577C) in Feldversuchen prinzipiell erbracht werden (Abbildung 2).



Abb. 2: Elektrosorptionsmodule in der FABEKO-Pilotanlage. (Foto: Robert Köhler, UFZ)

Gelernt haben wir, dass hier eine neue Chance besteht, AK-Filteranlagen durch die Kombination von konventioneller und Elektro-Sorption vor verfrühten Durchbrüchen kurzkettiger PFAS zu schützen. Denn gerade für diese kurzkettigen PFAS ist die potentialgesteuerte Methode besonders effizient nutzbar – eine regenerierbare Adsorberstufe, die den Durchbruch kurzkettiger PFAS „abfängt“, ständig regeneriert werden kann, aber damit die Standzeit der bereits durchgebrochenen konventionellen Filter für die langkettigen PFAS drastisch erhöht, für deren Adsorption die AK-Filtration aus unserer Sicht unschlagbar ist.

3.3 Alternative Adsorber und deren oxidative Regeneration

Vor-Ort-regenerierbare innovative Materialien auf Zeolithbasis mit adsorptiven und katalytischen Funktionen wurden bereits erfolgreich zur Entfernung von CKW aus Grundwasser im Pilotmaßstab getestet [22]. In einer Weiterentwicklung wurde ein Verfahren entwickelt, das Zeolithe als stabile und effiziente anorganische Adsorbentien nutzt und deren chemische Regeneration vor Ort durch PFAS-Zerstörung ermöglicht (Patent: EP3873659 (EU); US12017200 (USA)). Für die Adsorption von PFAS insbesondere von länger-kettigen Substanzen wie PFOA eignen sich Vertreter der Klasse der BEA-Typ-Zeolithe hervorragend [23]. Auch wenn die Adsorptionsleistung die der PFAS-optimierten AK für PFOA nur annähernd erreicht, bieten Zeolithe einen riesigen Vorteil gegenüber AK, denn es lassen sich für diese anorganischen Adsorber oxidative Methoden zu nutzen, um die adsorbierten PFOA-Moleküle direkt auf dem Adsorber zu oxidieren. AK würde das nicht unbeschadet überstehen, aber Zeolithe sind komplett oxidationsstabil.

Die Regenerierung kann direkt im Bett durch Spülen mit erwärmter Persulfatlösung erfolgen. Dabei werden Sulfatradikale durch den Zerfall des Persulfats bei erhöhten Temperaturen gebildet [24]. Ein Austausch und Abtransport des Adsorbers wie für Aktivkohle üblich, ist nicht notwendig. Damit bietet das Verfahren eine nachhaltige Lösung, die Kosten und Energie spart. Durch die Trennung in Adsorptions- und Regenerationsphase werden beide Prozesse synergetisch miteinander verknüpft. Die Wasserbehandlung erfolgt mit hohem Durchsatz durch den schnellen und sicheren Adsorptionsprozess, der langsame Abbau der persistenten PFAS erfolgt nachdem der Adsorber voll beladen ist, in einem separaten, gut kontrollierbaren Schritt, der bis zur vollständigen Mineralisierung geführt werden kann (Schema Abb. 3b).

Das Verfahrensprinzip wird derzeit für die Entfernung von 6:2 Fluortelomersulfonsäure (H_4PFOS) im Pilotmaßstab im Rahmen des UFZ-transfun®-Projektes ZeoPFAS mit Abwässern aus der Galvanikindustrie getestet, wo H_4PFOS als Netzmittel eingesetzt wird (Abb. 3). H_4PFOS , das seit dem Verbot von PFOS im Jahr 2012 als Ersatzstoff dient, wird

zunehmend in der Umwelt nachgewiesen und gilt ebenfalls als gesundheitsgefährdend. Der Technologieansatz stellt gerade für solche Industriezweige, die größere Mengen PFAS emittieren und zeitnah eine „End-of-Pipe“-Reinigungstechnologie suchen, eine nachhaltige Lösung dar, um PFAS-Emission über Kläranlagen zu verhindern und deren Umweltauswirkungen zu minimieren.

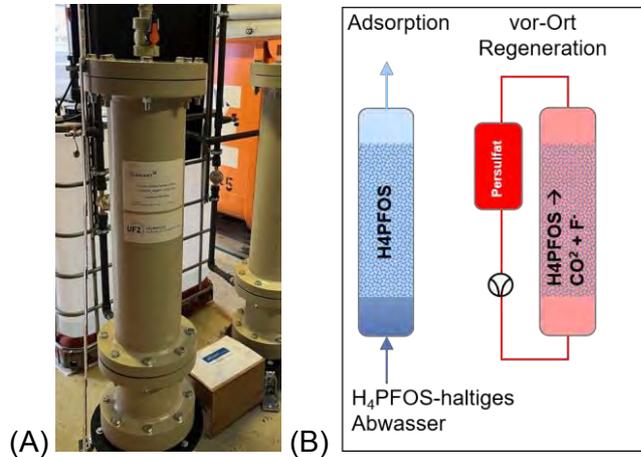


Abb. 3:

(A) Pilotanlage in der Partnerfirma der Galvanikindustrie: Der Zeolithreaktor wird im technischen Maßstab betrieben und in seiner Leistung mit einem Aktivkohlereaktor (ca. 20 l Adsorbervolumen) verglichen, (B) Schema des Zeolith-Festbettes als Adsorber, der periodisch durch wärmeaktiviertes Persulfat regeneriert wird.

(Foto: Robert Köhler, UFZ)

Die Methode, die Zeolith-Regenerierung mit wärmeaktiviertem Persulfat zu bewerkstelligen, basiert auf der Oxidation mit Sulfatradikalen. In einer experimentellen Studie zeigte sich eine weitere Option für eine neuartige Wasseraufbereitungstechnologie, die zunächst ebenfalls einen Adsorptionsschritt auf Zeolithbasis und anschließend einen Schritt zur photochemischen Regeneration des Adsorptionsmittels umfasst. Im Vergleich zu den sulfatradikalgetragenen Oxidationsprozessen bietet der photokatalytische Abbau den Vorteil, dass auch Perfluorsulfonsäuren abbaubar sind, wobei energieintensivere UV-B-Strahlung (254 nm) notwendig ist. Der durch die Fe-Beladung des Zeoliths induzierte photokatalytische Abbau Regeneration sogar mit Sauerstoff (O₂) als terminalem Oxidationsmittel möglich [25].

3.4 Erfolgversprechende Lösungen, die sich noch im Labormaßstab befinden

Die oben beschriebenen Methoden mit Up-Scaling wurden allesamt aus dem Labormaßstab weiterentwickelt. Deshalb sollen weitere Entwicklungen hier kurz skizziert werden:

- Mineralinduzierte Aktivierung von Persulfat ohne zusätzliche Einwirkung von Wärme oder Licht lässt sowohl neue On-site- als auch *In-situ*-Methoden für die Wasserreinigung erhoffen. Eisensulfid ist solch ein Kandidat. Die bewährte Kopplung von adsorptiver Anreicherung von PFAS mit der Zerstörung im adsorptiven Zustand wird mit FeS-aktiviertem Persulfat erreicht [26]. Die erfolgreiche Zerstörung von Perfluorcarbonsäuren konnte damit selbst in komplexerer Wassermatrix erfolgen durch Entkopplung des Reaktionsorts (an oder in der Nähe der FeS-Oberfläche) von den Quenchreaktionen, die üblicherweise in Lösung stattfinden würden. Das konnte bereits im Feldversuch bestätigt werden. Im Labormaßstab laufen derzeit Arbeiten zur Erhöhung der Adsorptionsleistung des Aktivators zur Effizienzsteigerung der Methode.
- Neue Membranentwicklungen zielen auf die effektive Rückhaltung von PFAS bei Erhalt einer hohen Wasserpermeabilität der Membran. Polyelektrolyt-Mehrschicht-PEM-Membranen konnten durch schrittweise Beschichtung (Layer-by-Layer Coating, LBL) erfolversprechende Ergebnisse liefern. Polydiallyldimethylammoniumchlorid (PDADMAC) und Polystyrolsulfonat (PSS) wurden als Polykation bzw. Polyanion verwendet. Polyethersulfon (PES) wurde als Trägermembran verwendet. Um die elektrostatische Wechselwirkung zwischen dem Polykation und der negativen

Trägeroberfläche während der ersten Doppelschichtbildung zu verbessern, wurde die Trägeroberfläche durch eine einstufige Funktionalisierung mittels Elektronenstrahl modifiziert. Die modifizierten PEM-Membranen auf Trägermaterialbasis mit nur drei Doppelschichten zeigten eine hervorragende Leistung mit einer Wasserpermeabilität von bis zu 13,5 L/m² h bar und einer PFOA-Rückweisung von bis zu 97%.

- Die prinzipielle Eignung von photokatalytischen Prozessen zum PFAS-Abbau konnte bereits gezeigt werden. Klassische Photokatalysatoren auf TiO₂-Basis zeigen für PFAS allerdings eine sehr niedrige Adsorptionsaffinität am Katalysator. Die Untersuchung des verbesserten photokatalytischen Abbaus von PFOA mit mesoporösen TiO₂-Katalysatoren hat wertvolle Einblicke in Optimierungsstrategien geliefert. Die Synthese mesoporöser TiO₂-Katalysatoren, ob mit Platin dotiert oder undotiert, zeigt im Vergleich zu kommerziellen TiO₂-Katalysatoren erhebliche Verbesserungen der PFOA-Abbaueffizienz.

Die Beispiele unterstreichen einmal mehr, dass die Erhöhung der Oberflächenkonzentration der PFAS direkt am Ort der Entstehung der reaktiven Spezies das Potenzial fast jeder Methode drastisch erhöhen kann, indem die Konkurrenzreaktionen ausgeblendet werden, die im Allgemeinen die Effizienz der Abbaureaktionen in Frage stellen. So können Prozesse, die prinzipiell ablaufen, ihr volles Potenzial in realen Anwendungen auszuschöpfen. Aber: sie müssen erst einmal prinzipiell ablaufen, hier ist wiederum die Katalysatorforschung gefragt.

Literaturverzeichnis

- [1] Benaafi, M., Bafaqeer, A. (2024). Comprehensive review of global perspectives on per-and polyfluoroalkyl compounds: Occurrence, fate, and remediation in groundwater systems. *Water*, 16(11), 1583.
- [2] Bhatnagar, A., Hogland, W., Marques, M., Sillanpää, M. (2013). An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chem. Eng. J.*, 219, 499-511.
- [3] Saeidi, N., Kopinke, F. D., Georgi, A. (2021). What is specific in adsorption of perfluoroalkyl acids on carbon materials?. *Chemosphere*, 273, 128520.
- [4] Dixit, F., Dutta, R., Barbeau, B., Berube, P., Mohseni, M. (2021). PFAS removal by ion exchange resins: A review. *Chemosphere*, 272, 129777.
- [5] Lee, T., Speth, T. F., Nadagouda, M. N. (2022). High-pressure membrane filtration processes for separation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Chem. Eng. J.*, 431, 134023.
- [6] Cornelsen, M., Weber, R., Panglisch, S. (2021). Minimizing the environmental impact of PFAS by using specialized coagulants for the treatment of PFAS polluted waters and for the decontamination of firefighting equipment. *Emer. Contam.*, 7, 63-76.
- [7] De Darwent, B. B. (1970). Bond dissociation energies in simple molecules. NSRDS-NBS 31.
- [8] Houtz, E. F., Sedlak, D. L. (2012). Oxidative conversion as a means of detecting precursors to perfluoroalkyl acids in urban runoff. *Environ. Sci. Technol.*, 46(17), 9342-9349.
- [9] Ikechukwu A. Ike, Karl G. Linden, John D. Orbell, and Mikel Duke, *Critical review of the science and sustainability of persulphate advanced oxidation processes*. *Chem. Eng. J.*, 2018. **338**: p. 651-669.
- [10] Lutze, H. V., Brekenfeld, J., Naumov, S., von Sonntag, C., & Schmidt, T. C. (2018). Degradation of perfluorinated compounds by sulfate radicals—New mechanistic aspects and economical considerations. *Water Res.*, 129, 509-519.
- [11] Schaefer, C. E., Andaya, C., Burant, A., Condee, C. W., Urriaga, A., Strathmann, T. J., Higgins, C. P. (2017). Electrochemical treatment of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate: Insights into mechanisms and application to groundwater treatment. *Chem. Eng. J.*, 317, 424-432.
- [12] Xu, B., Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Altaee, A., Wu, M., Xu, G. (2017). Photocatalytic removal of perfluoroalkyl substances from water and wastewater: Mechanism, kinetics and controlling factors. *Chemosphere*, 189, 717-729.
- [13] Cui, J., Gao, P., Deng, Y. (2020). Destruction of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) with advanced reduction processes (ARPs): A critical review. *Environ. Sci. Technol.*, 54(7), 3752-3766.
- [14] Zhang, Z., Sarkar, D., Biswas, J. K., Datta, R. (2022). Biodegradation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review. *Bioresour. Technol.*, 344, 126223.

- [15] LaFond, J. A., Hatzinger, P. B., Guelfo, J. L., Millerick, K., & Jackson, W. A. (2023). Bacterial transformation of per-and poly-fluoroalkyl substances: a review for the field of bioremediation. *Environ. Sci. Adv.*, 2(8), 1019-1041.
- [16] Banks, D., Jun, B.-M., Heo, J., Her, N., Park, C.M., Yoon, Y., (2020). Selected advanced water treatment technologies for perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances: A review. *Separ. Pur. Technol.* 231, 115929.
- [17] Balda, M., Mackenzie, K., Woszdlo, S., Uhlig, H., Möllmer, J., Kopinke, F. D., Schüürmann, G., Georgi, A. (2023). Bottom-up synthesis of de-functionalized and dispersible carbon spheres as colloidal adsorbent. *Intern.J. Mol. Sci.*, 24(4), 3831.
- [18] Saeidi, N., Lotteraner, L., Sigmund, G., Hofmann, T., Krauss, M., Mackenzie, K., Georgi, A. (2025). Towards a better understanding of sorption of persistent and mobile contaminants to activated carbon: Applying data analysis techniques with experimental datasets of limited size. *Water Res.*, 274, 123032.
- [19] N. Saeidi, F.-D. Kopinke, A. Georgi (2021). Controlling adsorption of perfluoroalkyl acids on activated carbon felt by means of electrical potentials, *Chem. Eng. J.*, 416, 129070.
- [20] J. Zhou, N. Saeidi, L. Y. Wick, Y. Xie, F.-D. Kopinke, A. Georgi (2022). Efficient removal of trifluoroacetic acid from water using surface-modified activated carbon and electro-assisted desorption, *J. Haz. Mat.*, 436, 129051.
- [21] Saeidi, N., Harnisch, F., Presser, V., Kopinke, F. D., Georgi, A. (2023). Electrosorption of organic compounds: State of the art, challenges, performance, and perspectives. *Chem. Eng. J.*, 471, 144354.
- [22] Georgi, A., Köhler, R., Woszdlo, S., Mackenzie, K., Schierz, A., Schlosser, A., Stanger, H. J. (2023). Fe-Zeolite as on-Site Regenerable Adsorber for Chlorohydrocarbons in Groundwater—from Laboratory to Pilot Test. *Chem. Ing. Tech.*, 95(12), 1999-2007.
- [23] Aumeier, B. M., Georgi, A., Saeidi, N., Sigmund, G. (2023). Is sorption technology fit for the removal of persistent and mobile organic contaminants from water?. *Sci. Tot. Environ.*, 880, 163343.
- [24] Qian, L., Kopinke, F. D., Scherzer, T., Griebel, J., Georgi, A. (2022). Enhanced degradation of perfluorooctanoic acid by heat-activated persulfate in the presence of zeolites. *Chem. Eng. J.*, 429, 132500.
- [25] Qian, L., Kopinke, F. D., Georgi, A. (2020). Photodegradation of perfluorooctanesulfonic acid on Fe-zeolites in water. *Environ. Sci. Technol.*, 55(1), 614-622.
- [26] Sühnholtz, S., Gawel, A., Kopinke, F. D., Mackenzie, K. (2021). Evidence of heterogeneous degradation of PFOA by activated persulfate-FeS as adsorber and activator. *Chem. Eng. J.*, 423, 130102.

Anschriften der Autorinnen

Dr. Katrin Mackenzie

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH Leipzig – UFZ

Leiterin des Departments Technische Biogeochemie, Leiterin der AG „Umweltkatalyse“

Permoserstrasse 15

04318 Leipzig

katrin.mackenzie@ufz.de

+49 341 6025 1760

Dr. Anett Georgi

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH Leipzig – UFZ

Department Technische Biogeochemie, Leiterin der AG „Advanced Adsorption und Oxidation“

Permoserstrasse 15

04318 Leipzig

anett.georgi@ufz.de

+49 341 6025 1405

Dr. Ariette Schierz

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH Leipzig – UFZ

Department Technische Biogeochemie, Leiterin der AG „In-situ-Wasserreinigungstechnologien“

Permoserstrasse 15

04318 Leipzig

ariette.schierz@ufz.de

+49 341 6025 1596

Internet: www.ufz.de, <https://www.ufz.de/index.php?de=34235>, www.ufz.de/pfas

Your global partner in testing



Ihr Kontakt

Sarah Gräber
umweltanalytik@wessling.de

Ihre Expert*innen für die Analytik von PFAS

Am 21.02.2022 veröffentlichte das BMUV einen Leitfaden zur Bewertung der Stoffgruppe PFAS. Dieser enthält Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie zur Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials.

Gemäß der REACH-Verordnung sind zudem für einige als „besonders besorgniserregend“ eingestufte PFAS Untersuchungen gesetzlich vorgeschrieben.

WESSLING, part of ALS Limited, bietet umfangreiche PFAS-Analytik von Trinkwasser, Oberflächenwasser, Abwasser, Grundwasser, Klärschlamm und Bodenmaterial.

Mehr Sicherheit bei der Wiederverwertung von Ersatzbaustoffen

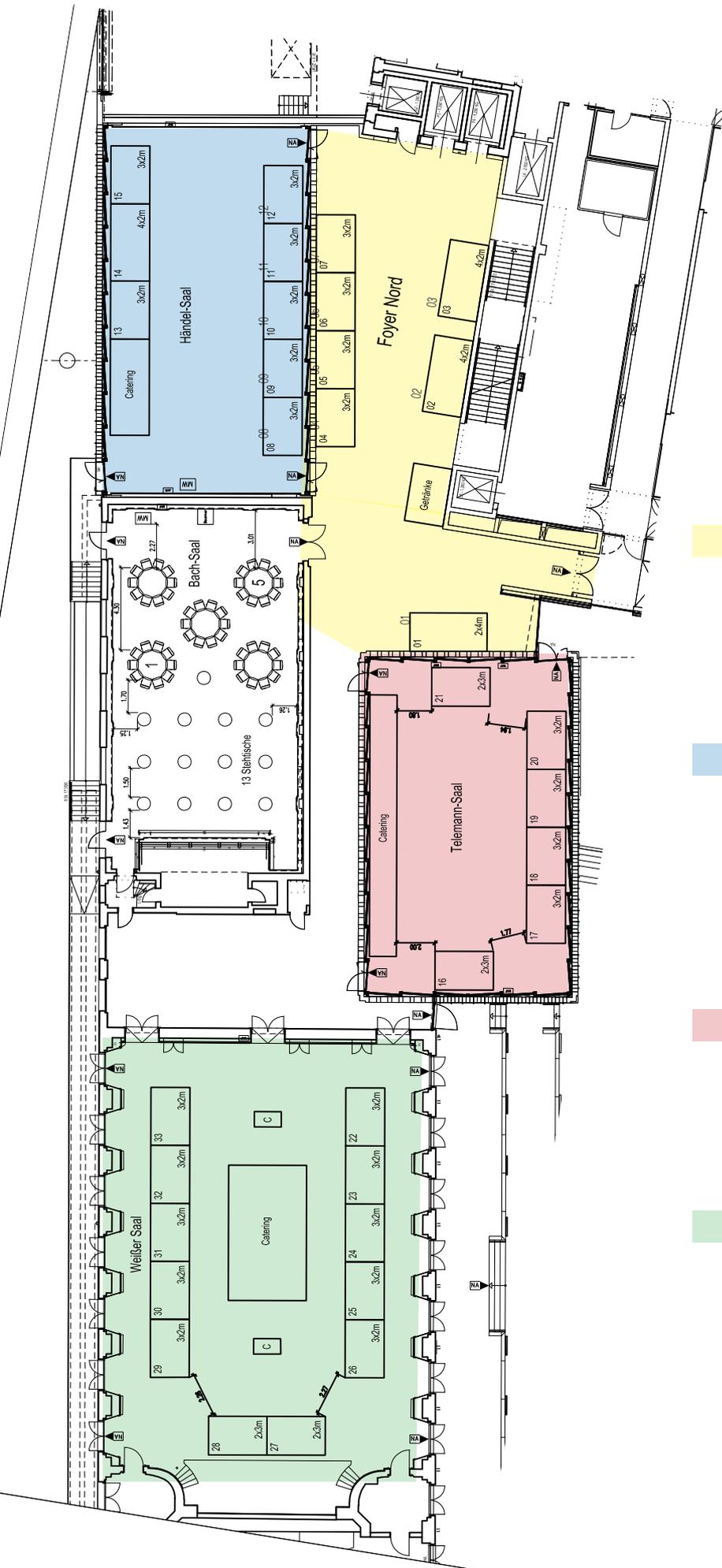
Am 01.08.2023 trat die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) in Kraft, mit dem Ziel, einen bundeseinheitlichen Standard für die Untersuchung sowie die Wiederverwertung von Ersatzbaustoffen festzulegen.

Wir unterstützen unsere Kund*innen mit der Analytik von Recycling-Baustoffen, Baggergut, Bodenmaterial, Gleisschotter und Asche. Die neue Verordnung bringt zudem zahlreiche Veränderungen in Hinblick auf den Eignungsnachweis in der Untersuchungsstelle mit sich. Hierzu beraten wir Sie gerne!



Präzise Werte der Laboranalytik

WESSLING gehört europaweit zu den führenden Unternehmen für Analytik, Prüfung und Beratung. Ganz egal, ob Lebensmittel, Trinkwasser, Reststoffe oder Qualitätskontrollen von Arzneimitteln und Produkten – wir setzen auf modernste Laboranalysemethoden, um u.a. Allergene, Pflanzenschutzmittel, Krankheitserreger oder Dioxine zuverlässig nachzuweisen.



Die Fachausstellung

Stand-Nr.

Foyer Nord:

- 1 Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH
- 2 CDM Smith SE
- 3 Züblin Umwelttechnik GmbH
- 4 Competenza GmbH
- 5 Z-Design Dipl.-Ing. Werner Zyla GmbH
- 6 AGROLAB GmbH
- 7 REGENESIS

Händel-Saal:

- 8 Honold GmbH & Co. KG
- 9 Isodetect GmbH
- 10 eneotech Umwelt GmbH
- 11 UCL Umwelt Control Labor GmbH
- 12 V18 Vereinigung der Sachverständigen und Untersuchungsstellen nach §18 BBodSchG
- 13 Eurofins Umwelt Ost GmbH
- 14 ZECH Umwelt GmbH
- 15 Mineral Waste Manager GmbH

Telemann-Saal:

- 16 reconsite GmbH
- 17 SGS INSTITUT FRESENIUS GmbH
- 18 Solmax Geosynthetics GmbH
- 19 Geiger Umweltsanierung GmbH & Co. KG
- 20 HUESKER Synthetic GmbH
- 21 BAUER Ressourcen GmbH

Weißer Saal:

- 22 Wessling GmbH
- 23 Albemarle Europe srl
- 24 GBA Group Gesellschaft für Bioanalytik mbH
- 25 LBA Luftbildauswertung GmbH
- 26 HPC AG
- 27 Intrapore GmbH
- 28 STRABAG Umwelttechnik GmbH
- 29 Evonik Operations GmbH
- 30 Dr. Born - Dr. Ermel GmbH
- 31 AECOM Deutschland GmbH
- 32 NTP Umwelt
- 33 Cornelsen Umwelttechnologie GmbH

Anschriften der Aussteller und Sponsoren

AAV – Verband für Flächenrecycling und Altlastensanierung

Ruhrhang 2
45525 Hattingen
Tel.: +49 (0)2324 50 94-0
E-Mail: info@aav-nrw.de
www.aav-nrw.de

AECOM Deutschland GmbH

Mainzer Landstr. 181
60327 Frankfurt/Main
Tel.: +49 (0)6102 3050360
E-Mail: frankfurt.europe@aecom.com
www.aecom.com

AGROLAB GmbH

Jenaer Str. 1
84034 Landshut
Tel.: +49 (0)871 973091-0
E-Mail: zentrale@agrolab.de
www.agrolab.com

ahu GmbH

Kirberichshofer Weg 6
52066 Aachen
Tel.: +49 (0)241 90 00 11-0
E-Mail: info@ahu.de
www.ahu.de

Albemarle Europe SRL

Rue du Bosquet 9
1348 Louvain-la-Neuve, Belgien
Tel.: +49 (0)162 2752153
E-Mail: florian.kohl@albemarle.com
www.albemarle.com

avocado rechtsanwälte

Spichernstraße 75-77
50672 Köln
Tel.: +49 (0)221 39071 143
E-Mail: koeln@avocado.de
www.avocado.de

BAUER Resources GmbH

Bereich Bauer Umwelt
Bauer-Str. 1
86529 Schrobenhausen
Tel.: +49 (0)8252 97-3106
E-Mail: BMU.Schrobenhausen@bauer.de
www.bauer.de

Dr. Born - Dr. Ermel GmbH

Finienweg 7
28832 Achim
Tel.: +49 (0)42 02 758 - 809
E-Mail: achim@born-ermel.de
www.born-ermel.de

CDM Smith SE

Am Umweltpark 3-5
44793 Bochum
Tel.: +49 (0)234 687750
E-Mail: bochum@cdmsmith.com
www.cdmsmith.com

Competenza GmbH

Flößaustraße 24a
90763 Fürth
Tel.: 0911 / 548 366-0
E-Mail: info@competenza.com
www.competenza.com

Cornelsen Umwelttechnologie GmbH

Graf-Beust-Allee 33
45141 Essen
Tel.: +49 (0)201-52 037-0
E-Mail: office@cornelsen.group
www.cornelsen.group

eneotech Umwelt GmbH

Inselstr. 9
67065 Ludwigshafen
Tel.: +49 (0)621 657389-0
E-Mail: umwelt@eneotech-umwelt.de
www.eneotech-umwelt.de

Eurofins Umwelt Ost GmbH

Lindenstr. 11
09627 Bobritzsch-Hilbersdorf
Tel.: +49 (0)3731 2076500
E-Mail: umwelt-freiberg@etdach.eurofins.com
www.eurofins-umwelt.de

Evonik Operations GmbH

Rodenbacher Chaussee 4
63457 Hanau
Tel.: +49 (0)6181 5901
E-Mail: remediation@evonik.com
www.evonik.com/remediation

Anschriften der Aussteller und Sponsoren

GBA Gesellschaft für Bioanalytik mbH

Goldtschmidtstr. 5
21073 Hamburg
Tel.: +49 (0)40 797172-0
E-Mail: sales@gba-group.de
www.gba-group.com

Geiger Umweltsanierung GmbH & Co. KG

Wilhelm-Geiger-Straße 1
87561 Oberstdorf
Tel.: +49 (0)8322 18-0
E-Mail:
umweltsanierung@geigergruppe.de
www.geigergruppe.com

HIM GmbH

Bereich Altlastensanierung
-HIM-ASG-
Waldstr. 11
64584 Biebesheim
Tel.: +49 (0)6258 895-3717
E-Mail: asg@him.de
www.him-asg.de

Honold GmbH & Co. KG

Zum Niederhof 27
51588 Nürnbergrecht
Tel.: +49 (0)2291 912 08 91
E-Mail: info@honold-umwelt.de
www.honold-umwelt.de

HPC AG

Nördlinger Str. 16
86655 Harburg
Tel.: +49 (0)9080 999-0
E-Mail: info@hpc.ag
www.hpc.ag

HUESKER Synthetic GmbH

Fabrikstraße 13-15
48712 Gescher
Tel.: +49 (0)2542 27010
E-Mail: info@huesker.de
www.HUESKER.de

INTRAPORE GmbH

Katernberger Str. 107
45327 Essen
Tel.: +49 (0)201 858 958-0
E-Mail: info@intrapore.com
www.intrapore.com

Isodetect GmbH

Deutscher Platz 5 b
04103 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 35535855
E-Mail: fischer@isodetect.de
www.isodetect.de

LBA Luftbildauswertung GmbH

Ludwigstr. 17 B
70176 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 286929-0
E-Mail: info@lba-luftbildauswertung.de
www.lba-luftbildauswertung.de

Mineral Waste Manager GmbH

Lindberghring 1
33142 Büren
Tel.: +49 (0)30 726214930
E-Mail: info@mineral-waste-manager.de
www.mineral-waste-manager.de

Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH

Hans-Böckler-Allee 9
30173 Hannover
Tel.: +49 (0)511 12314 100
E-Mail: hannover@mup-group.com
www.mullundpartner.de

NTP Umwelt

Pliniusstr. 6
48488 Emsbüren
Tel.: +49 (0)5903 6483 000
E-Mail: info@ntp.de
www.ntp.de

Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH

Bemeroder Str. 71
30559 Hannover
Tel.: +49 (0)511 889 223-0
E-Mail: big-h@burmeier-ingenieure.de
www.burmeier-ingenieure.de

reconsite GmbH

Auberlenstraße 13
70736 Fellbach
Tel.: +49 (0)711-410190 0
E-Mail: uwe.hiester@reconsite.com
www.reconsite.com

Anschriften der Aussteller und Sponsoren

REGENESIS

57 Clontarf Road
 D03A7P0 Dublin
 Tel.: +353 (0) 1 853 7384
 Email: europe@regenesi.com
www.regenesi.com

SGS INSTITUT FRESENIUS GmbH

Im Maisel 14
 65232 Taunusstein
 Tel.: 08002225666
 E-Mail: de.sbo.envi@sgs.com
<https://sgs-institut-fresenius.de/>

Solmax Geosynthetics GmbH

Normannenweg 28
 20537 Hamburg
 Tel.: +49 (0)40 76 74 20
 E-Mail: kontakt@solmax.com
www.solmaxgeosynthetics.de

STRABAG Umwelttechnik GmbH

Otto-Schmerbach-Straße 20
 09117 Chemnitz
 Tel.: +49 (0)371 33428-600
 E-Mail: joachim.huebner@strabag.com
www.strabag-umwelttechnik.com

UCL Umwelt Control Labor GmbH

Josef-Rethmann-Straße 5
 44536 Lünen
 Tel.: +49 (0)2306 24090
 E-Mail: info@ucl-labor.de
www.ucl-labor.de

V18 Vereinigung der Sachverständigen und Untersuchungsstellen nach §18 BBodSchG

Blumenstr. 18
 93055 Regensburg
 Tel.: +49 (0)941/20863361
 E-Mail: info@v18-ev.de
www.v18-ev.de

WESSLING part of ALS Limited

Oststr. 7
 48341 Altenberge
 Tel.: +49 (0)2505 890
 E-Mail: info@wessling-ce.de
www.wessling-consulting-engineering.de

Wessling GmbH

Feodor-Lynen-Str. 23
 30625 Hannover
 Tel.: +49 (0)511 54700-37
 E-Mail: sarah.graeber@wessling.de
www.wessling.de

Z-DESIGN

Dipl.-Ing. Werner Zyla GmbH

Henkerberg 20
 88696 Owingen a. Bodensee
 Tel.: +49 (0)7551 9209 11
 E-Mail: info@z-design.de
www.z-design.de

ZECH Umwelt GmbH

Hansator 20
 28217 Bremen
 Tel.: +49 (0)421 41007-0
 E-Mail:
 kontakt@zech-umwelt.com
www.zech-umwelt.com

Züblin Umwelttechnik GmbH

Maulbronner Weg 32
 71706 Markgröningen
 Tel.: +49 (0)7145 9324-257
 E-Mail: umwelttechnik@zueblin.de
www.zueblin-umwelttechnik.com



Bild estrel: Estrel Berlin / Benjamin Jehne

2026

sehen wir uns
in Berlin

15.-17. April 2026

Estrel Berlin