

# **ATLASTEN 2024**

**Aus Altlasten und Schadensfällen lernen –  
von der Altlastensanierung zum vorsorgenden  
Boden- und Grundwasserschutz**

Beiträge zum Seminar - Herausgegeben von

**Egloffstein / Burkhardt / Schumacher**

Im Auftrag der  
Überwachungsgemeinschaft Bauen  
für den Umweltschutz e.V.  
und dem  
Arbeitskreis Grundwasserschutz e.V.

19. und 20. Juni 2024  
IHK Karlsruhe, Haus der Wirtschaft

**ICP**

Eigenverlag Bauen und Umwelt

Band 45

# **ATTLASTEN 2024**

**Aus Altlasten und Schadensfällen lernen –  
von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz**

Th. Egloffstein, G. Burkhardt, K. Schumacher (Hrsg.) und 37 Mitautor\*innen / im Auftrag des  
Arbeitskreises Umweltschutz e.V. und der Überwachungsgemeinschaft Bauen für den Umweltschutz e.V.  
Karlsruhe: ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 45, 166 Seiten, ISBN 978-3-939662-34-1.

Anschrift der Herausgeber:

Prof. Dr. Thomas Egloffstein, Dipl.-Ing. Gerd Burkhardt,  
Dipl.-Ing. Katrin Schumacher  
ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH  
Auf der Breit 11  
D-76227 Karlsruhe  
Tel: +49(0)721/94477-0  
E-Mail: [icp@icp-ing.de](mailto:icp@icp-ing.de), <https://icp-ing.de>

Anschrift des Verlages:

ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt  
Auf der Breit 11  
D-76227 Karlsruhe  
Tel: +49(0)721/94477-0,  
E-Mail: [eigenverlag@icp-ing.de](mailto:eigenverlag@icp-ing.de), <https://icp-ing.de>

**ISBN 978-3-939662-34-1**

Alle Rechte vorbehalten

© ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe 2024

## Vorwort

Das Konzept des Karlsruher Altlastenseminars ist es, jeweils aktuelle Themen aufzugreifen und einen Überblick über den aktuellen Stand in der Altlastenbearbeitung zu geben, sowie neue Entwicklungen, Tendenzen und Trends aufzuzeigen. Wie der Untertitel des Seminars andeutet, versuchen wir einen Bogen aus den Erfahrungen mit Altlasten und Schadensfällen, hin zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz zu schlagen.

Die Mantelverordnung und damit auch u. a. die Novelle der BBodSchV ist seit dem 01.08.2023 in Kraft. Die u. E. wesentlichsten Neuerungen in der BBodSchV sind erstmalig Regelungen zur Verfüllung, die in den §§ 6 und 8 Anforderungen zum Auf- oder Einbringen von Materialien unterhalb oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht festlegt. Wie schon für die vorherige BBodSchV von 1999, bezogen auf den damaligen § 12 der BBodSchV, gibt es von der LABO wieder eine Vollzugshilfe zu §§ 6 – 8 für das Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden.

Es folgen Beiträge zum Umgang mit GFS-Werten für das Grundwasser und den Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser, zu den zu erwartenden Neuerungen einer Novelle des BBodSchG bzw. der Einführung einer EU-Bodenmonitoring-Richtlinie sowie zur Aktualisierung und Zusammenführung der LABO-Arbeitshilfen zur Sickerwasserprognose.

Auch das omnipräsente Thema PFAS wird in vier Beiträgen behandelt: Zu Herkunft und Verbleib in der Umwelt, unter anderem in eigentlich unbelasteten Böden von Bodendauerbeobachtungsflächen in Baden-Württemberg, bei der Sanierung auf einem NATO-Flugplatz und zu den Möglichkeiten und Grenzen einer PFAS-Bodenwäsche.

Die Palette der Themen reicht vom vorsorgenden Bodenschutz durch Bodenschutzkonzepte und einer bodenkundlichen Baubegleitung, über die Wirkung von Mikroplastik in Böden, den Einfluss von innenstadtnahen Konversionsflächen auf das Stadtklima, den Einfluss der Probenahme auf die Ergebnisunsicherheit bis hin zu Nachhaltigkeitsaspekten bei der Boden- und Grundwassersanierung. Es folgen Berichte über Natural Attenuation (NA) und die Stimulation des Bioabbaus bei der Enhanced NA, über die erste Komplettsanierung eines HCH-Produktionsstandortes im Dreiländereck Frankreich-Schweiz-Deutschland, die bergrechtliche Sanierung eines komplexen Grundwasserschadens im Industriepark Schwarze Pumpe, sowie wie über die Sanierung eines Sprengstoffwerkes mittels Constructed Wetlands.

Keine klassischen Altlastenthemen aber in diesem Zusammenhang doch wichtig, sind der Natur und Artenschutz bei Sanierungsmaßnahmen, der Umgang mit Asbest im Stoffkreislauf, Bodenfeuchtemessungen im Rahmen eines Bodenmonitoring-Programms und die Zukunft der Deponie- und Altlastensanierung mittels intelligenter Robotik.

Karlsruhe, Juni 2024

Th. Egloffstein ICP Ingenieurgesellschaft  
G. Burkhardt Prof. Czurda und Partner mbH  
K. Schumacher Auf der Breit 11  
D-76227 Karlsruhe

# Inhalt

# Seite

Die neue LABO Vollzugshilfe zu §§ 6-8 BBodSchV

**Kevin Handke, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Mainz .....1**

Bedeutung und Umgang mit den GFS-Werten für das Grundwasser und  
den Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser

**Jochen Stark, LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe.....7**

Die geplante BBodSchG-Novelle und EU-Bodenmonitoring-Richtlinie -  
Welche Neuerung haben wir zu erwarten?

**Gregor Franßen, EMLE, Franßen und Nusser Rechtsanwälte PartGmbH, Düsseldorf ..... 15**

Aktualisierung und Zusammenführung der LABO-Arbeitshilfen zur  
Sickerwasserprognose

**Volker Zeisberger,  
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden .....21**

PFAS: Herkunft und Verbleib in der Umwelt

**Dr. Michael Reinhard ARCADIS Deutschland GmbH, Karlsruhe.....27**

PFAS in Böden der Bodendauerbeobachtung in Baden-Württemberg

**Ann-Kathrin Seeger, LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe ..... 33**

Sanierung einer Rüstungsalast mittels Constructed Wetland –  
ehemaliges Sprengstoffwerk „Tanne“ im Oberharz

**Annika Peters, Landkreis Goslar, Jörg Uhde, IBAG mbH, Berlin .....41**

Optimierung der Bodenfeuchtemessungen in einem Bodenmonitoring-Programm

**Ramona Schübler, LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe.....57**

Innenstadtnahe Flächenkonversion – Eine Strategie zu besserem  
Stadtklima und Nachhaltigkeit?

**Matthias Wieschemeyer, Martin Groten,  
Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Osnabrück ..... 69**

Die Probenahmeunsicherheit als Teil der Ergebnisunsicherheit

**Dr. Frank Kuchler, Carmen Jaggi, ITVA Berlin .....73**

Ringversuch Probenahme aus nicht begehbaren Schürfen

**Dipl. Geol. Matthias Heinzl, Dr. Felix Geldsetzer,  
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg .....77**

# Inhalt

Seite

Intelligente Robotik für die Deponie- und Altlastensanierung -  
sind autonome Baumaschinen schon reif für den praktischen Einsatz?

**Dr.-Ing. Philipp Woock, Fraunhofer-Institut für Optronik,  
Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB), Karlsruhe.....83**

PFAS–Sanierung auf dem NATO-Flugplatz Wittmundhafen

**Karsten Heine, Niedersächsisches Landesamt für Bau und Liegenschaften,  
Leitstelle des Bundes für Boden- und Grundwasserschutz, Hannover .....91**

Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten bei der Boden- und Grundwassersanie-  
rung: Verhältnismäßigkeit 2.0?

**Albrecht Bakenhus, Kevin Horn, Dr. Patrick Jacobs, Dr. Annika Reetsch,  
TAUW GmbH, Leverkusen.....97**

Vorsorgender Bodenschutz durch Einsatz eines Bodenschutzkonzepts und einer  
bodenkundlichen Baubegleitung

**Dr. Silvia Lazar, Regierungspräsidium Freiburg,  
Julia Eisele, Regierungspräsidium Stuttgart .....103**

Erste Komplettsanierung eines HCH-Produktionsstandorts im Dreiländereck Frankreich  
– Deutschland – Schweiz

**Hans-Ulrich Knehr, Züblin Umwelttechnik GmbH, Markgröningen.....109**

Nachweis, Verbleib und Wirkung von Mikro- und Nanoplastik im Boden

**Martin Hoppe<sup>1</sup>, Karsten Schlich<sup>2</sup>, Axel Lamparter<sup>1</sup>, Georg Scheeder<sup>1</sup>, Kristof Dorau<sup>1</sup>, Jan Köser<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup> Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover  
<sup>2</sup> Fraunhofer IME, Schmallebenberg ..... 119**

Natural Attenuation (NA) und Stimulation des Bioabbaus (ENA) in der Praxis der  
Altlastenbearbeitung

**Axel Müller, Prof. Dr. Andreas Tiehm,  
TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe ..... 129**

Industriepark Schwarze Pumpe - Bergrechtliche Sanierung eines komplexen  
Grundwasserschadens im Prozess des Strukturwandels in der Lausitz

**Ulrike Schöbel, Dr.-Ing. Thomas Daffner, UBV GmbH Senftenberg .....137**

Umgang mit Asbest im Stoffkreislauf – die neue LAGA M23 – Fluch oder Segen?

**Falk Fabian, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg .....149**

PFAS-Bodenwäsche – Möglichkeiten und Grenzen

**Dr. Benjamin Faigle, Bernhard Volz, Züblin Umwelttechnik GmbH, Markgröningen.....161**

## **Autoren/Co-Autoren:**

Albrecht **Bakenhus**, TAUW GmbH, Leverkusen

Dr.-Ing. Thomas **Daffner**, UBV GmbH Senftenberg

Kristof **Dorau**, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Julia **Eisele**, Regierungspräsidium Stuttgart

Falk **Fabian**, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart

Dr. Benjamin **Faigle**, Züblin Umwelttechnik GmbH, Markgröningen

Gregor **Franßen**, EMLE, Franßen und Nusser Rechtsanwälte PartGmbH, Düsseldorf

Dr. Felix **Geldsetzer**, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

Martin **Groten**, Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Osnabrück

Kevin **Handke**, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Mainz 1

Karsten **Heine**, Niedersächsisches Landesamt für Bau und Liegenschaften, Hannover

Dipl. Geol. Matthias **Heinzel**, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

Martin **Hoppe**, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Kevin **Horn**, TAUW GmbH, Leverkusen

Dr. Patrick **Jacobs**, TAUW GmbH, Leverkusen

Carmen **Jaggi**, ITVA Berlin

Hans-Ulrich **Knehr**, Züblin Umwelttechnik GmbH, Markgröningen

Jan **Köser**, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Dr. Frank **Küchler**, ITVA Berlin

Axel **Lamparter**, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Dr. Silvia **Lazar**, Regierungspräsidium Freiburg

Axel **Müller**, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

Annika **Peters**, Landkreis Goslar

Dr. Michael **Reinhard** ARCADIS Deutschland GmbH, Karlsruhe

Dr. Annika **Reetsch**, TAUW GmbH, Leverkusen

Georg **Scheede**, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Dr. Karsten **Schlich**, Fraunhofer IME, Schmallingenberg

Ulrike **Schöbel**, UBV GmbH Senftenberg

Ramona **Schüßler**, LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe

Ann-Kathrin **Seeger**, LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe

Jochen **Stark**, LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe

Prof. Dr. Andreas **Tiehm**, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

Jörg **Uhde**, IBAG mbH, Berlin

Bernhard **Volz**, Züblin Umwelttechnik GmbH, Markgröningen

Matthias **Wieschemeyer**, Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Osnabrück

Dr.-Ing. Philipp **Woock**, Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, Karlsruhe

Volker **Zeisberger**, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

# Die neue LABO Vollzugshilfe zu §§ 6-8 BBodSchV

*Kevin Handke<sup>1</sup>*

## Inhalt

1. Warum war eine Neufassung der Vollzugshilfe notwendig?.....	1
2. Wer ist Adressat der Vollzugshilfe?.....	2
3. Welche Ziele verfolgt die Vollzugshilfe? .....	2
4. Was soll die Vollzugshilfe leisten können? .....	2
5. Gliederung und Aufbau der neuen Vollzugshilfe.....	2
6. Aus dem Inhalt der neuen Vollzugshilfe.....	3
7. Ausblick .....	4
8. Literatur.....	5

## 1. Warum war eine Neufassung der Vollzugshilfe notwendig?

Die LABO Vollzugshilfe (VH) zu § 12 BBodSchV wurde 2002 veröffentlicht. 21 Jahre später folgt die LABO Vollzugshilfe zu §§ 6-8 BBodSchV. Eine Aktualisierung und Neufassung wurde vor allem durch die novellierte Bundes-Bodenschutz und Altlastenverordnung 2021 notwendig. In der aktuellen BBodSchV wurde der Anwendungsbereich um den Bereich „unterhalb/außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht (dwBS)“ konkretisiert bzw. erweitert. Die aktuelle Fassung der BBodSchV enthält die §§ 6-8:

- § 6: Allgemeine Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden
- § 7: Zusätzliche Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in eine durchwurzelbare Bodenschicht
- § 8: Zusätzliche Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien unterhalb oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht

Diese drei Paragraphen (§§ 6-8 BBodSchV) enthalten insgesamt 27 Absätze, die Regelungen der Paragraphen verwenden eine Vielzahl unbestimmter Rechtsbegriffe wie z. B. „am Herkunftsort oder in dessen räumlichen Umfeld“; „vergleichbare Bodenverhältnisse“; „Gebiete oder räumlich abgegrenzte Industriestandorte mit erhöhten Schadstoffgehalten“; „guter Bodenaufbau“ etc.. Um einen einheitlichen Vollzug zu gewährleisten, also, dass „gleiche“ Fragestellungen auch „gleichlautend“ beantwortet werden, war die Neufassung der VH notwendig.

---

<sup>1</sup> Kevin Handke, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Kaiser-Friedrich-Straße 7, 55116 Mainz, Tel.: 06131/60331318, Kevin.Handke@lfu.rlp.de.

## 2. Wer ist Adressat der Vollzugshilfe?

Die für den Vollzug der §§ 6-8 BBodSchV unmittelbar und mittelbar zuständigen Behörden sollen direkt angesprochen werden. Dies sind vorrangig die Bodenschutzbehörden. Zudem ist die VH von Interesse für Landwirtschaftliche Fachbehörden, Forstbehörden, Naturschutzbehörden, Wasserbehörden, Bergbehörden und Baubehörden (siehe § 7 Abs. 6 und § 8 Abs. 5, 6 u. 7 BBodSchV), sowie auch für Vorhabenträger/innen, Ingenieurbüros und jeden, der eine Maßnahme im Zusammenhang mit der Auf- und Einbringung von Material auf oder in den Boden plant, begleitet oder durchführt bzw. durchführen lässt.

## 3. Welche Ziele verfolgt die Vollzugshilfe?

Die VH dient als Unterstützung der einzelfallbezogenen fachlichen Prüfung und Bewertung einer (geplanten) Maßnahme zur Auf- und Einbringung von Materialien auf oder in den Boden. Folgende Fragen sollen durch die VH beantwortet werden:

- Erfüllt(e) die geplante / durchgeführte Maßnahme zur Auf- und Einbringung von Materialien auf oder in den Boden die bodenschutzrechtlichen Anforderungen?
- Ist / war die Maßnahme bodenschutzrechtlich zulässig?

Dazu kann vor allem das Ablaufschema ab der Seite 8 der VH genutzt werden. Es wird empfohlen, mit Schrittfolge 1 anzufangen und die Prüfschritte komplett zu durchlaufen. Ein Quereinstieg ist nicht möglich, da das Auslassen von Prüfschritten zu Fehlbewertungen führen kann.

## 4. Was soll die Vollzugshilfe leisten können?

In erster Linie soll die VH die Prüfung konkreter Anwendungsfälle ermöglichen und beim Vollzug der §§ 6-8 BBodSchV unterstützen. Dabei sollen möglichst alle Fallgestaltungen (durchwurzelbare Bodenschicht oder unterhalb/außerhalb durchwurzelbarer Bodenschicht oder beides) abgebildet werden. Dabei sind folgende Leitfragen wichtig:

- Ist der Anwendungsbereich überhaupt eröffnet?
- Wurden alle notwendigen rechtlichen und fachlichen Regelungen und Anforderungen berücksichtigt?  
Dabei ist wichtig, dass
  - a. möglichst klare / eindeutige Schlussfolgerungen vorgesehen werden (ja/nein-Abfragen/Entscheidungen).
  - b. bei komplexen fachlichen/rechtlichen Fragestellungen die VH im Bedarfsfall dem Anwendenden ergänzende Informationen zur Entscheidungsfindung liefert.

## 5. Gliederung und Aufbau der neuen Vollzugshilfe

Die VH soll für den Anwendenden überschaubar und nachvollziehbar sein. Daher wurde ein Ablaufschema mit „ja/nein-Abfragen“ (siehe Abbildung 1) mit einer Einführung an den Anfang der VH eingefügt, danach folgen ergänzende Erläuterungen zu den rechtlichen Regelungen und Anforderungen. Die ergänzenden Erläuterungen dienen ebenso als Nachschlagewerk für die in den §§ 6-8 BBodSchV beschriebenen Begriffe. Weiterhin sind die Erläuterungen immer in Bezug zu den jeweiligen Paragraphen und Absätzen gesetzt worden. Die Gliederung ist wie folgt:



- I: Einführende Erläuterungen (Veranlassung, Aufbau, Anwendung)
- II: Prüfschema, Ablauf der Einzelfallprüfung einer Maßnahme zur Auf- und Einbringung von mineralischen Materialien auf oder in den Boden)
- III: Textliche Erläuterungen zu den Regelungen der §§ 6-8 BBodSchV (Reihenfolge = Reihenfolge der §§ und Absätze)

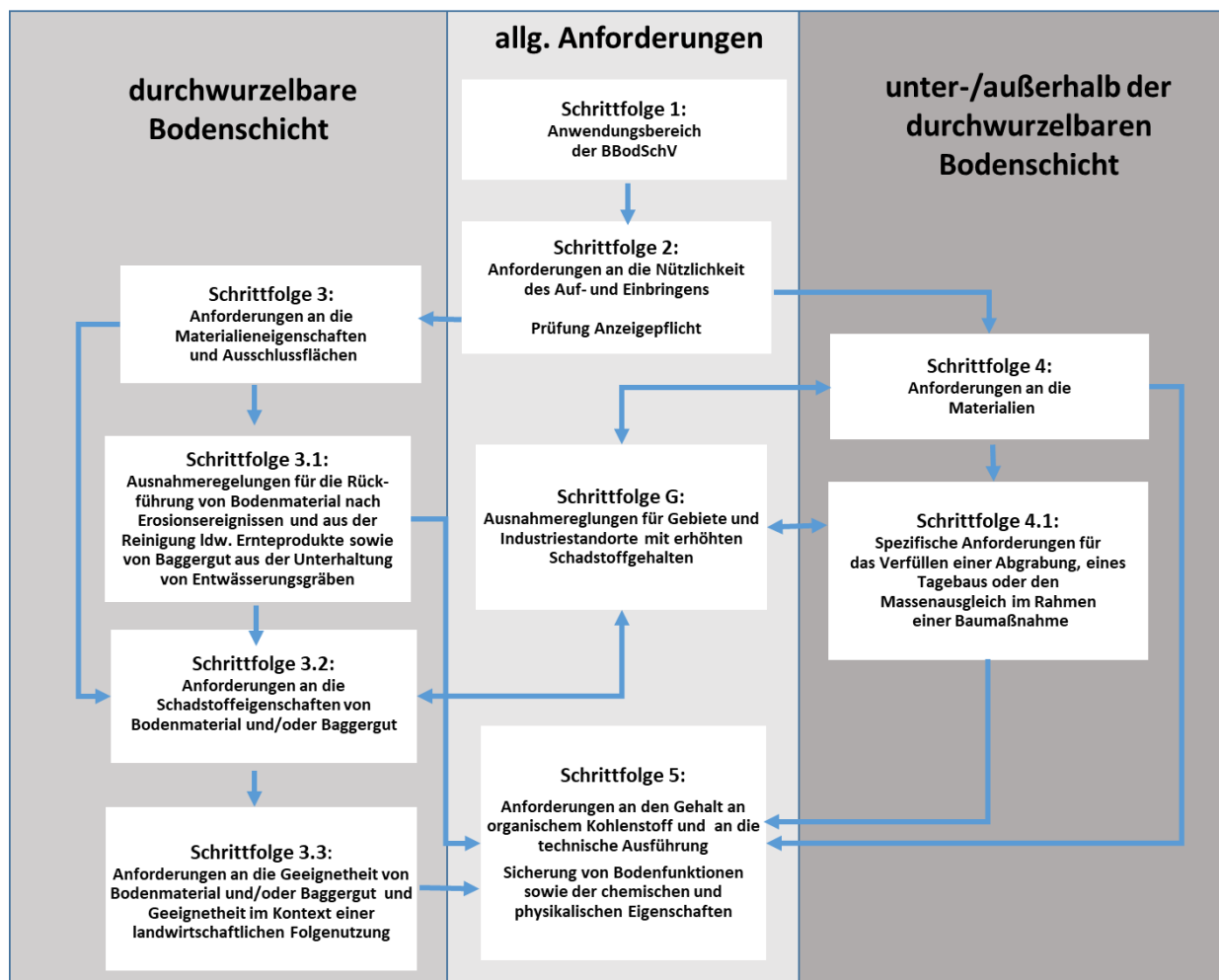
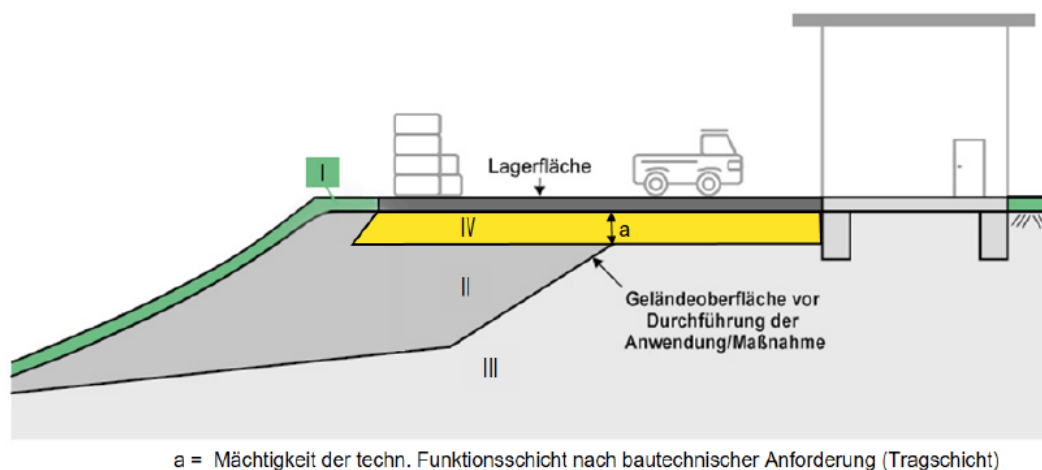


Abbildung 1: Übersicht über das Ablaufschema zu den §§ 6-8 BBodSchV (LABO 2023)

## 6. Aus dem Inhalt der neuen Vollzugshilfe

Durch das Inkrafttreten der Mantelverordnung am 01.08.2023 trat neben der Bundes-Bodenschutz und Altlastenverordnung auch die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) in Kraft. Durch die Harmonisierung im Rahmen der Mantelverordnung enthält die VH Hinweise zur Abgrenzung zwischen technischem Bauwerk (EBV) und bodenähnlicher Anwendung (BBodSchV). Zur Hilfestellung wurden Prinzipskizzen (Beispiel siehe Abbildung 2) in Teil III der VH eingefügt. In Teil III, Kapitel 2.9, ist ebenso die technische Ausführung von Maßnahmen gemäß §§ 6-8 BBodSchV beschreiben. Hier werden die Inhalte der aktuell gültigen „Bodenschutz-DIN-Normen“ (DIN 18915, 19731, 19639) beschrieben, um dem physikalischen Bodenschutz (vgl. § 3 Abs. 1 Nr. 3 BBodSchV) Rechnung tragen zu können. Weiterhin sind im Anhang der VH alle wichtigen Werte aus EBV und BBodSchV in einer Tabelle für den Anwendenden zusammengefügt.

## Geländeauffüllung mit nachträglicher Errichtung eines technischen Bauwerks



Legende:

I	Durchwurzelbare Bodenschicht gemäß den Anforderungen nach §§ 6 und 7 BBodSchV	}	Bodenmaterial / Baggergut mit Einhaltung der Vorsorgewerte nach Anlage 1 Tab. 1 und 2 BBodSchV bzw. BM / BG der Klasse 0 ErsatzbaustoffV
II	Auffüllungen / Aufschüttung mit Material gemäß den Anforderungen nach §§ 6 und 8 BBodSchV: unter- und außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht	}	i.d.R. Bodenmaterial / Baggergut mit Einhaltung der Werte nach Anlage 1 Tab. 1, 2 bzw. 4 BBodSchV oder BM / BG der Klasse 0 bzw. 0* ErsatzbaustoffV
III	Untergrund: anstehender Boden / Gestein		
IV	Funktionsschicht (Tragfähigkeit, Verdichtungsgrad, Frostsicherheit, Drainierung) als Teil des technischen Bauwerks	}	Mineralische Ersatzbaustoffe

Abbildung 2: Prinzipskizze zur Abgrenzung zwischen technischem Bauwerk und bodenähnlicher Anwendung (LABO 2023)

## 7. Ausblick

Anhand von Rückmeldungen aus dem Vollzug soll eine Evaluierung der Vollzugshilfe stattfinden. Anschließend soll eine Überarbeitung und Ergänzung in einer 2. Auflage der Vollzugshilfe erfolgen. Weiterhin ist eine digitale Umsetzung angedacht, um dem Anwendenden noch mehr Möglichkeiten und eine einfachere digital angepasste Anwendung zu ermöglichen.

Ferner hat die LABO Musterformulare erarbeitet, um die in der BBodSchV geforderte Dokumentation der Untersuchungsergebnisse (§ 6 Abs. 7 BBodSchV) und der Anzeigepflicht (§ 6 Abs. 8 BBodSchV) nachzukommen. Die Anwendung in den Bundesländern wird von der LABO empfohlen und diese können im internen Bereich der LABO Homepage heruntergeladen werden. Die Musterformulare können dann an die Anforderungen an die Bundesländer angepasst werden (z. B. mit Fokus auf eine landwirtschaftliche Bodenverbesserung). Rheinland-Pfalz plant eine Einführung von angepassten Formularen per Rundschreiben durch das für den Bodenschutz zuständige Ministerium.

## 8. Literatur

BBodSchV 2021: Bundes-Bodenschutz und Altlastenverordnung, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 43, Bonn

DIN 19731:1998-05: Bodenbeschaffenheit - Verwertung von Bodenmaterial, Beuth Berlin

DIN 18915:2018-06: Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Bodenarbeiten, Beuth Berlin

DIN 19639:2019-09: Bodenschutz bei Planung und Durchführung von Bauvorhaben, Beuth Berlin

LABO 2002: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, Vollzugshilfe zu § 12 BBodSchV, Vollzugshilfe zu den Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden (§ 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung)

[https://www.labo-deutschland.de/documents/12-Vollzugshilfe\\_110902\\_9be.pdf](https://www.labo-deutschland.de/documents/12-Vollzugshilfe_110902_9be.pdf)

LABO 2023: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, Vollzugshilfe zu §§ 6-8 BBodSchV, Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden, Berlin

[https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO-Vollzugshilfe\\_%C2%A7%C2%A7\\_6-8\\_BBodSchV\\_10-08-2023.pdf](https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO-Vollzugshilfe_%C2%A7%C2%A7_6-8_BBodSchV_10-08-2023.pdf)



# **Bedeutung und Umgang mit den GFS-Werten für das Grundwasser und den Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser**

Jochen Stark<sup>1</sup>

## **Inhalt**

1. Einleitung .....	7
2. Anwendungsgrundsätze der LAWA .....	8
3. Bodenschutzrechtliche Prognoseinstrumente zur Gefahrenbeurteilung.....	10
4. Gefahrenbeurteilung im Grundwasser .....	12
5. Unterschied Vor- und Nachsorge .....	13
6. Sanierungsziele .....	13
7. Literatur.....	14

## **1. Einleitung**

Die Mantelverordnung von 2021 mit den Teilen der Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, der Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und der Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, in Kraft getreten am 01.08.2023, wurde gebündelt als Mantelverordnung konzipiert, da es für diese Rechtsbereiche eine entscheidende gemeinsame Stellschraube gibt: Die Festlegung der Auswirkungen auf das Grundwasser mit einem einheitlichen Maßstab. Dieser Maßstab wurde mit dem Papier der LAWA „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser – Aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016“, veröffentlicht im Januar 2017, vorgelegt.

Die Anwendungsbereiche der Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) sind im Wasserrecht, Abfallrecht und Bodenschutzrecht zu finden. Die Nachsorge betrachtet die Gefahrenbeurteilung und Gefahrenabwehr. Die GFS-Werte gelten unmittelbar für das Grundwasser und mittelbar für die Ableitung der Prüfwerte nach BBodSchV. Es ist festzuhalten, dass die Prüfwerte der BBodSchV Emissionswerte des Sickerwassers sind, demgegenüber die GFS-Werte der LAWA Immissionswerte des Grundwassers sind.

---

<sup>1</sup> Jochen Stark, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Griesbachstr. 1, 76185 Karlsruhe, E-Mail: Jochen.Stark@lubw.bwl.de

## **2. Anwendungsgrundsätze der LAWA**

### **2.1 Wasserrecht**

Die wasserrechtliche Beurteilung einer nachteiligen oder schädlichen Veränderung des Gewässers regelt das WHG vom 31.07.2009 in der aktuellen Fassung. Die nachteilige Veränderung des Gewässers bzw. des Grundwassers bestimmt in § 48 Abs. 1 WHG, dass das Einbringen und Einleiten von Stoffen ins Grundwassers nur dann erlaubt werden kann, wenn keine nachteiligen Veränderungen der Wasserbeschaffenheit zu besorgen sind. Als hierfür geeignet angesehener Maßstab, bis zu welchen Stoffkonzentrationen anthropogene, räumlich begrenzte Änderungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers als geringfügig einzustufen sind und ab welcher Konzentration eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit des Grundwassers vorliegt, ist die Geringfügigkeitsschwelle (GFS). Bei einer GFS-Wert-Überschreitung liegt (zunächst) eine nachteilige Veränderung des Grundwassers vor.

Eine schädliche Veränderung des Gewässers bzw. des Grundwassers bedeutet nach § 3 Nr. 10 WHG, dass Veränderungen von Gewässereigenschaften vorliegen, die das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die öffentliche Wasserversorgung beeinträchtigen. Ob und inwieweit schädliche Veränderungen der Eigenschaften des Grundwassers vorliegen, ist einzelfallbezogen zu prüfen und zu beurteilen. Bei signifikanter Überschreitung der GFS-Werte (Konzentration und Volumen im Grundwasser) liegt eine räumlich abgrenzbare schädliche Gewässeränderung vor. Signifikant bedeutet, das Ausmaß der Gewässeränderung mit Raum-Zeit-Messungen im Grundwasser festzustellen.

#### **2.1.1 Vorsorgender Gewässerschutz**

Zur Reinhaltung des Grundwassers sind insbesondere die Anforderungen des § 48 WHG – der Besorgnisgrundsatz – zu beachten. Eine Besorgnis liegt bereits dann vor, wenn eine noch so entfernte Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer nachteiligen Veränderung nach menschlicher Erfahrung gegeben ist. Die Veränderung der Wasserbeschaffenheit ist nachteilig, wenn sie eine nicht nur geringfügige Beeinträchtigung im Vergleich zur natürlichen Grundwasserbeschaffenheit darstellt. Maßstab sind die GFS-Werte der LAWA. Sind die GFS-Werte im GW überschritten, besteht zunächst ein Anhaltspunkt für eine schädliche Gewässeränderung [LAWA 2017, Seite 15].

#### **2.1.2 Nachsorgender Gewässerschutz**

Der Tatbestand einer schädlichen Gewässeränderung im nachsorgenden Gewässerschutz wird in Kap. 3.1.2 im LAWA-Bericht kurz beschrieben. „Zum Eintritt einer schädlichen Gewässeränderung wird auf Kap. 3.3 hingewiesen.“ [LAWA 2017, Seite 17]. In Kap. 3.3 Nr. 5 steht ausführlicher mit dem Hinweis des Vorrangs der Schwellen der gesundheitlichen (humantoxikologischen) und sensorischen Wirkung: „Überschreiten die Stoffkonzentrationen im Grundwasser die Schwellen der gesundheitlichen oder sensorischen Wirkung (I) liegt eine schädliche Gewässeränderung vor.“ [LAWA 2017, Seite 19]. Die gesundheitliche Bewertung erfolgt nach TrinkwV bzw. grundsätzlich nach der Trinkbarkeit des Wassers.

## **2.2 Bodenschutzrecht**

### **2.2.1 Vorsorge – Verwertung von Bodenmaterial**

Die Geringfügigkeitsschwellen bei Eintritt in das Grundwasser sind einzuhalten, um Vorsorge gegen nachteilige Veränderungen sicherzustellen. Werden die GFS-Werte bereits im Sickerwasser (auf der Emissionsseite) beim Übertritt ins Grundwasser unterschritten, kann es im Grundwasser (auf der Immissionsseite) auch keine Überschreitung von GFS-Werten und damit keine Besorgnis einer nachteiligen Veränderung geben. In der Vorsorge gilt das Wertenniveau der GFS für den Ort der Beurteilung (Übergang ungesättigte/gesättigte Zone) als Sicherheitsabstand zu GFS-Werten im Grundwasser.

Werden für Bodenmaterial die Vorsorgewerte der BBodSchV (2021) in Anlage 1 eingehalten, werden neben den Anforderungen des vorsorgenden Bodenschutzes auch die Anforderungen des vorsorgenden Grundwasserschutzes eingehalten. Stofffreisetzungen durch mineralische Ersatzbaustoffe in technischen Bauwerken sowie durch das Einbringen von Material unter- und außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht haben grundsätzlich die GFS-Werte am Ort der Beurteilung einzuhalten.

Die GFS-Werte am Ort der Beurteilung für anorganische Stoffe aus unbelasteten Böden sind eingehalten, wenn das Sickerwasser das natürliche Hintergrundniveau einhält. „Für die Bewertung von Stofffreisetzungen in der ungesättigten Bodenzone gelten die GFS-Werte am Ort der Beurteilung als eingehalten, wenn die Konzentrationen der Schadstoffe im Sickerwasser das natürliche Hintergrundwertenniveau für Stoffe im Sickerwasser nicht überschreiten. Die Konzentration der Stoffe im Sickerwasser wird durch die Untersuchung von Eluaten abgeschätzt.“ [LAWA 2017, Seite 18]. Methodenspezifische wässrige Eluate im Verhältnis W/F 2:1 [L/kg] der 95. Perzentilwerte von anorganischen Stoffen in unbeeinflussten Böden bilden die Hintergrundwerte, die zum Teil deutliche Überschreitungen der GFS-Werte aufweisen. Das ist akzeptabel, da großräumig keine nachteiligen Grundwasserveränderungen aus dem Grundwassermessnetz dieser anorganischen Stoffe festzustellen sind.

### **2.2.2 Nachsorge – Gefahrenbeurteilung und Gefahrenabwehr von Altlasten / SBV**

In Kap. 3.3 Gefahrenbeurteilung und Gefahrenabwehr im Anwendungsbereich des nachsorgenden Bodenschutzes [LAWA 2017] werden fünf Anwendungsgrundsätze bei der Festlegung von Prüfwerten (Verdachtsbewertung) und bei der Frage der schädlichen Gewässeränderung (Gefahrenbewertung) formuliert. Die GFS-Werte sind die fachliche Grundlage und Ausgangspunkt für die Ableitung von Prüfwerten (als Emissionswerte) für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser:

1. Die methodenspezifischen Prüfwerte unter Berücksichtigung des natürlichen Wertenniveaus in 2:1 Bodeneluaten ergeben die Prüfwerte für anorganische Stoffe [ $\mu\text{g/L}$ ] am Ort der Probenahme, siehe Anlage 2 Tabelle 1 BBodSchV (2021)
2. Das Abbau- und Rückhaltevermögen bei der Sickerwasserprognose ist zu berücksichtigen, also die natürliche Schadstoffminderung nach § 17 Abs. 4 BBodSchV (2021)
3. Die Einmischungsprognose in einem begrenzten Grundwasservolumen kann unter geeigneten hydrogeologischen Verhältnissen bis 1 m ins Grundwasser betrachtet werden, siehe Einmischungsprognose nach § 12 Abs. 3, § 13 Abs. 5 und § 14 Abs. 5 BBodSchV (2021). Die Einmischungsprognose als Kann-Regelung wird berechnet, nicht gemessen. Die errechnete Konzentration wird mit den Prüfwerten der BBodSchV verglichen, da es sich um eine bodenschutzrechtliche Prognose handelt und nur für die Nachsorge bzw. Gefahrenabwehr gilt.

4. Die doppelten Basiswerte bei ökotoxikologisch begründeten GFS-Werten werden als ausreichender Abstand zu Hintergrundkonzentrationen im Grundwasser gesehen. Die Eluatwerte der Vorsorgewerte Anl. 1 Tab 4 u. 5 mit Faktor 2 belegt ergibt die Prüfwerte der Anlage 2 Tabelle 1 anorganische Stoffe [ $\mu\text{g/L}$ ] am Ort der Probenahme BBodSchV (2021).
5. Human- oder ökotoxikologisch begründete GFS-Werte gelten in Abhängigkeit, ob das Schutzgut Oberflächengewässer betroffen ist oder nicht, siehe auch Begründung BBodSchV 2021, Seite 313/314 für die Ableitung der Prüfwerte (mit dem Konventionsfaktor 10 auf das ökotoxikologische Kriterium der GFS-Werte) der anorganischen und organischen Stoffe am Ort der Beurteilung, siehe Anlage 2 Tabelle 2 BBodSchV (2021).

### 3. Bodenschutzrechtliche Prognoseinstrumente zur Gefahrenbeurteilung

Bodenschutzrechtliche Prognoseinstrumente hinsichtlich der Gefahrenbeurteilung Wirkungspfad Boden-Grundwasser hinsichtlich eines Grundwasserschadens bzw. einer schädlichen Gewässeränderung sind:

#### 1. Sickerwasserprognose

in § 2 (Nr. 15), § 10 (4), § 12 (3), § 13 (5) und § 14 (1 bis 5) BBodSchV: Prognose, ob nicht nur am Ort der Probenahme (ODP), sondern auch am Ort der Beurteilung (ODB) eine Überschreitung von Prüfwerten (PW) zu erwarten ist.

a)  $C_{\text{ODB}} < \text{PW}$  bedeutet: Der Anfangsverdacht ist ausgeräumt, es ist keine altlastverdächtige Fläche mehr; Bewertung B Ent (Belassen Entsorgungsrelevanz, da PW am ODP überschritten sind) hinsichtlich des Wirkungspfades Boden-Grundwasser.

b)  $C_{\text{ODB}} > \text{PW}$  bedeutet: Es besteht ein hinreichender Verdacht auf eine nachteilige Veränderung des Grundwassers. Es ist weiter zu prüfen!

#### 2. Einmischungsprognose

in § 12 (3), § 13 (5) und § 14 (5) BBodSchV als KANN Regelung: Prognose, ob in einem rechnerisch ermittelten Einmischvolumen eine Überschreitung von Prüfwerten zu erwarten ist.

a)  $C_{\text{mix}} < \text{PW}$  bedeutet: Der hinreichende Verdacht ist ausgeräumt, es ist keine altlastverdächtige Fläche mehr; Bewertung B Ein (Belassen Einmischung, da PW am ODP und ODB überschritten sind) hinsichtlich des Wirkungspfades Boden-Grundwasser.

b)  $C_{\text{mix}} > \text{PW}$  bedeutet: Es besteht ein hinreichender Verdacht auf eine schädliche Veränderung des Grundwassers. Es ist weiter zu prüfen und eine vertiefte Detailuntersuchung mit Bau und Beprobung von Grundwassermessstellen durchzuführen, um im Medium Grundwasser die Schadstoffsituation zu messen und zu beurteilen (Signifikanzprüfung).

Die Einmischungsprognose nach § 12 (3), § 13 (5) und § 14 (5) BBodSchV als KANN-Regelung stellt unter Berücksichtigung der ggfs. tolerablen Frachten ( $C_{\text{Sickerwasserrate}} [\text{g/L}] \times \text{Sickerwasserrate} [\text{L/a}]$ ) eine reine Rechenoperation dar und basiert auf dieser idealisierten Vorstellung, die in der Regel nur im Porengrundwasserleiter anwendbar ist.



Tabelle 1: Anforderungen an den Umgang mit Prüfwerten und GFS-Werte beim Wirkungspfad Boden-Grundwasser

<b>BBodSchV</b>	<b>Anforderungen / Kriterien</b>	<b>Handlungsfolgen</b>	<b>Tools / Anwendungen</b>
OU § 12	<p><b>Prüfwerte am Ort der Probennahme</b> werden überschritten / unterschritten</p> <p><b>Prüfwerte am Ort der Beurteilung</b> werden überschritten / unterschritten</p> <p><b>Einmischungsprognose (KANN-Regelung)</b> ist ein Rechenvorgang (keine Messung im GW!); nur bei Porengrundwasserleitern sinnvoll; In OU sind i.d.R. noch keine ausreichend belastbaren Daten für die Berechnung verfügbar</p> <p>Im Einzelfall sind GW-Messstellen angebracht; Beurteilungsgrundlage sind die <b>GFS-Werte</b></p>	<p>Bei Unterschreiten der <b>Prüfwerte</b> (Ort der Probennahme oder Beurteilung) kein weiterer Handlungsbedarf bzw. keine altlastverdächtige Fläche hinsichtlich des Wirkungspfades Boden-Grundwasser</p> <p>Bei Überschreiten der Prüfwerte am Ort der Probennahme → <b>Sickerwasserprognose</b></p> <p>Bei Überschreiten am Ort der Beurteilung → <b>Einmischungsprognose (1 m)</b> zu empfehlen; bei Einmischungsprognose Heranziehung der Prüfwerte für den Ort der Beurteilung und der Einmischungsprognose; bei Überschreitung ist eine DU erforderlich</p> <p>Bei Überschreiten der <b>GFS-Werte</b> im Grundwasser ist eine DU erforderlich.</p>	<p>Qualitative Bewertung:</p> <p>verbal-argumentative Bewertung, z.B. SIWA-SP</p> <p>Berechnung, ggfs. mit ALTEX-ID</p>
DU § 13	<p><b>Sickerwasserprognose (SOLL-Regelung)</b></p> <p><b>Einmischungsprognose (KANN-Regelung)</b> ist ein Rechenvorgang (keine Messung im GW!); nur bei Porengrundwasserleitern sinnvoll;</p> <p><b>GW-Messstellen (Bau und Beprobung):</b> → Immissionsbetrachtung im direkten Abstrom des Schadensherdes</p> <p>Zusätzlich ist Frachtbetrachtung relevant → Emissionsbetrachtung unter Anwendung der aktuellen <math>E_{max}</math>-Werte</p>	<p>Bei hinreichendem Verdacht → weitergehende Sickerwasserprognose (§ 14)</p> <p>Bei <b>Einmischungsprognose</b> Heranziehung der <b>Prüfwerte</b> für den Ort der Beurteilung; bei Überschreitung vertiefte DU erforderlich bei Unterschreitung Verdacht bzgl. WP Boden-Grundwasser ausgeräumt</p> <p><b>Immissionsbetrachtung:</b> bei Überschreitung der tiefengemittelten (max. 30 m) GFS-Werte - Beachtung der Anwendungsgrundsätze der LAWA</p> <p><b>Emissionsbetrachtung:</b> Bei Überschreitung der aktuellen <math>E_{max}</math>-Werte-GFS oder <math>E_{max}</math>-humatoux SU erforderlich</p> <p>Kein Handlungsbedarf, wenn Immissions- und Emissionsbedingungen eingehalten werden, ansonsten Handlungsbedarf SU</p>	<p>Quantitative Bewertung:</p> <p>ALTEX I D</p> <p>Hydro-geologisches Arbeitsmodell</p> <p>IPV</p> <p>I/E-Calc</p> <p>Rückrechnung aus Abstrom-Messungen im Grundwasser</p>
SU § 16	<p>Entscheidung über <b>Sanierungsbedarf</b> anhand der:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Überschreitung der GFS-Werte unter Beachtung der LAWA-Anwendungsgrundsätze</li> <li>Überschreitung der tiefengemittelten GFS-Werte sowie der <math>E_{max}</math>-Werte, abgeleitet unter Beachtung der LAWA-Anwendungsgrundsätze</li> </ul>	<p>Bei Überschreitung der Beurteilungsmaßstäbe wird auf der <u>Tatbestandsseite</u> ein Grundwasserschaden festgestellt, der grundsätzlich auf der <u>Rechtsfolgenseite</u> einen Sanierungsbedarf auslöst, Prüfung, ob die Sanierung verhältnismäßig ist</p>	
<p><b>Prüfwerte der BBodSchV sind Emissionswerte und gelten für das Sickerwasser und die Einmischungsprognose</b></p> <p><b>GFS-Werte der LAWA sind Immissionswerte und gelten für das Grundwasser</b></p>			
<p><b>Anmerkung:</b> Bei Verwendung der GFS-Werte im Grundwasser zur Beurteilung einer nachteiligen oder schädlichen Gewässeränderung nach wasserrechtlichen Maßstäben wird auf die „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser“ der LAWA (2017), insbesondere auf die Anwendungsgrundsätze in „Kap. 3.1.2 Nachsorgender Gewässerschutz“ in Verbindung der in „Kap 3.3 Gefahrenbeurteilung und Gefahrenabwehr im Anwendungsbereich des Bodenschutzrechts – Nachsorge“ hingewiesen. Weitere Hinweise s.a. LUBW (2024) mit dem LUBW-Tabellenwerk</p>			

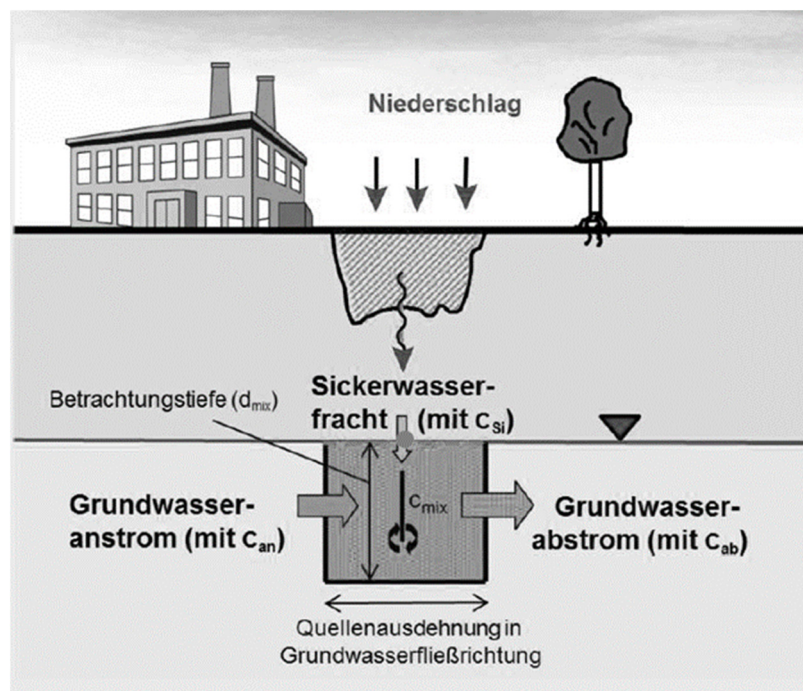


Abbildung 1: Einmischungsprognose („Rührkesselmodell“), Zeddel et al. 2016)

$$c_{\text{mix}} = (c_{\text{sw}} * v_{\text{sw}} * LQ + c_{\text{GW}} * v_{\text{GW}} * d_{\text{mix}}) / (v_{\text{sw}} * LQ + v_{\text{GW}} * d_{\text{mix}})$$

mit  $c_{\text{mix}}$  = mittlere Schadstoffkonzentration im virtuellen GW-Volumen [g/L]

$c_{\text{sw}}$  = mittlere Schadstoffkonzentration im Sickerwasser [g/L]

$v_{\text{sw}}$  = Sickerwasserrate [m/a]

$c_{\text{GW}}$  = mittlere Schadstoffkonzentration im Grundwasser [g/L]

$v_{\text{GW}}$  = Filtergeschwindigkeit des Grundwassers (nach Darcy) [m/a]

$LQ$  = Länge der Schadstoffquelle zur Fließrichtung im GW [m]

$d_{\text{mix}}$  = Mächtigkeit des virtuellen Grundwasservolumens per Konvention = 1 [m]

#### 4. Gefahrenbeurteilung im Grundwasser

Die einzelfallbezogene Beurteilung im Grundwasser gemäß den Anwendungsgrundsätzen der LAWA im GFS-Papier 2017 (Nachsorge, Seite 19) unterscheidet, ob Einwirkungen auf Oberflächengewässer bestehen oder nicht. Die schädliche Ökotox-Wirkung von belastetem Grundwasser auf Oberflächengewässer durch die Altlast bzw. SBV hinsichtlich tolerabler Konzentrationen und Frachten im Grundwasser ist einzelfallbezogen zu ermitteln, d.h. kann nicht pauschal in Listen festgelegt werden.

1. Zur einzelfallbezogenen Beurteilung im Grundwasser selbst, d.h. ohne Einwirkungen auf Oberflächengewässer oder grundwasserabhängige Landökosysteme werden nur die Humantox-Werte betrachtet. Aus den Datenblättern der LAWA (2017) können diese entnommen werden. Eine Überschreitung des Humantox-Werts bewirkt grundsätzlich eine schädliche Veränderung des Grundwassers hinsichtlich der Trinkbarkeit des Grundwassers.
2. Zur einzelfallbezogenen Beurteilung im Grundwasser mit Einwirkungen auf Oberflächengewässer oder grundwasserabhängige Landökosysteme werden die Humantox-Werte sowie die 10-fachen Ökotox-Werte betrachtet. Aus den Datenblättern der LAWA (2017)

können diese entnommen werden [LUBW 2024]. Liegt das Mischungsverhältnis MNQ (Mittlerer Niedrigwasserabfluss in L/s) des Fließgewässers zum belasteten Grundwasserabfluss gerade bei 10:1, bedeutet eine Überschreitung von 10xÖkotox-Wert grundsätzlich eine schädliche Veränderung des Grundwassers für Einwirkungen im Oberflächengewässer.

Damit eröffnen sich Beurteilungsspielräume für die Gefahrenbeurteilung des Grundwassers. Ist kein Oberflächengewässer betroffen, können statt der ggfs. strengeren GFS-Werte die Humatox-Werte aus Anhang 3 der GFS-Werte [LAWA 2017] verwendet werden [LUBW (2024)].

## **5. Unterschied Vor- und Nachsorge**

Wie unterscheidet sich der Besorgnisgrundsatz der Vorsorge von der Gefahrenbeurteilung der Nachsorge? Die nachteilige Veränderung des Grundwassers ist dann nicht zu besorgen, wenn diese durch ein Vorhaben hinreichend unwahrscheinlich ist. Dagegen ist Voraussetzung für die Feststellung einer Gefahr für das Grundwasser durch eine Altlast oder SBV (und damit die Inanspruchnahme eines Pflichtigen), wenn diese Gefahr bei ungehindertem Geschehensablauf in absehbarer Zeit hinreichend wahrscheinlich für eine schädliche Veränderung des Grundwassers ist. Somit zeigen sich elementare unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsszenarien der Vor- und Nachsorge. Vorsorge wird immer durch ausreichende Sicherheitsabstände zum Schaden realisiert, ausgedrückt durch eben die genannten Wahrscheinlichkeiten, ob es zu dem Ereignis kommen kann oder nicht. [Stark, J., Hillmert, C. 2024]

## **6. Sanierungsziele**

Das LAWA-Papier GFS-Werte (2017) weist hinsichtlich der Ermittlung von Sanierungszielen darauf hin, dass gemäß § 4 Abs. 4 BBodSchG die bei der Sanierung von Gewässern zu erfüllenden Anforderungen sich nach dem Wasserrecht bestimmen. Die Geringfügigkeitsschwellen der LAWA (2017), die zunächst nur eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit indizieren, sind nicht unmittelbar als Sanierungsziele für das Grundwasser heranzuziehen. Sanierungsziele sind stets einzelfallbezogen festzulegen. Sanierungsziele heben nicht nur auf Konzentrationen ab, sondern müssen weitere Bewertungskriterien wie Immissionsbegrenzung und Emissionsbegrenzung (Fracht im Grundwasser, LUBW 2023) berücksichtigen sowie dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit folgen.

In Baden-Württemberg werden nach einer Detailuntersuchung die  $E_{\max}$ -Werte im Zusammenhang mit den ermessensleitenden Regelungen gemäß § 15 Abs. 8 BBodSchV (2021) für die Prüfung der Sanierungsnotwendigkeit und Sanierungszielfestlegung angewendet. Die  $E_{\max}$ -Werte [g/d] berechnen sich aus einem nicht vorbelasteten Grundwasservolumenstrom von 25 l/s multipliziert mit dem jeweiligen GFS-Wert [ $\mu\text{g/L}$ ] (direkter Umrechnungsfaktor 0,0864; die 25 L/s leiten sich aus der mittleren Förderrate eines mittelgroßen Wasserwerks in Baden-Württemberg ab). Seit 01.08.2023 sind die neu berechneten  $E_{\max}$ -Werte zu verwenden [LUBW 2023]. Zur einzelfallbezogenen Beurteilung im Grundwasser ohne Einwirkungen auf Oberflächengewässer oder grundwasserabhängige Landökosysteme werden ausschließlich die Humantox-Werte betrachtet. Eine Überschreitung des Humantox-Werts bewirkt grundsätzlich eine schädliche Veränderung des Grundwassers hinsichtlich der Trinkbarkeit des Grundwassers. Die mit den GFS-Werten neu hergeleiteten  $E_{\max}$ -Werte ( $E_{\max}$ -GFS) [LUBW 2023, Anhang II a] sowie die zusätzlich berechneten Werte  $E_{\max}$ -humantox, bezogen auf Werte, die sich auf Grundlage der gesundheitlichen/ästhetischen bzw. Humantox-Wirkung errechnen, sind in einem übersichtlichen LUBW-Tabellenwerk veröffentlicht [LUBW 2024, Anhang II b].

## 7. Literatur

- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz) vom 17. März 1998 (BGBl. I Nr. 16 S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306).
- BBodSchV (2021): Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I Teil Nr. 43 S. 2598 und insbes. ab S. 2716).
- BR Drucksache (11.06.21 494/21) Verordnung der Bundesregierung; Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung; Begründung Allgemeiner Teil ab Seite 193 und Besonderer Teil BBodSchV (2021) ab Seite 273.
- LAWA (2006) Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffen.
- LAWA (2017): Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser – Aktualisierte und überarbeitete Fassung von 2016. Homepage der LAWA mit den Anhängen 1 und 2 sowie die Druckversion mit Anhang 3 (Datenblätter), Kulturbuch-Verlag, Berlin.
- LUBW (1997): Statusbericht Altlasten – 10 Jahre Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg (Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bd. 27).
- LUBW (2008): Untersuchungsstrategie Grundwasser – Leitfaden zur Untersuchung bei belasteten Standorten (Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bd. 42).
- LUBW (2018): Bodenschutzrecht. Handreichung für die Verwaltung.
- LUBW (2022): Sanierungsuntersuchung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen, Leitfaden zur Untersuchung von Sanierungsverfahren, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg.
- LUBW (2023) Altlastenstatistik 2022 – Zahlen und Fakten zum Stand der Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg.
- LUBW (2023) Austauschblätter Anhang II a mit Neuberechnung  $E_{\max}$ -Werte (Stand April 2024) in LUBW Leitfaden Untersuchungsstrategie Grundwasser (2008), LUBW-Homepage Publikationen.
- LUBW (2024) Austauschblätter Anhang II b mit LUBW-Tabellenwerk der Bausteine der GFS-Werte,  $E_{\max}$ -Werte (GFS und humantox) und Grenzwerte der TrinkwV 2023 (Stand April 2024) in LUBW Leitfaden Untersuchungsstrategie Grundwasser (2008), LUBW-Homepage Publikationen.
- OGewV (2016): Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist".
- Ruf, J. (1998): Baden-Württemberg: Fortschreibung der Verwaltungsvorschrift über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen; Altlasten Spektrum, 1998, S 158 - 160.
- Stark, J., Hillmert, C. (2024): GFS-Werte der LAWA für das Grundwasser und Auswirkungen auf die neuen Prüfwerte der BBodSchV. Altlasten Spektrum 1/2024, S. 5 - 15, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- UBA (2020): Heft 151 Anwendungsgrundsätze für Geringfügigkeitsschwellen zum Schutz des Grundwassers (GFS Werte) am Beispiel der Niederschlagswasserversickerung.
- WHG (2009): Wasserhaushaltsgesetz (Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts), Artikel 1 des Gesetzes vom 31.07.2009 (BGBl. I S. 2585), in Kraft getreten am 07.08.2009 bzw. 01.03.2010, das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 3. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 176) geändert worden ist".
- Zeddel, A., Quadflieg, A., Utermann, J., Wilhelm, F. (2016): Grundsätze für die Anwendung der aktualisierten Geringfügigkeitsschwellen der LAWA von 2015 in der Altlastenbearbeitung, Altlasten Spektrum 2/2016, S. 56 - 63.

# Die geplante BBodSchG-Novelle und EU-Bodenüberwachungs-Richtlinie – Welche Neuerung haben wir zu erwarten?

Rechtsanwalt Gregor Franßen<sup>1</sup>, EMLE

## Inhalt

1. Eckpunkte für eine Novelle des BBodSchG – Wesentliche Kritikpunkte .....	15
2. Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Bodenüberwachung und -resilienz – Wesentliche Inhalte .....	16
2.1 Überwachung und Bewertung .....	16
2.2 Nachhaltige Bodenbewirtschaftung .....	17
2.3 Kontaminierte Standorte .....	18

## 1. Eckpunkte für eine Novelle des BBodSchG – Wesentliche Kritikpunkte

Für die von dem Bundesumweltministerium geplante Novelle<sup>2</sup> des Bundes-Bodenschutzgesetzes ((BBodSchG)) fehlt es an der erforderlichen Empirie-basierten Analyse und Bewertung der bestehenden Rechtslage nach der gegenwärtig geltenden Fassung des BBodSchG.

Bei der geplanten Erweiterung des Anwendungsbereichs des BBodSchG durch Streichung der Subsidiaritätsregelung des § 3 Abs. 1 BBodSchG sollte man große Vorsicht walten lassen. Die Rechtsfolgen sollten genauer analysiert und bedacht werden. Es droht, dass jedes Boden in Anspruch nehmende Vorhaben pauschal grundsätzlich unzulässig wird. Wenn an dem Vorhaben festgehalten werden sollte, sollten gleichzeitig geeignete Regelungen zur Zulässigkeit von Vorhaben ergänzt werden.

Wenn der geplante bodenschutzrechtliche Genehmigungsvorbehalt regelmäßig durch andere Genehmigungen und Zulassung konzentriert wird, dann bestehen ernsthafte Zweifel an der Sinnhaftigkeit eines solchen Genehmigungsvorbehalts.

Anstelle des Ziels, die Entsiegelung von versiegelten Flächen zu regulieren, sollte eine Novelle des BBodSchG vorrangig das Ziel verfolgen, die weitere Versiegelung unversiegelter Flächen zu verringern, insbesondere durch Instrumente des Flächenrecyclings.

Der Gesetzgeber sollte die Auswirkungen der geplanten Novelle des BBodSchG auf die Dauer der Genehmigungs- und Zulassungsverfahren für die betroffenen Vorhaben genau abschätzen und berücksichtigen. Auch die Vereinbarkeit mit dem grundsätzlich angestrebten Bürokratieabbau ist zu prüfen.

---

<sup>1</sup> Franßen & Nusser Rechtsanwälte PartGmbH, Hans-Böckler-Straße 1, 40476 Düsseldorf

<sup>2</sup> Vgl. Bundesministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, „Eckpunkte für eine Novelle des nationalen Bodenschutzrechts – Perspektiven und Änderungsbedarfe“ v. 01.03.2022

Der Gesetzgeber sollte prüfen, ob die zuständigen Bodenschutzbehörden für die auf sie zukommenden zusätzlichen Aufgaben absehbar mit ausreichend Personal ausgestattet werden können.

Schließlich sollte der Ausgang des zeitgleich vom europäischen Gesetzgeber begonnenen Gesetzgebungsverfahrens für eine Richtlinie über Bodenüberwachung und -resilienz (vgl. dazu 2.) abgewartet werden, um dann vor dem Hintergrund eines unionsrechtlichen Bodenschutzrechts zu entscheiden, ob und inwieweit das deutsche Bodenschutzrecht jenseits der Umsetzung der unionsrechtlichen Maßgaben weitergehend novelliert werden soll.

## **2. Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Bodenüberwachung und -resilienz – Wesentliche Inhalte**

Ziel der geplanten Richtlinie<sup>3</sup> soll es sein, einen eindeutigen, robusten, kohärenten und flexiblen Rahmen zur Bodenüberwachung und -bewertung für alle Böden in der gesamten EU zu schaffen, um so die Bodengesundheit in der Union kontinuierlich zu verbessern. Dadurch sollen bis 2050 gesunde Böden erreicht und ein gesunder Zustand der Böden aufrechterhalten und eine Verschlechterung vermieden werden, sodass die Böden vielfältige Ökosystemleistungen in einem Umfang erbringen können, der den ökologischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bedürfnissen gerecht wird, sowie die Auswirkungen des Klimawandels und des Verlusts an biologischer Vielfalt verhindern und abmildern und die Widerstandsfähigkeit gegen Naturkatastrophen und die Ernährungssicherheit erhöhen können. Zudem soll die Bodenkontamination auf ein Niveau reduziert werden, das nicht mehr als schädlich für die menschliche Gesundheit und die Umwelt gilt. Mit dieser Richtlinie soll daher ein Rahmen geschaffen werden, innerhalb dessen die Mitgliedstaaten Maßnahmen ergreifen müssen, die technisch machbar sind und auf einer Kosten-Nutzen-Analyse beruhen, damit bis 2050 gesunde Böden erreicht werden.

Diese Richtlinie soll Maßnahmen in folgenden Bereichen enthalten:

- a. Überwachung, Aufrechterhaltung, Verbesserung, Wiederherstellung und Bewertung der Bodengesundheit auf der Grundlage des ökologischen Zustands des Bodens;
- b. nachhaltige Bodenbewirtschaftung;
- c. kontaminierte Standorte.

### **2.1 Überwachung und Bewertung**

Die Mitgliedstaaten sollen in Absprache mit den lokalen, regionalen und regionenübergreifenden Behörden Bodenbezirke abgrenzen, die sich gegebenenfalls auf bestehende Verwaltungseinheiten in ihrem Hoheitsgebiet und in grenzüberschreitenden Gebieten mit benachbarten Mitgliedstaaten stützen. Auf der Grundlage dieser abgegrenzten Bodenbezirke sollen die Mitgliedstaaten einen Überwachungsrahmen einrichten, um sicherzustellen, dass die Bodengesundheit nach weiteren Maßgaben (Anhänge I und II) regelmäßig und genau überwacht wird, und sie sollen den in der Wasser-Rahmenrichtlinie 2000/60/EG

---

<sup>3</sup> Vgl. ordentliches Gesetzgebungsverfahren 2023/0232(COD): Vorschlag der EU-Kommission für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Bodenüberwachung und -resilienz (Bodenüberwachungsgesetz) v. 5.7.2023, COM(2023) 416 final; Legislative Entschließung des Europäischen Parlaments vom 10. April 2024, P9\_TA(2024)0204. Dem vorliegenden Beitrag liegt die Textfassung der legislativen Entschließung des Europäischen Parlaments zugrunde.

festgelegten Bewertungsansatz ergänzen. Dabei sollen die Mitgliedstaaten Bodengesundheit und Flächenverbrauch in jedem Bodenbezirk überwachen. Die Überwachung soll sich u.a. auf Bodendescriptoren und Bodengesundheitskriterien, Bodenprobenahmestellen und -tiefen sowie Indikatoren für Flächenverbrauch und Bodenversiegelung stützen. Auf Grundlage der Daten, die im Zusammenhang mit der Überwachung für jeden Bodendescriptoren erhoben worden sind, sollen die Mitgliedstaaten unter Berücksichtigung der historischen und natürlichen Gegebenheiten des Bodens die Bodengesundheit in all ihren Bodenbezirken bewerten. Böden sollen als gesund gelten, wenn sie entweder in guten oder sehr guten ökologischen Zustand eingestuft werden. Auf der Grundlage der Bewertung der Bodengesundheit soll die zuständige Behörde für jeden Bodenbezirk die Flächen ermitteln, die sich nicht in sehr gutem oder gutem ökologischem Zustand befinden, und die Öffentlichkeit darüber informieren.

## 2.2 Nachhaltige Bodenbewirtschaftung

Die EU-Kommission soll ein kostenlos, öffentlich und digital zugängliches Instrumentarium für nachhaltige Bodenbewirtschaftung einrichten, das den Bodenbewirtschaftern praktische Informationen über die Anwendung von Methoden der nachhaltigen Bodenbewirtschaftung an die Hand gibt und von den Mitgliedstaaten bereitgestellte Informationen umfasst. Das Instrumentarium soll umfassen:

- Empfehlungen und Beispiele für bewährte Verfahren sowie Informationen über die Auswirkungen solcher Methoden auf verschiedene Ökosystemleistungen und Gefährdungen für den Boden,
- kontextspezifischen Informationen über Kombinationen von Bodenart, Landnutzung und klimatischen Bedingungen,
- neue Fachkenntnisse aus Forschung und Innovation, einschließlich der Mission „Ein Boden-Deal für Europa“ im Rahmen von Horizont Europa,
- sonstige relevante Informationen, die von der Kommission erhoben oder der Kommission von den Mitgliedstaaten zur Verfügung gestellt werden.

Bei Flächenverbrauch sollen die Mitgliedstaaten unter Berücksichtigung lokaler Besonderheiten und sozioökonomischer Auswirkungen die folgenden Maßnahmen prüfen:

- Vermeidung des Verlusts der Fähigkeit des Bodens, zahlreiche Ökosystemleistungen und andere Leistungen wie unter anderem die Landwirtschaft, die Erzeugung von Nahrungsmitteln und nachhaltige Forstwirtschaft zu erbringen, oder dessen Verringerung auf das geringste technisch, sozial und wirtschaftlich mögliche Maß, unter Anwendung folgender Mittel:
  - weitestgehende Verringerung der vom Flächenverbrauch betroffenen Fläche;
  - Priorisierung von Gebieten, in denen der Verlust von Ökosystemleistungen möglichst gering gehalten würde;
  - Durchführung des Flächenverbrauchs auf eine Art und Weise, die mit der nachhaltigen Entwicklung im Einklang steht, einschließlich der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, der biologischen Vielfalt und der Wasserdurchlässigkeit, -filtration und -rückhaltung, soweit möglich;
- sofern möglich, weitestgehende Kompensierung des Verlusts der Fähigkeit des Bodens, zahlreiche Ökosystemleistungen zu erbringen; eine solche Kompensierung kann gegebenenfalls in aggregierter Form oder grenzüberschreitend zwischen Mitgliedstaaten erfolgen, wenn der Bodenbezirk die gleichen Merkmale aufweist wie ein angrenzender Bodenbezirk in einem benachbarten Mitgliedstaat oder ein grenzüberschreitender Bodenbezirk;

- Annahme von Maßnahmen zur Gewährleistung einer gerechten Kompensation der Grundeigentümer im Falle des Flächenverbrauchs;
- Einführung von Maßnahmen zur Verhinderung oder Begrenzung des Flächenverbrauchs, einschließlich der Kartierung aufgegebener Brachflächen und Industriestandorte und einschließlich
- Anreizen für die Wiederherstellung und Wiederverwendung aufgegebener Flächen mit versiegelten Böden.

### 2.3 Kontaminierte Standorte

Die Mitgliedstaaten sollen die Risiken potenziell und tatsächlich kontaminierter Standorte für die Gesundheit von Mensch und Tier und die Umwelt beherrschen und reduzieren und diese Risiken unter Berücksichtigung der beabsichtigten Funktion des Bodens auf ein annehmbares Maß senken, wobei sie die ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen der Bodenkontamination und der getroffenen Maßnahmen zur Risikominderung berücksichtigen sollen.

Innerhalb von 4 Jahre nach Inkrafttreten der Richtlinie sollen die Mitgliedstaaten einen risikobasierten Ansatz für die Ermittlung und die Untersuchung von sowie für den Umgang mit potenziell kontaminierten Standorten einführen.

„Potenziell kontaminierte Standorte“ sind die Standorte, bei denen nach systematischer und aktiver Ermittlung der Mitgliedstaaten aufgrund von Nachweisen, die mit allen angemessenen Mitteln, einschließlich Bürgerbeiträgen und festgelegten Verfahren, gesammelt wurden, der Verdacht einer Bodenkontamination besteht. Ergeben die Nachweise eine weit verbreitete Bodenkontamination oder eine Exposition gegenüber dem betreffenden Stoff oder Gemisch über den Boden, soll die zuständige Behörde ein Verfahren für das Risikomanagement einleiten. Ergeben die Nachweise, dass keine ausreichenden Informationen über das für die Gesundheit oder die Umwelt entstandene Risiko vorliegen, das von einem im Boden vorhandenen gefährlichen Stoff oder Gemisch ausgeht, soll die zuständige Behörde weitere Untersuchungen anstellen, um bei Bedarf Maßnahmen zum Risikomanagement im Einklang mit dem Vorsorgeprinzip zu ergreifen. Dabei bleibt allerdings unklar – und lässt dementsprechend große Spielräume für die Mitgliedstaaten –, was genau eine „weite Verbreitung“ einer Bodenkontamination, eine „Exposition“ und ein „Verfahren für das Risikomanagement“ sein soll.

Die Mitgliedstaaten sollen sicherstellen, dass für alle ermittelten potenziell kontaminierten Standorte entsprechend der Rangfolge ihrer Priorität eine Bodenuntersuchung durchgeführt wird. Die Mitgliedstaaten Vorschriften für Frist, Gegenstand, Form und Priorisierung der Bodenuntersuchungen erlassen und dabei ökologische, soziale und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigen. Potenziell kontaminierte Standorte in Gebieten, die für die Entnahme von Wasser für den menschlichen Gebrauch genutzt werden, sind bei der Bodenuntersuchung vorrangig zu berücksichtigen.

Die Mitgliedstaaten sollen bei der Risikobewertung und beim Umgang mit kontaminierten Standorten wie folgt vorgehen:

- Die Mitgliedstaaten sollen die spezifische Methode für die Ermittlung der standortspezifischen Risiken kontaminierter Standorte festlegen (vgl. dazu auch Anhang VI).
- Für jeden ermittelten kontaminierten Standort soll die zuständige Behörde eine standortspezifische Bewertung der derzeitigen und geplanten Landnutzung durchführen, um zu ermitteln, ob von dem kontaminierten Standort unannehmbare Risiken für die Gesundheit von Mensch und Tier oder die Umwelt ausgehen.



- Die Mitgliedstaaten sollen festlegen, welche kontaminierten Standorte ein unannehmbares Risiko für die Gesundheit von Mensch und Tier und die Umwelt darstellen und dabei derzeitige wissenschaftliche Erkenntnisse, die Stellungnahme von Angehörigen der Gesundheitsberufe und von Gesundheitsbehörden, das Vorsorgeprinzip, lokale Besonderheiten sowie die gegenwärtige und künftige Landnutzung berücksichtigen. Dabei können sie ggf. Bewertungen nach der IED<sup>4</sup>, der UVP-Richtlinie<sup>5</sup> und der Seveso-III-Richtlinie<sup>6</sup> als ausreichend ansehen.
- Auf der Grundlage der Bewertung soll die zuständige Behörde sicherstellen, dass die erforderlichen Maßnahmen ergriffen werden (vgl. Anhang V), um die Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt auf ein annehmbares Maß zu reduzieren („Maßnahmen zur Risikominderung“). Bei der Entscheidung über geeignete Maßnahmen zur Risikominderung soll die zuständige Behörde deren Kosten, Nutzen, Wirksamkeit, Dauerhaftigkeit und technische Durchführbarkeit auf kurze und lange Sicht berücksichtigen. Der Kommission soll durch delegierte Rechtsakte zulässige Höchstwerte in Bezug auf die Definition eines unannehmbaren Risikos für die menschliche Gesundheit und die Umwelt, das von kontaminierten Standorten ausgeht, festlegen können.
- Innerhalb von 4 Jahren nach Inkrafttreten der Richtlinie sollen die Mitgliedstaaten ein Register der tatsächlich und potenziell kontaminierten Standorte erstellen.

---

<sup>4</sup> Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen, ABl. EU Nr. L 334 vom 17.12.2010, S. 17.

<sup>5</sup> Richtlinie 2011/92/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten, ABl. EU Nr. L 26 vom 28.1.2012, S. 1, geändert durch die Richtlinie 2014/52/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014, ABl. EU Nr. L 124 vom 25.4.2014, S. 1.

<sup>6</sup> Richtlinie 2012/18/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen, zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinie 96/82/EG des Rates, ABl. EU Nr. L 197 vom 24.7.2012, S. 1.



# Aktualisierung und Zusammenführung der LABO-Arbeitshilfen zur Sickerwasserprognose

Volker Zeisberger<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Einführung.....	21
2. Neue Inhalte in der aktualisierten LABO-Arbeitshilfe .....	22
3. Literatur.....	25

## 1. Einführung

Mit der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) von 1999 wurde das Instrument der „Sickerwasserprognose“ eingeführt. Die Fragestellung bei einer Sickerwasserprognose betrifft den Wirkungspfad Boden-Grundwasser und lautet: Geht von Bodenverunreinigungen, die sich in der ungesättigten Zone befinden, eine Gefährdung für das Grundwasser aus, indem Schadstoffe durch Niederschlagswasser gelöst werden und mit dem Sickerwasser in das Grundwasser gelangen? Hierzu wurden im Auftrag der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) zwei Arbeitshilfen erstellt:

- Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen (2003) [1]
- Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen (2008) [2].

Mit der Novellierung der BBodSchV [3], die im August 2023 in Kraft getreten ist, hat sich für Durchführung und Beurteilung von Sickerwasserprognosen in einigen Punkten ein Änderungsbedarf ergeben. Daher sah der Altlastenausschuss (ALA) der LABO eine hohe Priorität darin, die beiden o. g. Arbeitshilfen zu aktualisieren und zusammenzufassen. In einer Arbeitsgruppe unter Beteiligung mehrerer Bundesländer wurde Anfang 2024 ein Entwurf erstellt [4] und den ALA-Mitgliedern zur Stellungnahme zugesandt. Mit der Veröffentlichung der LABO-Arbeitshilfe ist Ende 2024 zu rechnen.

Folgende wesentliche Änderungen haben sich durch die Novellierung der BBodSchV ergeben:

- Für anorganische Schadstoffe werden zusätzlich zu den Prüfwerten für den „Ort der Beurteilung“ auch Prüfwerte für den „Ort der Probenahme“ veröffentlicht (siehe Kapitel 2.1).
- Als Elutionsverfahren werden entweder das Säulenverfahren nach DIN 19528 oder das Schüttelverfahren nach DIN 19529 vorgeschrieben. Beide Verfahren weisen ein Wasser-Feststoff-Verhältnis von 2:1 auf und gelten als gleichwertig (siehe Kapitel 2.2).
- Ergänzend zur Sickerwasserprognose kann optional eine sogenannte Einmischungsprognose durchgeführt werden (siehe Kapitel 2.3).

---

<sup>1</sup> Volker Zeisberger, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden, volker.zeisberger@hlnug.hessen.de, 0611-6939/748

Die genannten Änderungen betreffen lediglich die „Sickerwasserprognose auf der Grundlage von Materialuntersuchungen durch Elution mit Wasser in Verbindung mit einer Transportprognose“, siehe § 14 Abs.1 BBodSchV, also die typische Sickerwasserprognose. Für die weiteren Varianten der Sickerwasserprognose (Rückrechnung aus Grundwasseruntersuchungen, Sickerwasserprognose mittels in-situ-Untersuchungen) ergeben sich keine wesentlichen Änderungen.

## 2. Neue Inhalte in der aktualisierten LABO-Arbeitshilfe

### 2.1 Prüfwerte für den Ort der Probennahme

Für anorganische Schadstoffe sind in der aktualisierten BBodSchV zusätzlich zu den Prüfwerten für den „Ort der Beurteilung“ auch Prüfwerte für den „Ort der Probenahme“ veröffentlicht. Die Notwendigkeit dieser Ergänzung ergab sich aus systematischen Untersuchungen an unbelasteten Bodenproben: Bei einigen anorganischen Stoffen zeigten auch unbelastete Böden eine Überschreitung der Prüfwerte für den „Ort der Beurteilung“, wenn die seit 2023 vorgeschriebenen 2:1-Elutionsverfahren und Prüfwerte angewendet wurden. Dieses Phänomen trat insbesondere bei humusreichen Böden auf, da organische Bodenbestandteile die Mobilisierung einiger anorganische Schadstoffe fördert. Die mobilisierenden Effekte schwächen sich während der Sickerwasserpassage durch die ungesättigte Zone i. d. R. deutlich ab. Daher sind die Prüfwerte für den „Ort der Probenahme“ höher als die Prüfwerte für den „Ort der Beurteilung“, die sich wie bisher an den Geringfügigkeitsschwellen der LAWA [5] orientieren. Die neuen Prüfwerte für den „Ort der Probenahme“ haben in erster Linie die Funktion, dass bei deren Unterschreitung kein Handlungsbedarf für weitere Untersuchungen besteht.

Tab. 1: Prüfwerte für den „Ort der Probenahme“ (bei einem gesamten organischen Kohlenstoffgehalt (TOC) in der Bodenprobe <0,5% und >0,5%) und Prüfwerte für den „Ort der Beurteilung“ für anorganische Stoffe

Stoff	Ort der Probennahme TOC-Gehalt <0,5% [µg/L]	Ort der Probennahme TOC-Gehalt ≥ 0,5% [µg/L]	Ort der Beurteilung [µg/L]
Arsen	15	25	10
Blei	45	85	10
Bor	1.000	1.000	1.000
Cadmium	4	7,5	3
Chrom, gesamt	50	50	50
Chrom (VI)	8	8	8
Kobalt	50	125	10
Kupfer	50	80	50
Molybdän	70	70	35
Nickel	40	60	20
Quecksilber	1	1	1
Selen	10	10	10
Zink	600	600	600
Cyanide, gesamt	50	50	50
Cyanide, leicht freisetzbar	10	10	10
Fluorid	1.500	1.500	1.500

## 2.2 Elutionsverfahren

Elutionsverfahren werden im Rahmen der BBodSchV angewandt, um die unter natürlichen Standortverhältnissen stattfindende Mobilisierung von Schadstoffen zumindest näherungsweise abzubilden. Der in der BBodSchV von 1999 als Standardverfahren genannte Bodensättigungsextrakt hat sich in der Praxis jedoch nicht bewährt. Das damals ebenfalls aufgeführte S4-Verfahren, das ein Wasser-Feststoff-Verhältnis von 10:1 aufweist, ist in der Regel ungeeignet, um eine realitätsnahe Schadstoffkonzentrationen abschätzen zu können.

Als geeignete Verfahren, die einerseits praktikabel sind und andererseits eine näherungsweise Einschätzung der Mobilisierbarkeit ermöglichen, werden in der novellierten BBodSchV zwei Verfahren genannt, die beide ein Wasser-Feststoff-Verhältnis von 2:1 aufweisen:

- DIN 19528 (2:1-Säulenverfahren)
- DIN 19529 (2:1-Schüttelverfahren).

Beide Verfahren werden in der BBodSchV gleichberechtigt genannt und sind daher als gleichwertig ansehen. In der novellierten BBodSchV werden noch die 2021 geltenden Versionen der beiden DIN-Normen zitiert. Es liegen jedoch mittlerweile die DIN-Normen mit Stand 2023 vor, die nun anzuwenden sind [6, 7].

## 2.3 Einmischungsprognose

Für einige anorganische Stoffe hatte die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) im Jahr 2016 Geringfügigkeitsschwellen (GFS) abgeleitet, die deutlich niedriger waren als die 2004 abgeleiteten GFS [5]. Da die Prüfwerte der BBodSchV sich an den GFS orientieren, sind in der Folge die Prüfwerte für einige anorganische Stoffe in der novellierten BBodSchV deutlich geringer als noch 1999. Der Verordnungsgeber wollte jedoch eine deutliche Verschärfung des Altlastenrechts für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser vermeiden.

Ein pragmatischer und von der LAWA mitgetragener Weg war es, die Vermischung/Verdünnung von Sicker- und Grundwasser im obersten Meter des Grundwassers bei der Beurteilung zuzulassen. Dieser Ansatz wurde als „Rührkesselmodell“ bezeichnet, wohl wissend, dass im Aquifer die Verdünnungsprozesse durch Dispersion/Diffusion erfolgen. Es besteht nun die Option, die Prüfwerte der BBodSchV nicht nur für die Schadstoffkonzentration am Ort der Beurteilung heranzuziehen, sondern auch nach Vermischung im obersten Meter des Grundwassers. Obwohl für die meisten organischen Schadstoffe keine Verschärfung der GFS erfolgte, gilt die Option der Einmischungsprognose auch für diese Stoffe.

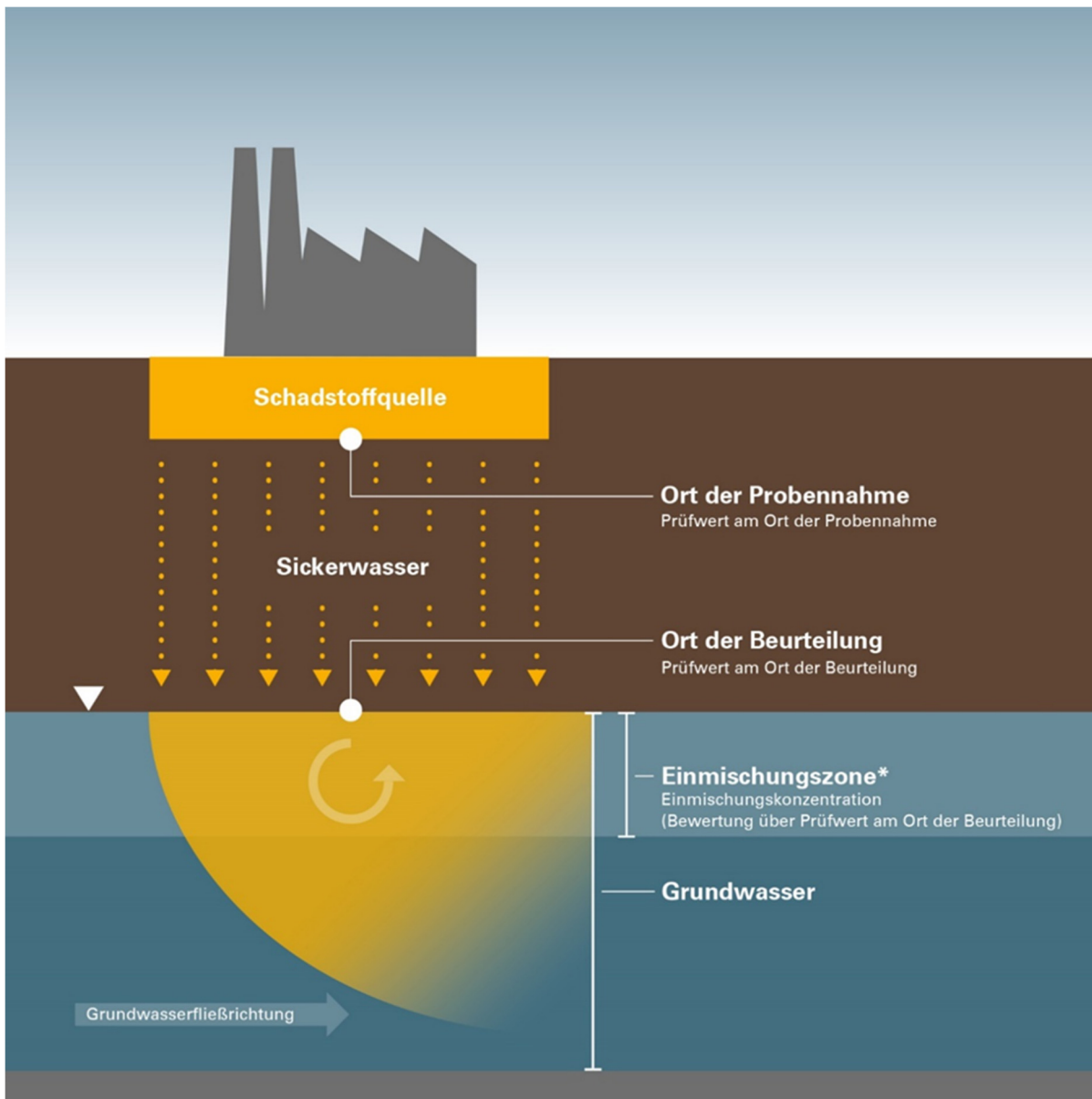


Abb.1: Schematische Darstellung der Einmischungsprognose [4]. \*: Nach § 14 Abs. 5 BBodSchV wird per Konvention eine pauschale Einmischungstiefe von einem Meter unterhalb der Grundwasseroberfläche angenommen.

Für den Vollzug der BBodSchV ist zu erwarten, dass die Einmischungsprognose eher bei der Detailuntersuchung als bei der orientierenden Untersuchung angewendet wird. Denn Voraussetzung für die Anwendung der Einmischungsprognose ist, dass die Fließgeschwindigkeit im Grundwasser bekannt ist; dieses Wissen liegt bei orientierenden Untersuchungen eher selten vor. Weiterhin ist zu erwarten, dass die Einmischungsprognose eher bei kleinen Altlasten/Punktquellen zu einer Entlastung des Pflichtigen führt. Bei großflächigen Belastungen bzw. geringen Grundwasserfließgeschwindigkeiten sind die Auswirkungen der Einmischprognose vergleichsweise gering [8].

## **2.4 ALTEX-1D**

Das analytische Prognose-Tool ALTEX-1D war Bestandteil der LABO-Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen [2]. Da sich ALTEX-1D einerseits bewährt hat, andererseits das Sicherheitskonzept der EXCEL-basierten Anwendung veraltet ist, wird ALTEX-1D zurzeit überarbeitet und soll webbasiert zur Verfügung gestellt werden. In der aktualisierten LABO-Arbeitshilfe wird mehrfach auf ALTEX-1D verwiesen und es wird ein Link zur Verfügung gestellt.

## **3. Literatur**

- [1] Bund-/Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO): Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen, 2003
- [2] Bund-/Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO): Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen, 2008
- [3] BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716)
- [4] Bund-/Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO): Arbeitshilfe zur Sickerwasserprognose (Entwurf 14.05.2024)
- [5] Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, aktualisierte und überarbeitete Fassung, 2016
- [6] DIN 19528: Elution von Feststoffen - Perkulationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen, 2023
- [7] DIN 19529: Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen bei einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg, 2023.
- [8] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie: Neues von der Sickerwasserprognose – Die Einmischprognose, in: Boden und Altlasten – Nachrichten aus Hessen, Ausgabe 2022  
[https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/altlasten/Boeden\\_Altlasten\\_Newsletter\\_2022\\_web\\_final.pdf](https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/altlasten/Boeden_Altlasten_Newsletter_2022_web_final.pdf)





# PFAS: Herkunft und Verbleib in der Umwelt

Dr. Michael Reinhard<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Einleitung .....	27
2. Ansätze einer globalen Bilanzierung.....	28
3. Versuch einer regionalen Bilanzierung .....	28
4. Mögliche Ursachen von PFAS im Regenwasser.....	29
5. Pufferung bzw. Anreicherung im Boden?.....	30
6. Schlussfolgerungen und Thesen.....	30
7. Literatur.....	31

## 1. Einleitung

Die Herkunft und der Verbleib der PFAS in der Umwelt und die Beaufschlagung von Boden und Gewässern beschäftigen im Moment die Fachwelt aus unterschiedlichen Gründen.

Zum einen bilden die Hintergrundwerte die Grundlagen zur Herleitung von Vorsorgewerten nach dem Bodenschutzrecht, welche wiederum die Basis zur Festlegung von Materialwerten für Ersatzbaustoffe darstellen.

Zum anderen ist die Kenntnis der Hintergrundwerte zur Abgrenzung von schädlichen Bodenveränderungen notwendig. Und zum Dritten sind die Analysen sowohl zur Herkunft als auch zur Entwicklung der Hintergrundbelastungen nicht nur von wissenschaftlichem Interesse, sondern die Kenntnis darüber ist ein Baustein für zukünftige Entscheidungen im umweltpolitischen Handeln.

Die bisherigen Erkenntnisse und wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu dem Thema sind sehr vielfältig und man gewinnt den Eindruck eines verstreuten Puzzles, bei dem die einzelnen Puzzlesteine klare Strukturen aufweisen, aber das Gesamtbild noch nicht erkennbar ist. In diesem Vortrag sollen einige Puzzlesteine, die die Schutzgüter Boden und Gewässer betreffen, kombiniert werden, um erste Eindrücke über das Gesamtbild zu gewinnen. Das Ziel des Vortrages ist es, die fachliche Auseinandersetzung mit dem Thema weiter anzuregen.

---

<sup>1</sup> Dr. Michael Reinhard, ARCADIS Germany GmbH, Griesbachstraße 10, 76185 Karlsruhe, M: 0151 17143 864, E-Mail michael.reinhard@arcadis.com

## 2. Ansätze einer globalen Bilanzierung

Im ECHA Restriction Report 2023 [1] sind die möglichen PFAS-Emissionen in die Umwelt in einem Produktzyklus dargestellt. Die PFAS können über die Produktionsphase der Rohstoffe, über die Weiterverarbeitung zu dem Endprodukt, während des Produktgebrauchs bis hin zur Entsorgung des Produkts in die Umwelt gelangen. Dabei ist auch das Recycling PFAS-haltiger Abfälle zu anderen Produkten zu beachten.

Wang et. al. 2014 [2] versuchten anhand von Produktionsdaten und Ansätzen zur Freisetzung die Emissionen der perfluorierten Carbonsäuren PFCA (C4-C14) zu bilanzieren. Für den Zeitraum von 1950 bis 2015 errechneten sie eine weltweite Gesamtemission mit einer Spanne von 2.600 bis 21.000 Tonnen. Nach dieser Schätzung wäre die PFAS-Fracht zu 65 bis 75 % im Wasser, zu 22 bis 16 % in der Luft und zu rd. 10 % im terrestrischen Bereich (Boden, Deponien) verteilt worden.

Ein Abgleich mit hochgerechneten Konzentrationen in den Weltmeeren ergab, dass die Abschätzung der Emissionen für die Homologe PFHpA, PFOA, PFNA plausibel erschien, die anderen Homologe jedoch im Vergleich deutlich zu niedrig lagen (Wang et. al. 2014 [2]).

Eine aktuelle Berechnung zur Emission (ECHA Restriction Report 2023 [1]) ergibt allein für den Europäischen Wirtschaftsraum und für das Jahr 2020 Freisetzungen von polyfluorierten Alkylsäuren (PFAA) mit 8.000 Tonnen, von fluorierten Gasen mit 41.000 Tonnen und von Fluorpolymeren mit 20.000 Tonnen. Auch wenn die Berechnung der ECHA neben den Carbonsäuren auch Sulfonsäuren enthält und Wang et.al. ausschließlich Carbonsäuren (mit Precursor) berücksichtigt haben, ist die Differenz so groß, dass man die Abschätzungen von Wang et. al. aus dem Jahr 2014 als zu niedrig beurteilen kann.

Durch PFAS verursachte schädliche Bodenveränderungen sind zum größten Teil auf die Verwendung von PFAS haltigen Löschschäumen zurückzuführen. Bei der Beschäftigung mit den globalen Bilanzen stellte sich die Frage, wie groß die Menge der in Verkehr gebrachten AFFF-Löschschäume einzuschätzen ist. Hierzu gibt es nur spärliche Angaben. In einem Bericht der ECHA (Wood et. al. 2020 [3]) finden sich Mengen zum AFFF-Verbrauch in der EU aus den Jahren 2016 bis 2018 mit 14.000 Tonnen pro Jahr (8.000 Tonnen in stationären Systemen, 6.000 Tonnen in mobilen Systemen). Legt man ein Konzentrat mit einem 1% bis 5% PFAS-Anteil zugrunde, ergeben sich PFAS-Mengen von 140 bis 700 Tonnen pro Jahr. Dies ist -unabhängig zur Altlastenrelevanz- im Vergleich zur gesamten Emission der PFAS gering.

## 3. Versuch einer regionalen Bilanzierung

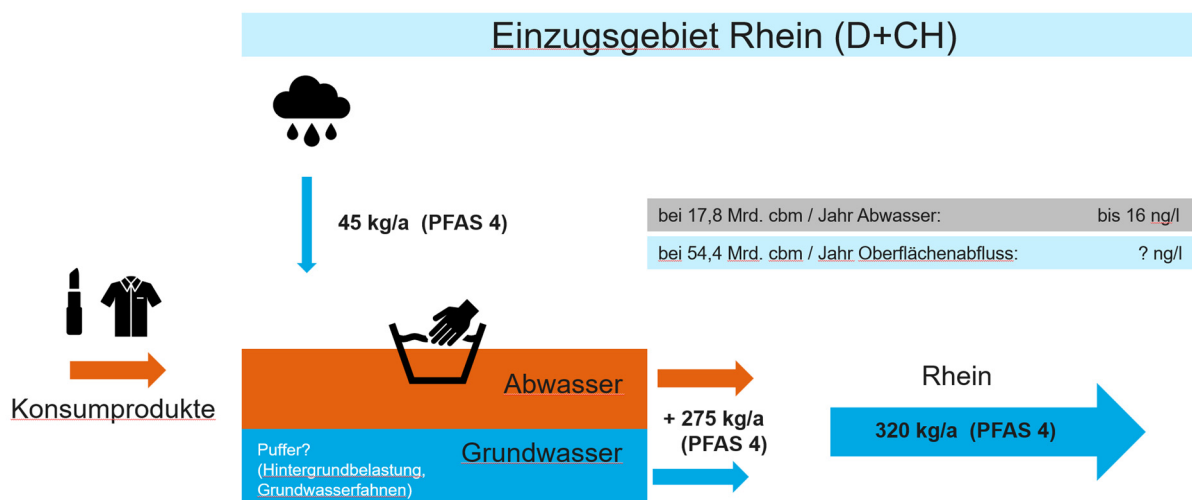
Als Ausgangspunkt für den Versuch einer regionalen Bilanzierung eignen sich Flüsse, in denen die löslichen PFAS letztlich landen. Die Flüsse integrieren für ihr Einzugsgebiet die PFAS-Emissionen aus Abwässern, belastetem Grundwasser und möglicherweise belastetem Regenwasser. Für den Rhein wurde der Versuch einer Bilanzierung unternommen.

Die PFAS- Konzentrationen für die vier EFSA-Homologe PFOA, PFOS, PFHxS, PFNA (EFSA 4) liegen im Rhein an der Grenze von Deutschland zu den Niederlanden bei einer Konzentration von rund 4,4 ng/l [4]. Bei einem mittleren Abfluss des Rheins mit 2.290 cbm/s beträgt die PFAS-Fracht für die EFSA 4 – Homologe 320 kg/Jahr. Dies betrifft das Flusseinzugsgebiet aus der Schweiz und Deutschland. Der Anteil der Sulfonsäuren (PFOS, PFHxS) zu den Carbonsäuren (PFOA, PFNA) beträgt grob 3 zu 1.

Den Anteil der PFAS (EFSA 4) im Regenwasser schätzt Cousins et. al. 2022 [5] grob mit 2 ng/l ab. Bezogen auf das Flusseinzugsgebiet des Rheins läge dann nach eigener Abschätzung die PFAS-Emission aus dem

Regen bei 45 kg PFAS (EFSA 4), die dann im Oberflächenabfluss und in der Grundwasserneubildung zu finden ist. Vergleicht man im Regenwasser die Anteile Sulfonsäuren (PFOS, PFHxS) zu den Carbonsäuren (PFOA, PFNA) so ergibt sich ein annähernd gleiches Verhältnis.

Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der groben Abschätzung für die vier EFSA-Homologe:



Insgesamt errechnet sich im Rheineinzugsgebiet eine Fracht von 275 kg/Jahr PFAS (EFSA 4) über das Abwasser. Hiervon wäre die Fracht aus dem Grundwasserzufluss in das Oberflächengewässer abzuziehen, die aber nicht bekannt ist. Es ist zu erwarten, dass der Anteil der Fracht aus dem Abwasser deutlich überwiegt.

#### 4. Mögliche Ursachen von PFAS im Regenwasser

Wang et. al. 2014 [6] und anderen Autoren, z. B. Umweltbundesamt 2021 [7] geben unter anderem folgende mögliche Ursachen für einen atmosphärischen Eintrag an:

Ab den 1990er Jahren wurden die verbotenen FCKW (Einsatz: Wärmetransport, Reinigungs- und Lösungsmittel, etc.) zuerst durch teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) und später durch teilhalogenierte Fluorether (HFE) ersetzt. Diese könnten in der Atmosphäre transformiert werden und ihre Umwandlungsprodukte vorwiegend PFBA aber auch C4 bis C11-PFCAs sein.

Die Bedeutung der gasförmigen PFAS zeigt eine Auswertung des Bundesumweltamtes [7]. Demnach hat in Deutschland seit 1990 der Emissionsanteil der gasförmigen Fluorkohlenwasserstoffe zugenommen und inzwischen rund 6.500 Tonnen/Jahr erreicht. Korrespondierend dazu ist der Anteil von TCA (Trifluoracetat) im Regenwasser in den letzten Jahren deutlich gestiegen (1995/96: 54-69 kg/km<sup>2</sup>; 2019/2020: 276 kg/km<sup>2</sup>) [7].

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit für PFAS im Regenwasser oder in der Atmosphäre ist die Entstehung der PFAS aus industriellen, thermischen Prozessen. Daneben gibt es weitere Erklärungsversuche, wie zum Beispiel den Transport der PFAS aus der Meeressicht in die Atmosphäre.

Nicht auszuschließen ist, dass es mehrere Ursachen gibt und sich die Emissionen addieren.

## 5. Pufferung bzw. Anreicherung im Boden?

Inzwischen liegen Werte aus Bodendauerbeobachtungsmessstellen in verschiedenen Bundesländern vor. Die Daten der LUBW [8] aus dem Jahr 2016 zeigen überwiegend Perfluorcarbonsäuren und der Anteil der Perfluorsulfonsäuren liegt zwischen rund 10 und 30%. Umgerechnet aus diesen Daten (LUBW 2016 [8]) lässt sich ein mittlerer Gehalt von 200 ng/kg für die EFSA 4-Homologe abschätzen.<sup>2</sup>

Zu den EFSA 4-Homologen liegen auch Werte für Regenwasser vor (Cousins et. al. 2022 [5]), sodass eine Bilanzierung möglich ist. Auf einem Wert von 200 ng/kg (bei in einer angenommenen Bodenschicht von 30 cm) käme man dann, wenn eine Beaufschlagung von verunreinigtem Regenwasser mit 10 ng/l (mit einer Grundwasserneubildung von 200 mm) über einen Zeitraum von 50 Jahren stattgefunden hätte. Die derzeitige Regenwasserkonzentration wurde von Cousins et. al. 2022 [5] grob mit 2 ng/l abgeschätzt.

Die grobe Bilanzierung zeigt, dass der Boden möglicherweise schon seit mehreren Jahrzehnten als Puffer für atmosphärische PFAS-Einträge wirkt.

## 6. Schlussfolgerungen und Thesen

Am Beispiel des Rhein deutet sich eine Dominanz der perfluorierten Sulfonsäuren in den Oberflächengewässern an. Dagegen scheinen im Boden-Hintergrund Carbonsäuren zu dominieren.

Die PFAS-Emission im Rhein basiert nach vereinfachten und groben Berechnungen zu 85 % auf Abwässern. Der Anteil von PFAS beaufschlagtem Grundwasser (aus flächenhaften oder punktuellen Quellen), das in den Rhein infiltriert und dessen Fracht von der Abwasserfracht abzuziehen wäre, ist nicht bekannt bzw. abschätzbar. 15 % können auf PFAS-haltiges Niederschlagswasser zurückzuführen sein.

In einer Übersichtsdarstellung zu relativen Anteilen in deutschen Grundwässern [9] ist zu erkennen, dass im Grundwasser der Anteil der Carbonsäuren gegenüber den Sulfonsäuren überwiegt.

Die Daten zu Regenwasser und den Hintergrundwerten für den Boden deuten darauf hin, dass auch hier Carbonsäuren dominieren. Nach einem ersten Eindruck variiert der Anteil der Carbonsäuren im Boden, während der Anteil der Sulfonsäuren auf einem ähnlichen Niveau verbleibt. Dies könnte auf zwei unterschiedliche Ursachen hinweisen.

Plausibilisiert man EFSA 4 - Hintergrundwerte im Boden mit Konzentrationen im Regenwasser, so wäre ein vollständiger Rückhalt der Fracht aus dem Regenwasser über mehr als 50 Jahre möglich. Der Boden würde dann als „Puffer“ wirken und sich die PFAS weiter anreichern.

Zu der Herkunft des atmosphärischen Eintrags der PFAS in den Boden existieren verschiedene Thesen. Die These der Herkunft aus Meeressicht ist nach einem Vergleich der Meeresskonzentrationen mit den Konzentrationen im Regen wenig plausibel.

Andere, derzeit intensiv diskutierte Ursachen ist die Entstehung aus thermischen Prozessen und aus Transformationen gasförmiger PFAS in der Atmosphäre. Es liegen jedoch noch zu wenige Daten vor, um Bilanzierungen und Plausibilisierungen durchführen zu können.

---

<sup>2</sup> Zum Vergleich: Die EFSA 4 Werte (rückgerechnet aus Eluaten) liegen in Nordrhein-Westfalen [13] für Grünland in einer ähnlichen Größenordnung. Die Gehalte aus Analysen in der Originalsubstanz für Grünland liegen bei rund 800 ng/kg.

## 7. Literatur

- [1] ECHA (2023): Annex XV Restriction Report 22.03.2023.
- [2] Wang, Z; Cousins, I; Scheringer, M; Buck, R, Hungerbühler, K; (2014a): Global emission inventories for C4–C14 perfluoroalkyl carboxylic acid (PFCA) homologues from 1951 to 2030, Part I: production and emissions from quantifiable sources. *Environment International* 70 (2014) 62–75.
- [3] European Commission DG Environment/ European Chemicals Agency ECHA (2020): The Use of PFAS and fluorine-free alternatives in fire-fighting foams. Wood; Ramboll; COWI: Final report
- [4] RIWA-Rijn: <https://www.riwa-rijn.org/wp-content/uploads/2021/08/IDF2623-RIWA-RIJN-jaarrapport-DU-2020-digitaal.pdf> . Expertisecentrum PFAS: <https://www.expertisecentrumpfas.nl/> .
- [5] Cousins,I; Johansson, J; Salter, M; Sha, B; Scheringer, M (2022): Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). *Environ. Sci. Technol.* 2022, 56, 11172–11179.
- [6] Wang, Z; Cousins, I; Scheringer, M; Buck, R, Hungerbühler, K; (2014b): Global emission inventories for C4–C14 perfluoroalkyl carboxylic acid (PFCA) homologues from 1951 to 2030, part II: The remaining pieces of the puzzle. *Environment International* 69 (2014) 166–176.
- [7] Umweltbundesamt (2021): Chemikalieneintrag in Gewässer vermindern – Trifluoacetat (TFA) als persistente und mobile Substanz mit vielen Quellen. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/2021\\_hg\\_chemiekalieneintrag\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/2021_hg_chemiekalieneintrag_bf.pdf).
- [8] LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg., 2016): PFC-Hintergrundgehalte im Boden- - Untersuchungen an Standorten des Bodendauerbeobachtung-Pprogramms Baden-Württemberg. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10215>.
- [9] Umweltbundesamt (2020): Das Magazin des Umweltbundesamtes 1/2019 – Schwerpunkt PFAS. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/uba\\_sp\\_pfas\\_web\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/uba_sp_pfas_web_0.pdf) .
- [10] Busch J. (2009): Analysis of poly- and perfluorinated compounds (PFCs) in landfill effluent using HPLC-MS/MS. Diplomarbeit bei der Leuphana Universität Lüneburg. GKSS 2009/1.
- [11] Süddeutsche Zeitung SZ: <https://www.sueddeutsche.de/projekte/artikel/politik/gesundheit-pfas-gift-umwelt-umweltverschmutzung-gesundheitsgefahr-e261729/?reduced=true>
- [12] Pancras T. Slenders, H; Vredenburg, L.(2021): Arcadis Germany GmbH: PFAS in Products and Waste Streams in the Netherlands. Rijksoverheid NL.
- [13] Landesamt für Natur, Umwelt,- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen LANUV: Hintergrundgehalte und -werte von PFAS in Böden ländlicher Gebiete in Nordrhein-Westfalen. LANUV-Fachbericht 150.



# PFAS in Böden der Bodendauerbeobachtung in Baden-Württemberg

Ann-Kathrin Seeger<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Einleitung .....	33
2. Methodische Vorgehensweise.....	34
3. Ergebnisse der Untersuchungsphasen .....	35
4. Zusammenfassung und Ausblick .....	38
5. Literatur.....	39

## 1. Einleitung

Die Stoffgruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) umfasst weit mehr als 10.000 verschiedene Verbindungen, welche ausschließlich industriell hergestellt werden. Es handelt sich um fluorierte organische Verbindungen, bei denen die an Kohlenstoffketten gebundenen Wasserstoffatome entweder vollständig (perfluoriert) oder teilweise (polyfluoriert) durch Fluoratome ersetzt sind. Dabei unterscheidet man zwischen kurz- und langkettigen PFAS und nach funktionellen Gruppen z. B. in Perfluorcarbonsäuren (PFCA) oder Perfluorsulfonsäuren (PFSA). Als Vorläuferverbindungen oder Precursor werden polyfluorierte Verbindungen bezeichnet, welche sich zu den persistenten perfluorierten Carbon- und Sulfonsäuren abbauen können (Umweltbundesamt). Zu den bekanntesten Vertretern der Stoffgruppe zählen die Perfluorooctansäure (PFOA) und die Perfluorooctansulfonsäure (PFOS), welche durch die Weltgesundheitsorganisation (WHO), im Dezember 2023, hinsichtlich ihrer Kanzerogenität neu bewertet wurden. PFOA wurde als krebserregend und PFOS als möglicherweise krebserregend für den Menschen eingestuft (IARC 2023).

PFAS werden aufgrund ihrer wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften vielfältig in der Industrie, in Löschschäumen und in einer Vielzahl an Verbraucherprodukten eingesetzt. Zudem sind sie außerordentlich stabil und werden in der Umwelt praktisch nicht abgebaut. Deshalb lassen sie sich mittlerweile in Spuren überall in der Umwelt (ubiquitär) nachweisen. Sie können sich nicht nur in Böden, Gewässern, Pflanzen und Tieren anreichern, sondern auch entlang der Nahrungskette und im Menschen (Umweltbundesamt). Einige PFAS sind leicht wasserlöslich und können im Boden und Grundwasser weiterverfrachtet werden.

In den letzten Jahren zeigten sich vermehrt Hinweise auf das Vorkommen von PFAS in Böden und anderen Umweltmedien, fernab von Industrie- und Siedlungsgebieten, sowie von bekannten punktuellen Einträgen aus Löschmitteleinsätzen oder PFAS-relevanten Altlasten. Seit 2015 untersucht die LUBW Böden aus dem landesweiten Messnetz zur Bodendauerbeobachtung auch auf PFAS, um Erkenntnisse über die Gesamtsituation der PFAS-Hintergrundgehalte in Baden-Württemberg zu erhalten. Bei den Böden der

---

<sup>1</sup> Ann-Kathrin Seeger, LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Griesbachstr. 1, 76185 Karlsruhe, Ann-Kathrin.Seeger@lubw.bwl.de, Tel.: 0721/5600-1441

Bodendauerbeobachtung handelt es sich um sogenannte „Hintergrundböden“, das heißt, dass eine spezifische Belastung nicht bekannt ist und sie grundsätzlich als unbelastet eingestuft werden.

## **2. Methodische Vorgehensweise**

Die Beprobungs- und Untersuchungskampagnen an den landesweiten Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) werden in Phasen organisiert und an verschiedenen Bodennutzungen durchgeführt. Es werden Acker-, Grünland- und Waldflächen untersucht. Bei den Beprobungen werden Bodenproben aus verschiedenen Probenahmetiefen gewonnen, um zu prüfen, ob eine Tiefenverlagerung der PFAS aus den oberen in die tieferen Bodenhorizonte erfolgt ist. Zusätzlich werden weitere, insbesondere methodische Fragestellungen im Zuge der Phasen bearbeitet.

### **2.1 Probenahme**

Die Beprobung der BDF erfolgt nach einem repräsentativen, sich wiederholendem Probenahmeschema. Dabei wird, eine mit Magneten eingemessene Kernfläche von 400 m<sup>2</sup> (20 x 20 m) beprobt. Die Probenahme erfolgt i. d. R. mittels Split-Tube-Bohrer nach bodenkundlich angesprochenen Bodenhorizonten. Es werden 20 rastermäßig verteilte Einstiche zu einer oder mehreren Mischproben (MP) vereint. Bei Waldböden werden zudem die organischen Auflagen beprobt. Die Bodenproben werden vor Ort grob manuell homogenisiert und anschließend in ein Liter Braunglasflaschen abgefüllt.

### **2.2 Probenaufbereitung**

Nach Anlieferung an die LUBW werden die feldfrischen Bodenproben zunächst bei -18°C in Tiefkühlschränken eingefroren. Die Aufbereitung der getrockneten Bodenproben erfolgt i. d. R. bei Raumtemperatur. Nach der Trocknung wird die Probe auf < 2 mm gesiebt. Feldfrische Bodenproben werden vor Ort homogenisiert, mit dem Teilkreuz separiert und in Braunglasflaschen abgefüllt.

Um mögliche Auswirkungen unterschiedlicher Probenaufbereitungen bei der Eluatherstellung festzustellen, liegen i. d. R. Vergleichspaare von getrockneten und feldfrischen Bodenproben auf PFAS vor (siehe Kap. 3.2.2). Die Bodenproben werden zur PFAS-Analytik an das TZW Karlsruhe überbracht und weiterverarbeitet. Teilweise wurde die Probenaufbereitung auch vom TZW übernommen.

### **2.3 Analytik**

Die LUBW untersucht derzeit 22 PFAS-Einzelsubstanzen (siehe Tab. 1). Die Bestimmung der PFAS im Feststoff (Methanol-Extrakt) erfolgt nach DIN 38414-14. Die wässrigen Bodeneluate werden gemäß DIN 19529 (2:1 Schüttelverfahren) hergestellt und nach DIN 38407-42 auf PFAS im Eluat untersucht. Abweichend von den Vorgaben der DIN 19529 werden die Proben ohne Anwendung der Membranfiltration untersucht. Es liegen auch einige Ergebnisse vor, die gemäß DIN 19528 (Säulenperkolationsverfahren) erhoben wurden. Zusätzlich zur PFAS-Einzelsubstanzanalytik, werden inzwischen auch Untersuchungen mit Summenparameter (TOP-Assay im Feststoff und AOF) durchgeführt. Weitere Begleitparameter, die regelmäßig erhoben werden, sind: DOC, TIC, TOC und TC.

Die analytischen Bestimmungsgrenzen für die PFAS liegen bei 0,001 µg/L für die Eluatproben und mittlerweile bei 0,1 µg/kg für die Feststoffproben. In der Vergangenheit lag die Bestimmungsgrenze bei den Feststoffproben bei 1 µg/kg.



Tabelle 1: Analytierte Parameter im Feststoff und im wässrigen Bodeneluat

PFBA		PFBS	HPFHpA
PFPeA		PFPeS	H2PFDA
PFHxA		PFHxS	H4PFUnA
PFHpA		PFHpS	PFOSA
PFOA		PFOS	H4PFOS
PFNA		PFDS	TFA
PFDA			PFPrA
PFUnA			
PFDoA			

### 3. Ergebnisse der Untersuchungsphasen

Bisher liegen Ergebnisse von circa 70 Bodendauerbeobachtungsflächen aus mehreren Untersuchungskampagnen vor. Die Ergebnisse belegen durchgängig bestimmbare, wenngleich geringe PFAS-Gehalte in den Hintergrundböden.

#### 3.1 Ergebnisse im Feststoff

In allen seit 2021 untersuchten Bodenproben von Acker- und Grünlandflächen konnten, mit einer Bestimmungsgrenze von 0,1 µg/kg, PFAS im Feststoff im Oberboden nachgewiesen werden. Zudem wurden in allen untersuchten Unterböden PFAS gemessen. Die Ergebnisse der Waldböden liegen derzeit noch nicht vor.

Die gemessenen PFAS-Summengehalte im Oberboden liegen bei den Ackerflächen zwischen 1,11 und 6,43 µg/kg. Bei den Grünlandflächen liegen die gemessenen Summengehalte im Oberboden zwischen 2,70 und 5,45 µg/kg (siehe Abb. 1).

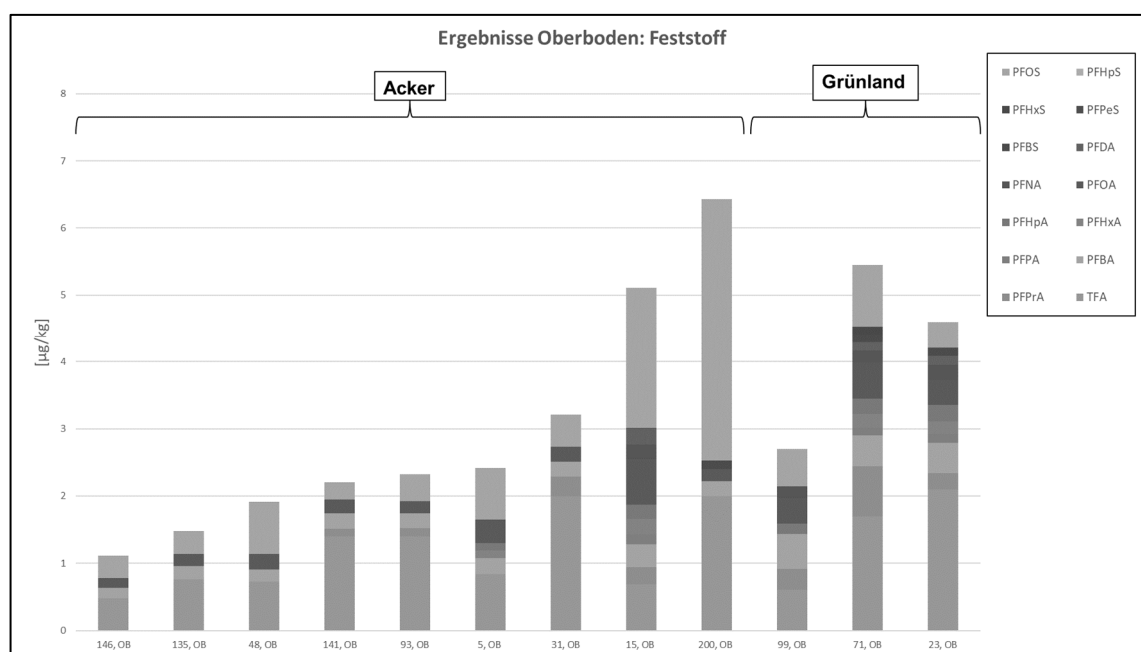


Abbildung 1: Vorläufige Ergebnisse von gemessenen PFAS-Feststoffgehalten für 22 untersuchte PFAS an Acker- und Grünlandflächen (Untersuchungszeitraum 2021 und 2022)

Es dominieren die Verbindungen PFBA, PFOA und PFOS. Zudem konnten in allen Bodenproben das ultrakurz-kettige TFA und zusätzlich im Großteil der Proben das ultrakurz-kettige PFPrA nachgewiesen werden. Die Unterböden weisen i. d. R. geringere PFAS-Summengehalte auf.

Mit einer Bestimmungsgrenze von 1 µg/kg konnten in den Untersuchungskampagnen vor 2021 nur vereinzelt langkettige Carbon- sowie langkettige Sulfonsäuren um die Bestimmungsgrenze von 1 µg/kg in Acker-, Grünland- und Waldflächen nachgewiesen werden (LUBW 2016, LUBW 2021).

### 3.2 Ergebnisse im Eluat

In den wässrigen Bodeneluaten können durchgängig PFAS unterschiedlicher Kettenlängen nachgewiesen werden. Es werden kurz- und langkettige Carbon- und Sulfonsäuren gemessen, dabei dominieren kurz-kettige Carbonsäuren, vor allem PFBA, und PFOA. Bei den Sulfonsäuren dominiert PFOS. Mit zunehmender Bodentiefe nehmen die PFAS-Gehalte i. d. R. ab.

In den untersuchten 2:1 Schütteluaten zeigt sich eine vergleichbare Verteilung von 20 PFAS, unterschieden nach den Nutzungen Acker-, Grünland- und Waldflächen. In den Waldböden und deren organischen Auflagen werden etwas höhere Gehalte nachgewiesen als in den Acker- und Grünlandböden. Der höchste gemessene PFAS-Summengehalt liegt bei 0,84 µg/L, i. d. R. werden aber PFAS-Summengehalte < 0,5 µg/L in Oberböden gemessen (siehe Abb. 2).

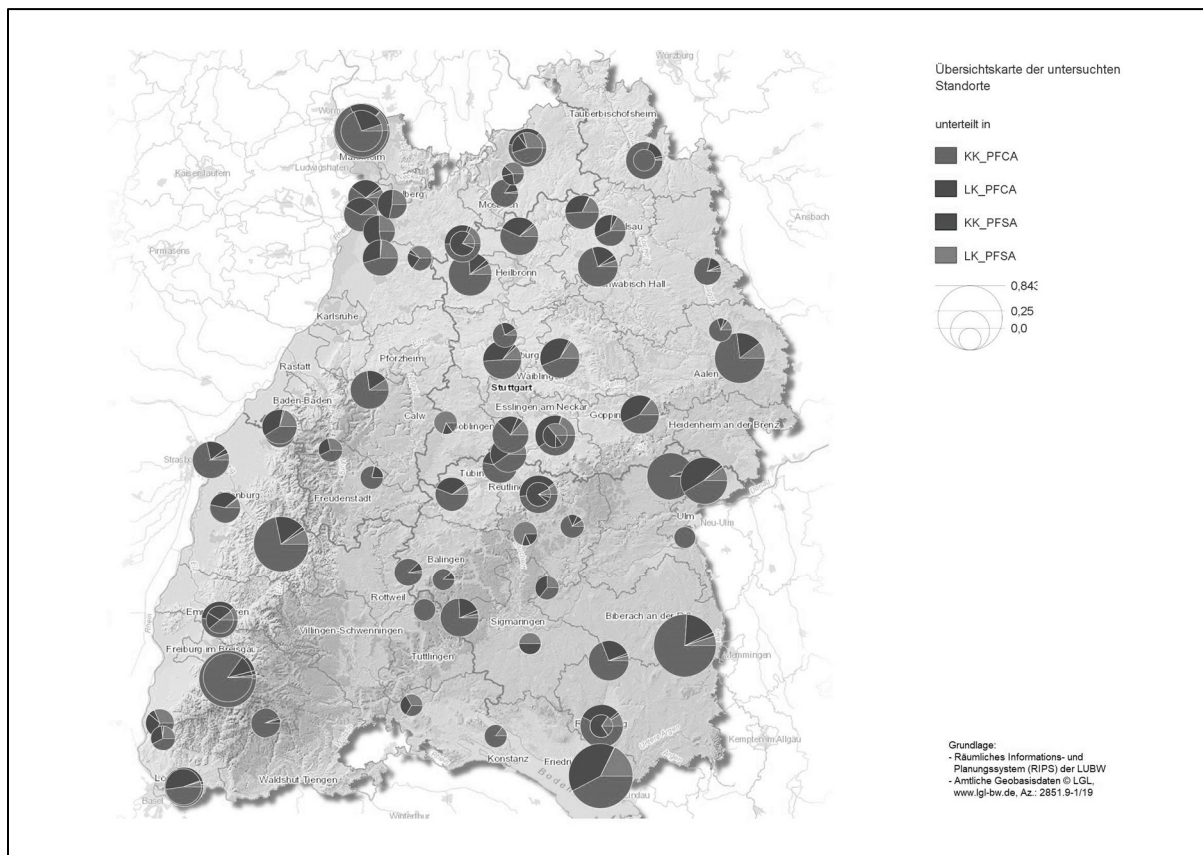


Abbildung 2: Gemessene PFAS-Eluatgehalte für 20 PFAS in Oberböden an den untersuchten Standorten (Stand: Februar 2023)

### 3.2.1 TFA und PFPrA

Ab 2021 wurden auch die ultrakurzkettigen PFAS TFA und PFPrA in den Bodeneluaten untersucht. In allen untersuchten Bodenproben konnten TFA und, bis auf wenige Ausnahmen, PFPrA nachgewiesen werden. Der höchste gemessene Summengehalt für 22 PFAS im Oberboden liegt bei den Ackerflächen bei 3,72 µg/L und bei den Grünlandflächen bei 4,47 µg/L (siehe Abb. 3). Die Ergebnisse für TFA und PFPrA für Waldböden liegen derzeit noch nicht vor.

### 3.2.2 Einfluss der Probenaufbereitung

An wässrigen Bodeneluaten zeigt sich deutlich, dass Unterschiede in der Probenaufbereitung einen Einfluss auf die Ergebnisse bei der PFAS-Bestimmung im Hintergrundbereich haben. Bei einer Trocknung der Bodenprobe vor der Elution können höhere PFAS-Gehalte bestimmt werden als bei Proben, die feldfrisch untersucht werden (Lange et al. 2021). Für die Bestimmung von niedrigen PFAS-Gehalten werden, auf vorläufige Empfehlung des Fachbeirat Bodenuntersuchungen (FBU), für die Eluatherstellung getrocknete Bodenproben herangezogen (Fachbeirat Bodenuntersuchungen 2024).

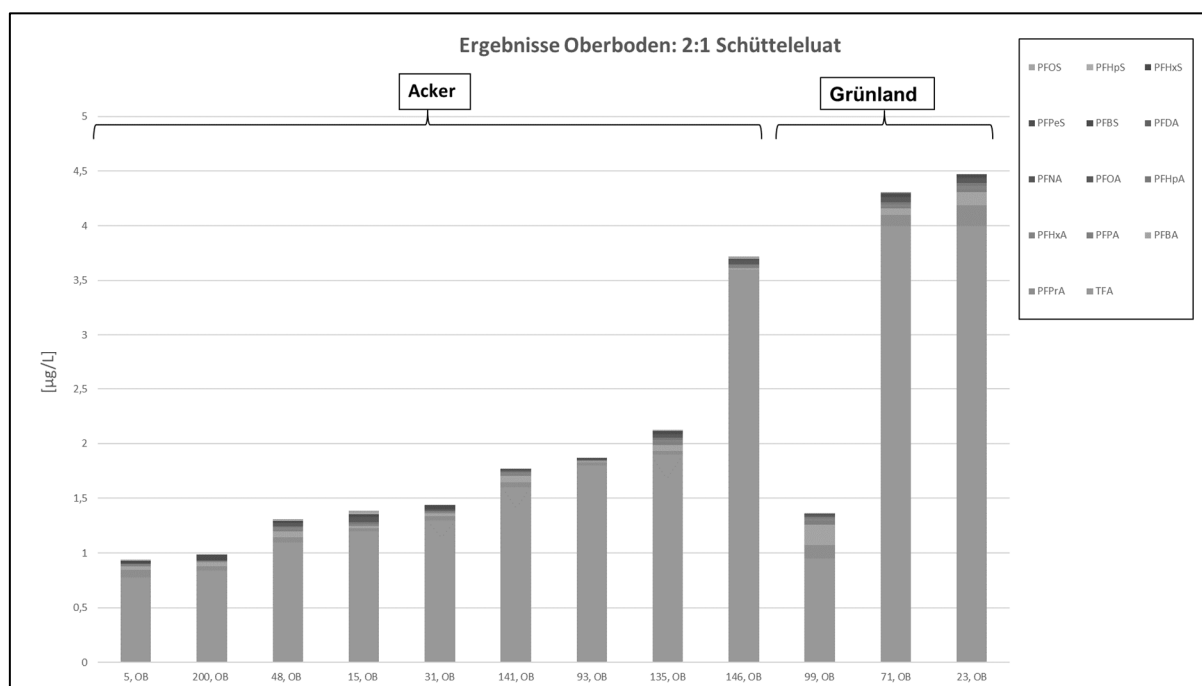


Abbildung 3: Vorläufige Ergebnisse von gemessenen PFAS-Eluatgehalten für 22 untersuchte PFAS an Acker- und Grünlandflächen (Untersuchungszeitraum 2021 und 2022, mit TFA und PFPrA)

## 3.3 Ergebnisse der TOP-Assay-Untersuchungen

Um zu prüfen, ob auch in den Hintergrundböden Vorläufersubstanzen vorhanden sind, wurden seit 2021 unter anderem TOP-Assay-Untersuchungen im Analysenumfang ergänzt. Der TOP-Assay wurde an Feststoffproben angewendet.

Die gemessenen Ergebnisse zeigen z. T. erhebliche Zunahmen der PFAS im Oberboden, nach Anwendung des TOP-Assay bei den Proben von Acker- und Grünlandflächen (siehe Abb. 4). Damit weisen erste Ergebnisse daraufhin, dass auch im Hintergrundbereich Vorläufersubstanzen in den Böden vorhanden sind.

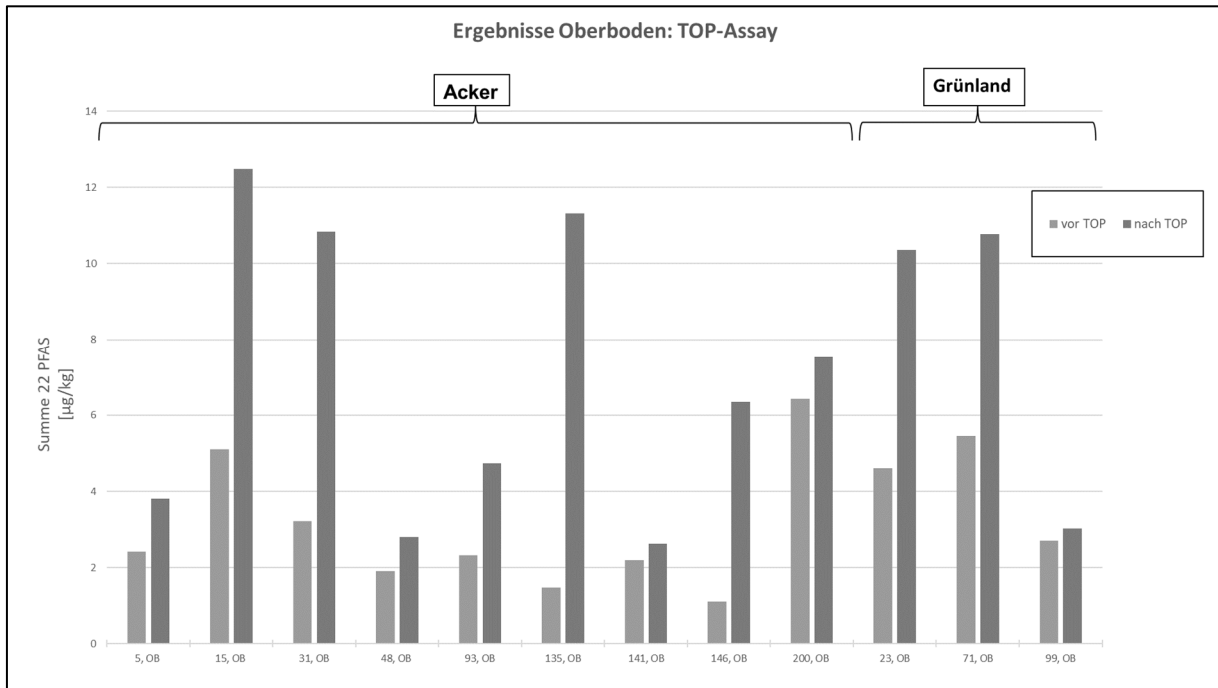


Abbildung 4: Vorläufige Ergebnisse von TOP-Assay-Untersuchungen an Acker- und Grünlandflächen (Untersuchungszeitraum 2021 und 2022, mit TFA und PFPrA)

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Untersuchungskampagnen der LUBW belegen flächendeckend analytisch bestimmbare geringe PFAS-Gehalte in den untersuchten Böden aus dem Messnetz zur Bodendauerbeobachtung, den Hintergrundböden. Dabei können mit den Bestimmungsgrenzen sowohl in Eluatproben als auch mittlerweile erstmalig in Feststoffproben in Baden-Württemberg durchgängig PFAS in Ober- und Unterböden nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der TOP-Assay-Untersuchungen an Feststoffproben weisen darauf hin, dass auch in den Hintergrundböden z. T. größere Mengen an Vorläuferverbindungen vorhanden sind.

Als Ursache wird bei den grundsätzlich als unbelastet eingestuften Böden ein diffuser Eintrag der ausschließlich anthropogen verursachten PFAS-Gehalte über den Luftpfad angenommen.

Für die folgenden Jahre sind weitere Untersuchungskampagnen vorgesehen, um das Probenkollektiv zu erweitern und zusätzliche Fragestellungen, die sich im Rahmen der Untersuchungen ergeben, zu bearbeiten.

## 5. Literatur

Fachbeirat Bodenuntersuchungen (2024): Empfehlungen des FBU zum methodischen Vorgehen bei der Bestimmung von niedrigen PFAS-Gehalten in Böden.

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/359/dokumente/fbu\\_2024\\_bestimmung\\_pfas\\_im\\_boden\\_20240426.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/359/dokumente/fbu_2024_bestimmung_pfas_im_boden_20240426.pdf) (abgerufen am 22.05.2024).

IARC – International Agency for Research on Cancer (2023): IARC Monographs evaluate the carcinogenicity of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS),

<https://www.iarc.who.int/news-events/iarc-monographs-evaluate-the-carcinogenicity-of-perfluorooctanoic-acid-pfoa-and-perfluorooctanesulfonic-acid-pfos/> (abgerufen am 23.05.2024).

Lange et al. (2021): Air-drying of soil samples – A crucial step in the determination of leachable concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances, *Chemosphere* 269.

LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2016): PFC – Hintergrundgehalte in Böden, Karlsruhe.

LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2021): Sachstandsbericht: PFAS – in Böden von Bodendauerbeobachtungsflächen, 1. Auflage, Karlsruhe.

Umweltbundesamt: PFAS-Portal. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-reach/stoffe-ihre-eigenschaften/stoffgruppen/pfc-portal-start#strap-74770> (abgerufen am 23.05.2024).



# Sanierung einer Rüstungsalast mittels Constructed Wetland – ehemaliges Sprengstoffwerk „Tanne“ im Oberharz

Annika Peters<sup>1</sup>, Jörg Uhde<sup>2</sup>

Der Artikel wurde erstmalig veröffentlicht im ITVA Altlastenspektrum, Ausgabe 03/2022, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG.

## Inhalt

1. Überblick Standort und Ist-Situation.....	41
2. Gefährdungssituation .....	45
3. Sanierung.....	48
4. Fazit und Ausblick .....	55
5. Literatur.....	56

## 1. Überblick Standort und Ist-Situation

### 1.1 Beschreibung des Standortes und der Gegebenheiten

Das ehemalige Sprengstoffwerk „Tanne“ liegt am südöstlichen Randbereich der Berg- und Universitätsstadt Clausthal-Zellerfeld inmitten der bewaldeten Berglandschaft des Oberharzes. Bei einer Höhenlage von rund 590 m u. NHN zeichnet sich der Standort durch lange, harte Winter und hohe Niederschläge aus. (Scherzhaft sagt man, an der TU Clausthal gäbe es zwei Wintersemester.) Das Areal des ehemaligen Werksgeländes ist etwa 110 ha groß und grenzt im Süden an die Pfauenteichkaskade an, bestehend aus den drei Teichen Unterer, Mittlerer und Oberer Pfauenteich. Diese aus der Harzer Bergbauhistorie stammenden Teiche wurden einst zum Betreiben der technischen Bergbauanlagen (Wasserkünste) angelegt und sind heute Teil des UNESCO-Weltkulturerbes „Oberharzer Wasserregal“, ein Verbund von Teichanlagen, Kanalsysteme und Wasserstollen, die die Energieversorgung (Wasserkraft) der Bergbaubetriebe und Aufbereitungsanlagen sicherstellte und zudem der Wasserabführung aus den Stollen diente.

Der Waldbestand auf dem Gelände des ehem. Sprengstoffwerkes, vorwiegend Fichten, hat in den letzten Jahren aufgrund von Trockenheit und Borkenkäferbefall stark gelitten. Kleinere Bachläufe entwässern das Gelände zum einen in Richtung Westen in die Pfauenteiche und ins Einzugsgebiet der Innerste, zum anderen in Richtung Osten in das Einzugsgebiet der Oker. Der größere Teil des Werksgeländes befindet

---

<sup>1</sup> Annika Peters, Dipl.-Geol., Untere Bodenschutzbehörde Landkreis Goslar, Klubgartenstr. 6, 38640 Goslar, Tel.: 05321 76-671, annika.peters@landkreis-goslar.de

<sup>2</sup> Jörg Uhde, Dipl. Bauing., IABG mbH Niederlassung Berlin, Friedrichstraße 185 Haus E, 10117 Berlin, Tel.: 030/29 39 91-29, Uhde@iabg.de

sich südwestlich der Wasserscheide und ist damit dem Flusssystem Innerste zuzuordnen. Des Weiteren unterfahren mehrere unterirdische Wasserläufe (Wasserlösungsstollen) das Gebiet.

Ein nennenswerter, zusammenhängender Grundwasserkörper ist aufgrund der geologischen Gegebenheiten nicht vorhanden. Im Liegenden stehen vor allem Grauwacken und Tonschiefer der Clausthaler Kulmfaltenzone (Unterkarbon) an, die quasi keine Primärporosität aufweisen, so dass sich die geringe Wasserleit- und Speicherfähigkeit im Wesentlichen auf Klüfte, Störungen und ggf. Schichtflächen beschränkt.

Der Osten des Betriebsgeländes befindet sich in Schutzzone II des Trinkwasserschutzgebietes Hirschler Teich. Der Hirschler Teich befindet sich in ca. 400 m Entfernung südlich des Werksgebietes Tanne. Der Standort ist aufgrund seines Gefahrenpotentials zu einem großen Teil eingezäunt und für Unbefugte nicht zugänglich. Eine Nutzung findet daher zurzeit nur im Rahmen von Jagd- und Forstwirtschaft statt. Ausnahme bildet der nördlichste Teil der Liegenschaft, der planungsrechtlich als Gewerbegebiet ausgewiesen ist und zum Teil, d. h. auf einer Fläche von 14,3 ha, seit 2021 mit einer Photovoltaik-Freiflächenanlage von 16,7 MWp Leistung bewirtschaftet wird.

Seit 1995 wird auf dem Gelände zur Reinigung belasteter Niederschlags- bzw. Sickerwässer eine Sickerwasserreinigungsanlage betrieben. Diese besteht aus zwei Aktivkohlefiltereinheiten, die mit einer Reinigungsleistung von 18 m<sup>3</sup> pro Stunde im Reihenbetrieb bzw. 36 m<sup>3</sup> im Parallelbetrieb arbeiten.

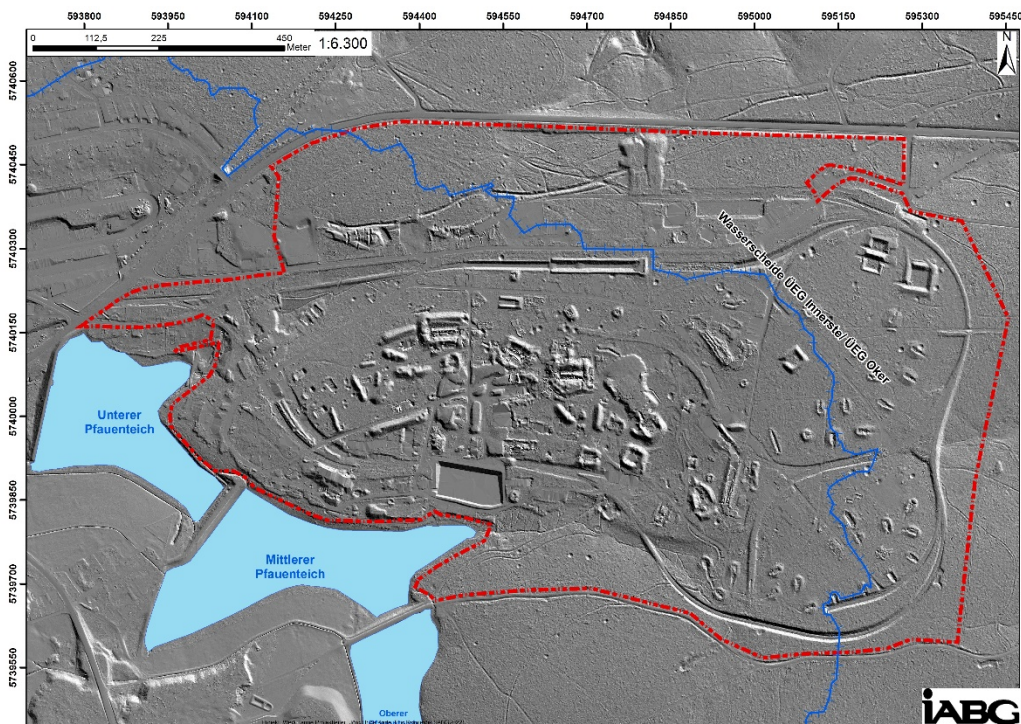


Abb. 1: Lageplan des Werkes; Grundlage: digitales Geländemodell (Quelle: IABG)





Abb. 2: Historischer Lageplan mit Gebäudebezeichnung /-nutzung (Quelle: IABG)

## 1.2 Historie des Werkes

Die jüngere Geschichte des Geländes beginnt etwa um 1930 mit der Errichtung eines Kraftwerkes zur Stromerzeugung durch die Preussag im nahegelegenen Kaiser-Wilhelm-Schacht. Die Turbinen wurden mit Aufschlagwasser aus den Pfaunteichen betrieben.

Die Errichtung der Produktionsanlagen der Sprengstofffabrik mit dem Tarnnamen „Werk Tanne“ begann 1934 und war bereits 1936 abgeschlossen. Diese Fabrik, wie auch einige zeitgleich gebaute, sehr ähnliche Sprengstoffwerke, hatten zunächst nach Fertigstellung den Status der sogenannten „Schläferwerke“, d. h. sie wurden nicht betrieben, sondern nur bereitgehalten, um im Falle konkreter Kriegsvorbereitungen in Betrieb genommen zu werden. Dies war Anfang 1938 der Fall. Das Werk wurde geweckt und die Anlagen weiter ausgebaut, sodass 1939 im Prinzip jede Produktionseinheit redundant vorhanden war, um im Fall von Störfällen, Angriffen oder Sabotage weiterhin produktionsfähig zu bleiben. Anfang 1939 verpachtete die „Verwertungsgesellschaft für Montanindustrie (MONTAN, Tarnfirma des Heereswaffenamts)“ das Werk „Tanne“ an die Dynamit-AG-Tochter „Gesellschaft zur Verwertung chemischer Erzeugnisse (Verwertchemie)“, die den Betrieb aufnahm.

In der ehemaligen Sprengstofffabrik Werk Tanne wurden in den folgenden Jahren von 1939–1945 insgesamt 105.000 t 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) produziert und in Minen, Bomben und Granaten abgefüllt. Zur Abfüllung kamen auch andere Sprengstoffe und an anderen Standorten produziertes TNT. Des Weiteren wurden ca. 1.300 t TNT aus Fehlchargen und Beutemunition in einer Tonsilberanlage aufgearbeitet. Der Höhepunkt war 1943/44 mit einer Produktionsmenge von knapp 28.000 t TNT erreicht.

Nach einem Bombenangriff im Oktober 1944 und allgemeinem Rohstoffmangel geht die Produktion zurück und kommt im Dezember 1944 zum Erliegen, die TNT-Aufbereitung läuft allerdings weiter. Mit der Einnahme von Clausthal-Zellerfeld durch die Amerikaner am 13.04.1945 endet jegliches Produktionsgeschehen. In den Jahren 1947 bis 1949 findet die Demontage und Sprengung der Produktionsanlagen

durch die Alliierten statt. Die Überreste sind heute teilweise noch als Ruinen vorhanden, andere, nicht produktionsrelevante Gebäude bleiben erhalten.



Abb. 3: Fotos vorhandener Gebäude/Ruinen (Quelle: IABG)

### 1.3 Kontamination

Das Gelände des ehemaligen Sprengstoffwerkes Tanne ist in weiten Teilen eingezäunt und unzugänglich. Dies ist begründet durch eine potentielle Gefährdung über den Direktpfad Boden-Mensch aufgrund weit verteilter Schadstoffe im Boden, in ehemaligen Rohrleitungssystemen, in Fundamenten und Gebäuderesten sowie in Klüften des anstehenden Gesteins im Untergrund. Des Weiteren stellt die diffuse, z. T. auch in Hotspots auftretende Kontaminationssituation eine Gefährdung auf dem Gewässerpfad dar. Auf das Gefährdungspotential wird in Kapitel 2 noch näher eingegangen.

Zu den Kontaminationen kam es auf verschiedenen Wegen. Hier sind zum einen Handhabungs-, Umfüll-, Abfüll- und Rohrleitungsverluste während der Produktion zu nennen. Zum anderen wurden infolge mehrerer Explosionen bei verschiedenen Produktionsprozessen sprengstofftypische Schadstoffe (STV) über das Gelände verteilt. Dies war ebenso der Fall bei der Bombardierung im Oktober 1944 als auch bei der Sprengung und Demontage nach Kriegsende. Im Rahmen der Demontage wurden überdies flüssiger Sprengstoff und sprengstoffhaltige Wässer über Entsorgungsleitungen in Richtung Pfauenteiche abgelassen.

Ein weiterer und sehr entscheidender Faktor bei der Verteilung von Schadstoffen – nicht nur auf das unmittelbare Werksgelände beschränkt – war der Umgang mit Produktionsabwässern, die damals ein schwer zu beherrschendes Problem darstellten. Sowohl bei der Aufkonzentrierung von Schwefelsäure als auch bei der erforderlichen Wäsche nach jeder Nitrierungsstufe fielen große Mengen stark säurehaltigen roten und geringer konzentrierten gelben Abwassers an, die mit gelöschtem Kalk nur unzureichend neutralisiert wurden.

Zunächst wurde versucht, die Abwässer über Sickerschächte direkt auf dem Werksgelände zu versenken, was jedoch aufgrund der geologischen Gegebenheiten nicht im nötigen Ausmaß gelang und zudem drohte, die Tarnung des Werkes aus dichtem Tannenbewuchs aufgrund von Pflanzenschädigung zu vernichten. Auch das Anlegen von Sickerschächten im weiter nördlich gelegenen Mönchstal wurde aufgrund geringer Aufnahmekapazität nach kurzer Zeit wieder aufgegeben. Schon in geringer Entfernung traten zudem die Wässer wieder zu Tage und gelangten über Bäche in die Oker, an der bereits der Bau einer Talsperre erfolgte. Als nächste Option wurden die jeweils ca. 2,5 km entfernten Lange-Teich und Polstertaler Teich als Speicherbecken genutzt und die dunkelroten Abwässer mittels Druckleitung dorthin gepumpt. Die Speicherkapazität der beiden Teiche war binnen weniger Monate ausgeschöpft, sodass als nächste „Lösung“ eine Ableitung in die Vorfluter eingerichtet wurde, nämlich in das Flusssystem Söse, Rhume, Leine – zunächst über eine 9 km lange Abwasserleitung und streckenweise Kanalisation der Großen Bremke. Außer einem Fischsterben kam es zu zahlreichen Beschwerden von Anrainern und Nutzern der Flüsse, sodass die Leitung um 7 km in Richtung Osterode verlängert wurde, um einen Teil der Abwässer über Schluckbrunnen bei Petershütte in den Zechsteinkarst zu versenken.

Während sich die Abwassermengen zu Beginn der Produktion auf 3.500 m<sup>3</sup>/Monat bezifferten, fand bis Ende 1940 eine Steigerung auf max. 70.000 m<sup>3</sup>/Monat statt. Insgesamt mussten 5,4 Mio m<sup>3</sup> Abwasser entsorgt werden. Die aus der Neutralisation mit Kalk anfallenden Schlämme wurden zeitweise direkt in die angrenzenden Pfauenteiche entsorgt, später auch mittels Tankwagen in das Stadtgebiet von Clausthal verbracht und in einen damaligen Teich unweit des damaligen Ostbahnhofs verklappt.

#### **1.4 Verantwortlichkeiten, Pflichtige, Eigentümer, Vergleichsvertrag und Folgevereinbarung**

Die IVG Immobilien GmbH als Rechtsnachfolger der MONTAN schloss 2014 mit dem Land Niedersachsen, vertreten durch das Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU), einen Vergleichsvertrag zur abschließenden Beteiligung der IVG an den Untersuchungs- und Sanierungskosten an den Standorten der früheren MONTAN in Niedersachsen und stellte ein Budget für die Durchführung von Altlastenmaßnahmen für die nächsten 15 Jahre zur Verfügung.

Die IVG verkaufte u. a. den Standort „Werk Tanne“ an die Halali Verwaltungs GmbH. Mit Verkauf erfolgte der Abschluss einer Folgevereinbarung zwischen Halali und MU zur Regelung der altlastenbedingten Kosten.

Zur Abwicklung der Untersuchungs- und Sanierungsmaßnahmen auf den Eigentumsstandorten wurde eine fachliche Projektsteuerung beauftragt, die durch die IABG mbH NL Berlin (IABG) wahrgenommen wird. Die altlastenbezogenen Maßnahmen werden eng mit der unteren Bodenschutzbehörde (uBB) des Landkreises Goslar abgestimmt.

## **2. Gefährdungssituation**

Wie oben bereits angerissen, besteht ein Teil des Gefährdungspotentials durch die potenzielle Aufnahme von Schadstoffen auf dem Direktpfad Boden–Mensch. Durch die Einzäunung und Nichtnutzung des Geländes kann dieser Gefahr jedoch relativ einfach begegnet werden.

Das größere und schwerer zu beherrschende Gefährdungspotential besteht in der Mobilisierung und Verfrachtung von Schadstoffen mit dem Sickerwasser. Durch die flächige und inhomogene Verteilung der Kontaminanten über einen Großteil des Areals werden mit versickernden Niederschlägen unterschiedlich

große Menge sprengstofftypischer Verbindungen gelöst und transportiert. Die Fließwege des Sickerwassers werden dabei zum einen durch natürliche Wegsamkeiten wie Klüfte und Auflockerungsbereiche bestimmt, zum anderen durch das weit verzweigte und nicht vollständig erkundbare System aus Drainagen, Rohrleitungen und Schächten. Nur vereinzelt waren Hotspots festzustellen, die mittels Dekontamination saniert werden konnten.

Das Schadstoffspektrum der auf Werk Tanne wesentlichen STV umfasst neben Trinitrotoluol auch verschiedene Ausgangsstoffe sowie Zwischen- und Abbauprodukte wie Dinitrotoluole, Mononitrotoluole, Amino-Dinitrotoluole und Trinitrobenzol. Von den polaren sprengstofftypischen Verbindungen (pSTV), die sowohl Nebenprodukte der Produktion als auch Transformationsprodukte sind, treten vor allem Trinitrobenzoesäure, Dinitrobenzoesäuren, Amino-Dinitrobenzoesäuren sowie Dinitrosulfonsäure auf. Auch Hexogen, ein nicht auf dem Standort hergestellter, aber in Granaten/Bomben abgefüllter Sprengstoff, ist festzustellen.

Die vielfältige Gruppe der sprengstofftypischen Verbindungen und Metabolite zeichnet sich durch ein weites Spektrum an unterschiedlichen öko- und humantoxikologischen Eigenschaften, Mobilitäten und Abbaubarkeiten aus. Die in der ungesättigten Zone verteilten Schadstoffe durchlaufen bei Auswaschung, Transport und Verweilzeit in den unterschiedlichen Medien unterschiedliche Transformationsprozesse und verändern dabei ihre Eigenschaften. Die entstehenden Transformations- und Zwischenprodukte sind dabei mitunter nicht weniger schädlich als die Ausgangsstoffe.

Als sehr mobile Stoffe stellen die polaren STV eine besondere Gefährdung für das abströmende Sicker-, Grund- und Oberflächenwasser dar. Die jeweils vorherrschenden Bedingungen bestimmen, welche Prozesse ablaufen. In Kapitel 3.2 werden anhand der laufenden Sanierungsmaßnahme die wichtigsten Abbauprozesse erläutert, derer man sich für die Sanierung bedient.

Durch eine Wasserscheide wird das Gelände in zwei übergeordnete Wassereinzugsgebiete (ÜEG) eingeteilt: das südwestliche Einzugsgebiet der Innerste und das nordöstliche Einzugsgebiet der Oker. Zur Differenzierung und Gefährdungsabschätzung wurden diese beiden übergeordneten Einzugsgebiete in eine Reihe Teileinzugsgebiete unterteilt (TEG), für die jeweils die mit dem Sickerwasser anfallende Schadstofffracht betrachtet wurde. In Abbildung 4 stellen die unterschiedlich gefärbten Bereiche die Lage der einzelnen TEG dar.

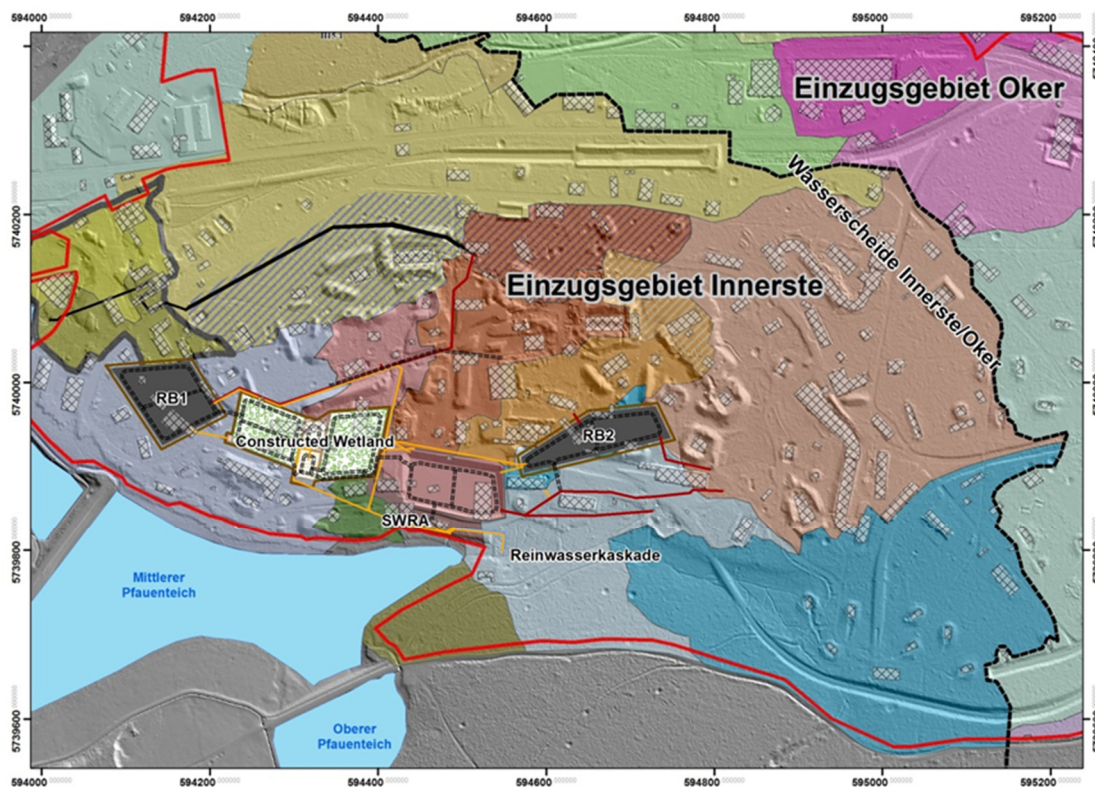


Abb. 4: Lage der Teileinzugsgebiete (TEG) und Sanierungsanlagen (Quelle: IABG)

Im Ergebnis ließen sich Bereiche bzw. TEG mit dringendem Handlungsbedarf von anderen mit weniger Gefährdungspotential differenzieren. Die TEG des größeren ÜEG Innerste wiesen die höheren Gefahrstofffrachten auf, die aufgrund der Entwässerung in den Mittleren und Unteren Pfaunteich für eine Belastung der Teiche sorgten. Vom zentralen Bereich (TEG „SWRA“) wurde bereits in der Vergangenheit eine erhebliche Abstromfracht von Schadstoffen festgestellt, sodass der Abstrom aus diesem Bereich bereits gefasst und seit 12/1995 in einer Aktivkohlefilteranlage gereinigt wird (siehe auch Kap. 3.1). Die Pfaunteiche besitzen insofern eine gewisse Relevanz für die Trinkwassergewinnung, als dass aus ihnen der Zellbach entspringt, der in die Innerste mündet, welche südwestlich von Langelsheim am Nordharzrand angestaut und temporär per Überleitung zur Ergänzung der Trinkwassersperre Granestausee genutzt wird. Relevante Gehalte an STV oder gar eine Gefährdung der Trinkwasserqualität wurden aber selbst in der Vergangenheit, bevor die ersten Sanierungsmaßnahmen auf Werk Tanne ergriffen wurden, nicht festgestellt.

Als TEG mit hoher Gefährdung wurden diejenigen definiert, bei denen in einer 2016 durchgeführten Gefährdungsabschätzung Sickerwasserkonzentrationen festgestellt wurden, die das 100-Fache der Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) überschreiten (wobei nur für eine geringe Anzahl an Stoffen aus der Gruppe der STV GFS festgelegt sind) bzw. deren Jahresfracht höher als 2,21 kg liegt, der theoretisch zulässigen Maximalfracht der 1995 gebauten Sickerwasserreinigungsanlage mit Aktivkohlefilter.

Überschreitungen dieser Maßstäbe waren insbesondere im westlichen und zentralen Bereich des Werkgeländes (ÜEG Innerste) der Fall. Darum wurde in 2019 ein Sanierungsplan für verbindlich erklärt, um weitere Einträge von Schadstoffen aus diesem Bereich in die Pfaunteiche zu minimieren. Der Sanierungsplan beinhaltet den Bau zweier Anlagen bestehend jeweils aus einem Puffer- bzw. Rohwasser-, Reaktions- und Sedimentationsbeckens sowie Constructed Wetland. Der Bau der ersten Anlage ist erfolgt – sie befand sich von November 2020 bis Ende April 2022 im Probetrieb. Die nähere Beschreibung der Maßnahme erfolgt in Kap. 3.2.

### 3. Sanierung

#### 3.1 Bisher umgesetzte Maßnahmen

In der nachfolgenden Tabelle sind die vor Beginn der Sanierung des ÜEG Innerste durchgeführten wichtigsten altlastenrelevanten Maßnahmen aufgeführt.

Tabelle 1: durchgeführte altlastenrelevante Maßnahmen

Zeitraum	Maßnahme
1970-77, 1988	Räumkampagnen des KBD
ab 1988	diverse Altlasten-Gutachten (HE, OU auf verschiedenen Teilflächen, GA, hydrogeologische Untersuchungen)
1993-1995	Planung und Errichtung einer Sickerwasserreinigungsanlage (SWRA) mit Aktivkohle, Inbetriebnahme 12/1995
1994-96	verschiedene Forschungsprojekte zur Entwicklung und Erprobung von mikrobiologischen Sanierungsverfahren
2005-2006	Planung und Sanierung im Bereich SD1 (Auskoffnung und Entsorgung von rd. 6.000 t hoch kontaminiertem Bodenmaterial)
2006/2007	Machbarkeitsstudien zur Sanierung von STV-kontaminiertem Wasser
2007	Konzept zu Sanierungsuntersuchungen TEG D4a, Errichtung einer Staumauer im Fortuner Wasserlauf zur Trennung von kontaminierten Teilströmen, Bau von Durchflussmessstellen
ab 2007	Monitoring der Schadstoffausträge aus der Liegenschaft
2008/2009	Pilotversuche zur Sanierung von STV-belastetem Wasser
2010-2012	Planung und Errichtung eines 15.000m <sup>3</sup> Pufferbeckens für die SWRA
2011/2012	Sanierung von Schlammfächern am MPT und UPT (Entsorgung von 10.000 t kontaminierten Neutralisationsschlämmen aus dem Werk Tanne)
2015/2016	Abschließende Gefährdungsabschätzung Werk Tanne
2016	Sanierung eines MNT/ DNT- Hotspot (HS) im sog. Dreiecksbecken (ehem. Klärbecken des Werkes „Tanne“ DB) im Unteren Pfauteich
2019	Sanierungsplan zur Sanierung des ÜEG Innerste, Verbindlichkeitserklärung 05/2019
2019/2020	Sanierung ÜEG Innerste, Bauphase I: Errichtung RB1, CW1, RWK
2020-2022	Probetrieb der Sanierungsanlagen Bauphase I (17 Monate)
2022	Sanierung ÜEG Innerste, Bauphase II: Errichtung RB2, CW2 (seit 06/2022)

#### 3.2 Laufende Sanierungsmaßnahme – Constructed Wetland

Der Sanierungsplan für die laufende Maßnahme wurde federführend von der IABG erstellt und von der verfahrensführenden Unteren Bodenschutzbehörde des Landkreis Goslar im April 2019 für verbindlich erklärt. Für die Planung der Rückhaltebecken wurde das Ingenieurbüro Dommnich (Goslar) und des Constructed Wetlands die VITA34/ Bergmann AG beauftragt. Die Fachplanungen wurden von weiteren Büros und zum Teil vom Landkreis Goslar (FFH, UVVP) erstellt.

Mit den vorbereitenden Arbeiten wie Baustelleneinrichtung, Stubbenrodung und Rückbau vorhandener Gebäude wurde im Frühjahr 2019 begonnen. Der Bodenaushub zur Herstellung der Becken wurde im Frühjahr 2020 abgeschlossen. Es folgte die Foliendichtung der Becken, Schaffung der Infrastruktur und schließlich Bepflanzung des Constructed Wetlands mit 28.000 Schilfpflanzen der Gattung Phragmites australis. Im November 2020 begann die Inbetriebnahme, d. h. der Probetrieb mit einer Mindestlaufzeit von

einem Jahr. Diese Probephase diente der Beobachtung der Abbauleistung sowie Justierung und Optimierung der Anlage, bevor der Startschuss zum Bau der zweiten, baugleichen Anlage Anfang Mai 2022 fiel.

### 3.2.1 Sanierungsziele

Folgende qualitativen und quantitativen Sanierungsziele waren Grundlage für die Planung und Errichtung der Sanierungsanlagen:

#### **qualitative Sanierungsziele**

- weitgehende Fassung und Reinigung der höher belasteten Sickerwässer (> 100-fach GFS)
- Entlastung und Nutzung des bestehenden Pufferbeckens
- Vorrang für nachhaltige Sanierungsverfahren
- Rückhaltung von Niederschlagspitzen
- Nachreinigung durch eine Reinwasserkaskade
- Einhaltung definierter Zielwerte am Einleitpunkt
- Einbeziehung des nachgewiesenen Abbaupotenzials der Pfaunteiche
- Einhaltung definierter Zielwerte am Auslauf des Unteren Pfaunteiches in den Zellbach
- Sickerwasserminderung durch Aufforstung aller Freiflächen

#### **quantitative Sanierungsziele**

- Einhaltung der festgelegten Einleit- bzw. Überwachungswerte an der Einleitstelle (D7/Ablauf RWK), d. h. Summe 6 STV 7 µg/l, Summe pSTV 30 µg/l, zzgl. Einhaltung vorgegebener ökotoxikologischer Werte

### 3.2.2 Sanierungskonzept

Wie oben bereits ausgeführt, sind Weg und Ziel der Sanierung, das mit Schadstoffen belastete Sickerwasser zu fassen, zu reinigen und am Ende den Pfaunteichen wieder zuzuführen. Dasselbe Ziel liegt auch der bestehenden Sickerwasserreinigungsanlage mit Aktivkohlefilter zugrunde. Diese bringt jedoch den Nachteil von hohen Betriebskosten aufgrund von Energiekosten, Wartungsaufwand und Kohlewechsell mit sich. Da bei der Behandlung belasteter Sickerwässer aus dem Standort Werk Tanne damit zu rechnen ist, dass sich die Schadstoffnachlieferung über Generationen hinweg fortsetzen wird, war bei der Betrachtung verschiedener Sanierungsvarianten das Hauptaugenmerk auf Nachhaltigkeit, d. h. möglichst niedrige Betriebs- und Unterhaltungskosten, gerichtet.

Bei der rein gravitativen Wasserführung (Freigefälle), der wartungsarmen Bau- bzw.- Betriebsweise und durch den Wegfall von regelmäßig zu tauschender Aktivkohle stellt sich die gewählte Kombination aus Puffer- bzw. Rohwasserbecken und Wetland trotz hoher Investitionskosten als die langfristig kostengünstigere Variante dar. Die Betriebskosten beschränken sich auf einen niedrigen Energiebedarf für eine Melassepumpe sowie Mess- und Regeltechnik, regelmäßige Sichtkontrollen, eine gelegentliche Mahd der Schilfpflanzen und eventuell nach ca. 10 oder mehr Jahren einen Wechsel der Eisen-Kies-Kulisse.

Um das natürliche Gefälle nutzen zu können und um für alle Systemkomponenten einen Standort mit geeignetem Höhenniveau zu finden bzw. herzustellen, war eine sehr anspruchsvolle Vermessungs- und

Planungsarbeit im Vorfeld nötig. Aufgrund von Konflikten mit Bestandteilen des Weltkulturerbes Oberharzer Wasserregal musste die bevorzugte Standortvariante im Laufe der Planung auch noch einmal komplett überarbeitet werden.

Vereinfacht zusammengefasst werden in dieser Anlage bei der Passage der hintereinandergeschalteten Becken unterschiedliche Bedingungen im Sickerwasser hergestellt und ausgenutzt, die benötigt werden, um diverse verschiedene Prozesse zum Abbau sowie zur Bindung der STV einzuleiten und ablaufen zu lassen.

## Anlagenschema Längsschnitt

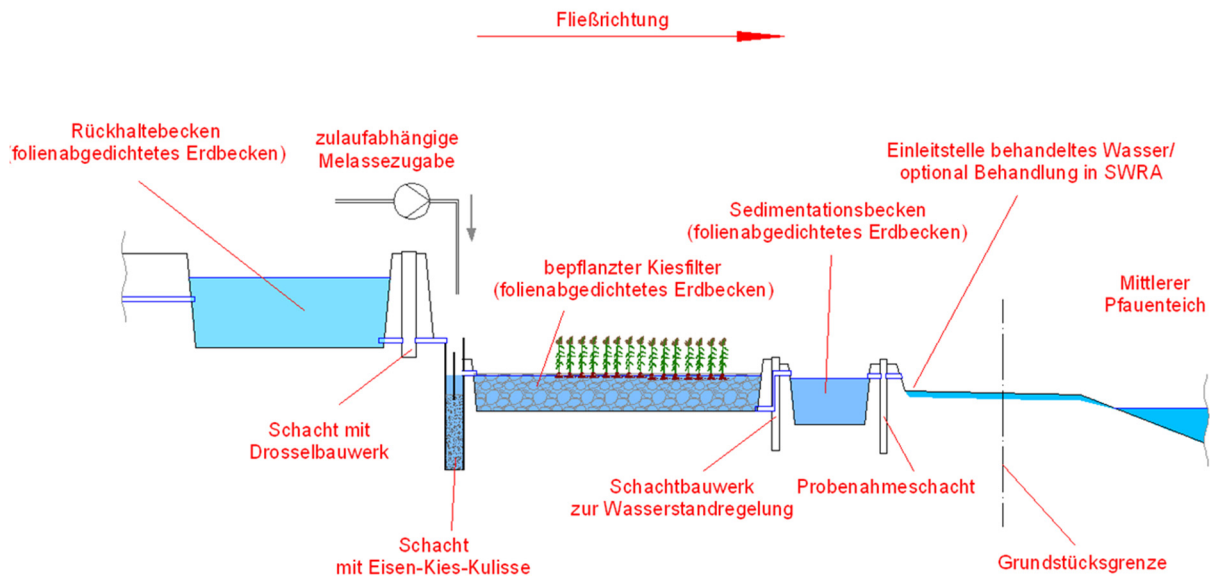


Abb. 5: Anlagenschema (Quelle: IABG)

### 3.2.3 Funktionsweise im Einzelnen: Rohwasserbecken, Reaktionsbecken, Constructed Wetland, Sedimentationsbecken, Reinwasserkaskade

#### Pufferbecken & Rohwasserbecken (RB)

Mittels eines Riegels aus Drainageleitungen, in die alte Abwasser- und sonstige Leitungen eingebunden sind, wird das aus den belasteten Bereichen abströmende Sickerwasser gefasst und dem ersten Becken der Kaskade, dem Puffer- bzw. Rohwasserbecken 1 (RB1) zugeleitet. Dieses trapezförmige foliengedichtete Erdbecken hat eine Grundfläche von 8.600 m<sup>2</sup> und kann bei einer maximalen Einstauhöhe von 2,85 m ein Volumen von 15.000 m<sup>3</sup> Wasser fassen. Bei der Dimensionierung des Beckens spielte außer der prognostizierten Wasseranfallsmenge bei Starkregenereignissen die beabsichtigte Ausnutzung von photolytischen Abbauprozessen eine Rolle. Einige der Hauptvertreter der mit dem Sickerwasser mobilisierten Schadstoffe, das TNT und die Dinitrotoluole, werden gut und relativ schnell durch Sonnenlichteinwirkung oxidativ in Tri- bzw. Dinitrobenzoesäuren transformiert. Daher wurde eine große Fläche und geringe Tiefe für die Gestaltung des Pufferbeckens gewählt. Bei einer Verweilzeit von einigen Tagen, die selbst bei Volllast gegeben ist, findet je nach klimatischen Bedingungen und Konzentrationen im Zulauf im Pufferbecken bereits ein Abbau von 50 bis über 90 % der unpolaren STV statt. Ist die Wasseroberfläche im Winter jedoch mit Eis und Schnee bedeckt, sodass die Sonnenstrahlen die Wassersäule nicht erreichen, kommt der photolytische Abbau nahezu zum Erliegen. Auch mikrobiologische Abbauprozesse finden im Pufferbecken statt, wie dies auch in natürlichen Oberflächengewässern nachzuweisen ist.



Typischerweise liegen die Zulaufkonzentrationen der STV in Summe zwischen 300 und 400 µg/l, es werden zeitweise aber auch Spitzen von über 600 µg/l erreicht. Die Konzentration an pSTV liegt in der Regel bei 30 bis 60 µg/l. Am Ablauf des Rückhaltebeckens wird mittels Drossel das Wasser mit maximal 18 m<sup>3</sup>/h dem Reaktionsbecken zugeleitet.



Abb. 6: Drohnensicht der Anlage im September 2021: im Vordergrund Rohwasserbecken 1, Bildmitte Wetland 1, kleines Becken dahinter Sedimentationsbecken 1; (Quelle: Landkreis Goslar)

### Reaktionsbecken

Das Reaktionsbecken ist ein erdverbautes Betonbecken der Abmessungen 3 x 6 m und 5,5 m Tiefe. Eine Tauchwand trennt das Becken in zwei Kammern auf. Diese sind mit 36 m<sup>3</sup> einer Eisengranulat-Kiesmischung gefüllt. Dem zufließenden Wasser aus dem Rückhaltebecken wird durchflussabhängig und automatisch Melasse zugesetzt. Bei Vollast, also einem Durchsatz von 18 m<sup>3</sup> Wasser pro Stunde, werden 1,8 l Melasse pro Stunde zugegeben. Hierdurch und während der ca. 40-minütigen Passage des Kiesfilters entstehen reduzierende Bedingungen und findet eine Anreicherung mit Eisen statt. Anschließend wird das konditionierte Wasser über einen Verteiler auf der gesamten Breite des Constructed Wetlands in dieses eingeleitet.

### Constructed Wetland

Beim Pflanzenklärbecken handelt es sich um ein foliengedichtetes Erdbecken auf einer Fläche von 3.630 m<sup>2</sup>. Das Becken ist mit einer 80 cm mächtigen Kiespackung gefüllt, in welchem die Bepflanzung mit 7 Schilfrhizomen pro m<sup>2</sup> erfolgte, d. h. rd. 28.000 Pflanzen insgesamt. Das Kiesbett befindet sich permanent unter ca. 10 cm Einstau.

Durch die Schaffung von reduzierenden Bedingungen im Reaktionsbecken wird eine mikrobiell und/ oder chemisch reduktive Transformation von noch im Wasser vorhandenen Schadstoffen ermöglicht, bei denen es sich zum Teil auch um die Abbauprodukte der photolytischen Oxidation aus dem RB1 handelt. Günstig für die reduktiven und mikrobiellen Prozesse wirkt sich dabei der hohe Anteil verfügbaren Kohlenstoffs durch die Melassezugabe aus. Die Zusammensetzung und das Mengenverhältnis der sprengstofftypischen

Verbindungen hat sich gegenüber dem gefassten Sickerwasserzulauf bis zu diesem Punkt schon erheblich verändert. Weitere im Wetland, insbesondere im Wurzelraum der Pflanzen stattfindende Prozesse, sind der mikrobiell und chemisch oxidative Abbau, der im Wesentlichen durch Sauerstoff initiiert wird, den die Pflanzen über die Wurzeln abgeben. Darüber hinaus findet eine Humifizierung bzw. Einbau in Huminstoffe statt, wodurch die Schadstoffe irreversibel gebunden werden und ihre Giftigkeit verlieren. In Wechselwirkung mit dem Substrat und den Mineralstoffen im Kiesbett tritt eine weitere Bindung von STV ein. Die Schadstoffe sind damit dem weiteren Transport und dem Wasserkreislauf entzogen. Eine Anreicherung von Schadstoffen innerhalb der Pflanzen findet nicht in einem nennenswerten Umfang statt. Es ist davon auszugehen, dass der Schadstoffgehalt in der Biomasse so gering ist, dass das Mahdgut kompostiert und verwertet werden kann. Dieser Sachverhalt ist natürlich bei der erstmaligen Mahd analytisch zu verifizieren.

Ist infolge der Transformationsprozesse der aromatische Ring der Nitroaromaten gespalten worden, so kann idealer Weise eine vollständige Mineralisierung stattfinden, deren Endprodukte  $\text{CO}_2$ , Stickstoff und Wasser sind. Nach einer theoretischen Verweilzeit von gut 2 Tagen verlässt das gereinigte Wasser das Wetland in Richtung Sedimentationsbecken.



Abb 7: Foto Rohwasserbecken (RB1)  
(Quelle: Landkreis Goslar)



Abb 8: Foto Constructed Wetland (CW1) im Mai 2022

### Sedimentationsbecken

Dieses nachgeschaltete, foliengedichtete Erdbecken kleineren Ausmaßes (knapp  $300 \text{ m}^2$ ) dient der Abscheidung eventuell überschüssigen Eisens, mit welchem das Wasser im Reaktionsbecken angereichert wurde. Von hier aus gelangt das gereinigte Wasser nach einer verrohrten, unterirdischen Fließstrecke von ca. 250 m in die Reinwasserkaskade.

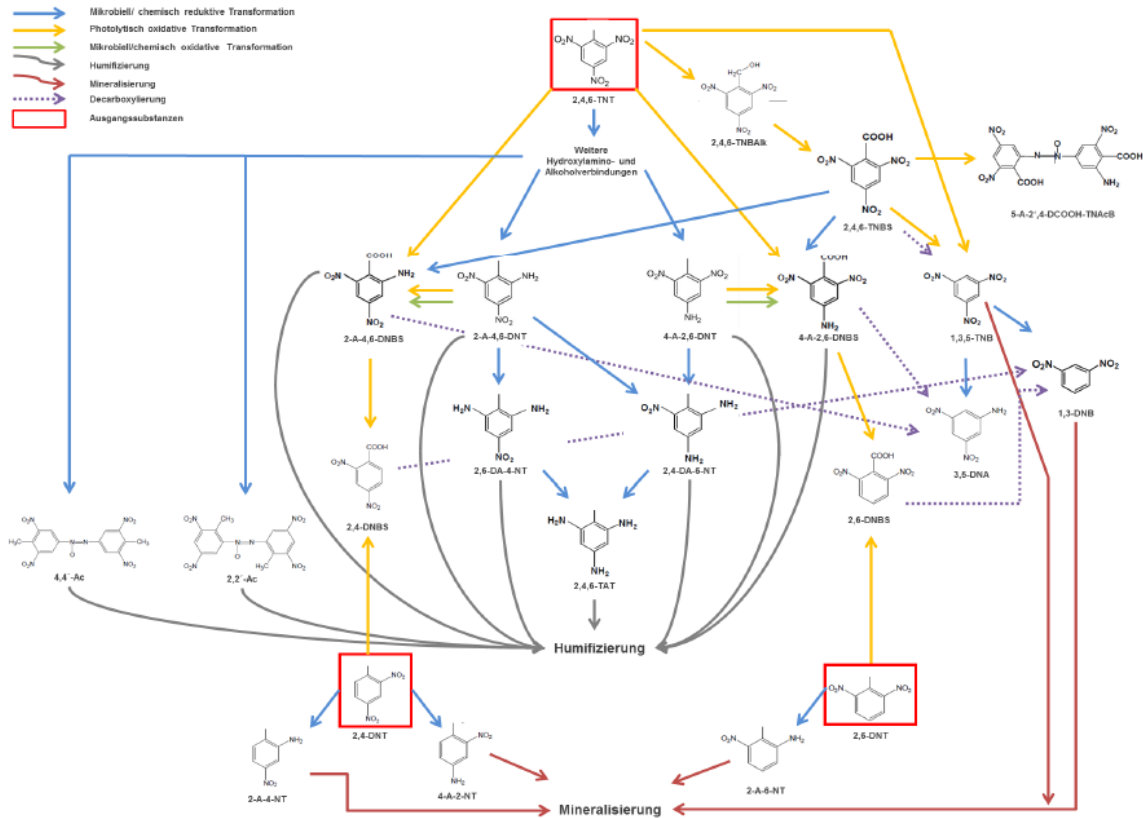


Abb. 09: Übersicht aller Abbaupfade (mikrobiell/ chemisch reaktiv und oxidativ sowie photochemisch oxidativ) von TNT und DNT

(nach (Anjum et al. (2017), (Bruns-Nagel et al. (2000), (KORA, Joos et al. (2008) & (Spangord et al. (1983))



Abb. 10: Foto Sedimentationsbecken (SB1) (Quelle: IABG)

### Reinwasserkaskade

Die Reinwasserkaskade als Auslaufbauwerk zwischen Reinigungsanlagen und Einlauf in den Mittleren Pfautenteich besteht aus 27 Betonbecken der Abmessungen 1,8 x 3 m, mittig jeweils mit einer Tauchwand versehen. In diese treppenförmig angeordneten Becken gelangt neben dem Wasser aus dem Wetland auch der Ablauf aus der Sickerwasserreinigungsanlage. Außer einer Belüftung findet in der Reinwasserkaskade auch weiterhin ein Abbau der Residualbelastung statt. Überdies besteht die Möglichkeit – für den Fall, dass

die Reinigungsleistung der Anlagen sich als nicht ausreichend herausstellt – Kompost in die Becken einzubauen und damit die Festlegung von Schadstoffen an organischer Matrix zu bewirken.



Abb. 11: Foto Reinwasserkaskade (RWK) (Quelle: IABG)

### 3.3 Probetrieb

Bereits in der Planung und Verbindlichkeitserklärung wurde festgelegt, nach Inbetriebnahme der ersten Anlagenstufe die Funktionsweise und Wirksamkeit mindestens ein Jahr lang zu beobachten und in Hinblick auf die Einhaltung der festgesetzten Einleitwerte auszuwerten. Bei positivem Ergebnis würde der Bau der zweiten, baugleichen Anlagenstufe begonnen.

Als wichtigstes Kriterium zur Beurteilung der Anlagenleistung sind die behördlich festgelegten, vorläufigen Einleitwerte heranzuführen. Diese wurden bereits im Zusammenhang mit der SWRA in 2010 vom zuständigen NLWKN festgelegt. Danach darf der Summenparameter „6STV“ (2-NT, 2,4-DNT, 2,6-DNT, 2,4,6- TNT, 2-A-4,6-DNT,4-A-2,6-DNT) den Wert von 7 µg/l nicht überschreiten. Bei den polaren STV beträgt der Summenwert 30 µg/l. Nach Abschluss der Probephase und Auswertung der Daten ist vorgesehen, die Einleitwerte neu festzulegen – idealerweise als Einzelwerte. Der Probetrieb wurde fachgutachterlich durch die IABG begleitet. Es fand in dieser Phase eine engmaschige Kontrolle und Probenahme (zeitweise wöchentlich) statt. Die Analytik erfolgte durch das akkreditierte Labor SGS Analytics Germany GmbH, Markkleeberg.

Seit dem Beginn des Probetriebs am 24.11.2020 hat sich bis auf einen Ausreißer zu Beginn und einen Zwischenfall Ende Januar 2022 eine gute Reinigungsleistung der Anlage bestätigt. Im Januar 2022 kam es aufgrund einer Panne zu einer 11-tägigen Unterbrechung der Melassezudosierung. Gleichzeitig wurden jedoch auch hohe Konzentrationen an Schadstoffen, hohe Niederschläge und widrige Witterungsverhältnisse verzeichnet. Eine eindeutige Ursache für die Überschreitung der Einleitwerte lässt sich daher nicht finden. Jedoch belegen die ermittelten Folgewerte bei unverändert hohen Frachten und nur geringfügig besseren Wetterverhältnissen, dass die Reinigungswirkung grundsätzlich gegeben ist.

Hinsichtlich der Justierung der Anlagenparameter gibt es noch eine Reihe von „Stellschrauben“, anhand derer die Abbauleistung den jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden kann. Zu nennen sind hier zum einen die Drosselung des Durchflusses vom RB1 in das Wetland, um die Verweilzeit und damit die Ausnutzung photolytischer Prozesse zu erhöhen. So könnte in Zeiten strengen Frosts, in denen die Sonneneinstrahlung durch eine oberflächliche Eisschicht behindert wird, der Durchfluss minimiert werden, da eine Überschreitung der Beckenkapazität in dieser Phase nicht zu erwarten ist (sondern erst bei Schneeschmelze die steigenden Wasserstände im Auge zu behalten und der Durchfluss zu erhöhen sind).

Als weitere Stellschraube ist die Zugabemenge der Melasse zu nennen. Der Wert von 1,8 l pro Stunde bei einem Durchsatz von 18 m<sup>3</sup> beruht auf Hochrechnungen der Erfahrungswerte aus dem Pilotversuch. Dass infolge des Upscaling andere Werte eine bessere Abbauleistung bewirken würden, ist möglich und kann ausprobiert werden.

Die Zusammensetzung des Pflanzenbestands im Wetland bietet ebenfalls weitere Möglichkeiten der Optimierung. Während bei den gesetzten *Phragmites australis* eine Art Winterschlaf mit nahezu keiner biologischer/photosynthetischer Aktivität zu verzeichnen ist, wurde inzwischen festgestellt, dass sich – vermutlich über Luftversamung – eine weitere Pflanzenart, eine Binse, im Kiesbett des Wetland angesiedelt hat. Bei dieser immergrünen Pflanze findet anscheinend ganzjährig ein Umsatz statt, sodass sich diese Art als Ergänzung im Pflanzenklärbecken als förderlich herausstellen könnte. Um dies herauszufinden und die mögliche Gefahr der Verdrängung von *Phragmites* zu untersuchen, gibt es eine Kooperation mit dem Botanischen Institut der Leibniz-Universität Hannover. Im Rahmen seiner Masterarbeit befasst sich der Student außerdem mit den Nährstoff- und Abbaubedingungen der Pflanzen im Wetland und der mikrobiellen Besiedelung. Dies soll insgesamt dazu beitragen, die verschiedenen Prozesse und Bedingungen im Wetland beim Abbau der Schadstoffe besser zu verstehen und entsprechend steuern zu können.

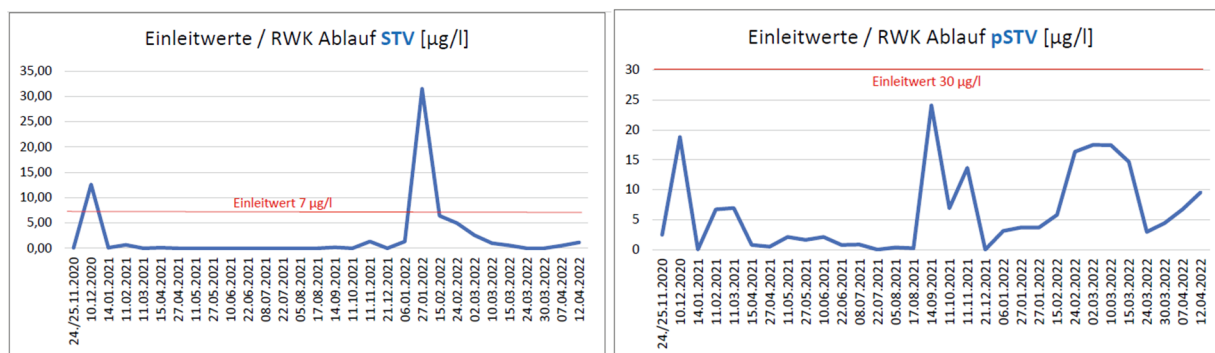


Abb. 12: Einleitwerte/erreichte Reinigungsleistung (Quelle: IABG)

#### 4. Fazit und Ausblick

Der Vorteil einer Kombination aus biotischen und abiotischen Abbauvorgängen liegt in der relativ witterungsunabhängigen Wirksamkeit. Zwar ist der photolytische Abbau der Schadstoffe im Pufferbecken bereits hoch effizient, jedoch begrenzt auf die frost- und schneefreie Periode, wohingegen genau in diese Periode die niederschlagsreichsten Monate fallen. Daher stellt ein Constructed Wetland eine gute Möglichkeit dar, auch in dieser Zeit eine zuverlässige Reinigung der Sickerwässer zu gewährleisten. In einer Studie in 2008/2009 konnte in einem Pilotversuch mit einer Pilotanlage gezeigt werden, dass auch unter den klimatischen Bedingungen des Oberharzes eine effiziente Transformation und Abtrennung der Nitroaromaten in dieser Anlagenkonstellation stattfindet und kein signifikanter Unterschied zwischen

Sommer- und Winterbetrieb festzustellen ist. Die während des Probetriebs gewonnenen Daten scheinen dies auch bei einer großmaßstäblichen Anlage zu bestätigen.

Der Probetrieb des ersten Beckenpaares (Spreicherbecken + Constructed Wetland) verlief erfolgreich. Das angewendete Verfahren zur Abreinigung STV-belasteter Sickerwässer hat sich bewährt. Die qualitativen und quantitativen Sanierungsziele wurden erreicht. Somit kann auch für die geplanten Sanierungsanlagen ein erfolgreicher Anlagenbetrieb mit guten Reinigungsleistungen prognostiziert werden. Das zweite Beckenpaar mit dem RB2 und CW2 wird errichtet, um weitere hoch belastete TEG zu fassen und damit die Gesamtalblastensituation auf der Rüstungsalblast Werk „Tanne“ weiter und auch nachhaltig zu verbessern. Nach einem erfolgreichen Probetrieb des zweiten Beckenpaares und anhand der Erfahrungen aus der sich anschließenden Nachsorgephase soll das gesamte Sanierungssystem des Rüstungsalblaststandortes Werk „Tanne“ weiter optimiert werden, um die vorhandene, mit hohen Kosten betriebene Sickerwasserreinigungsanlage abstellen zu können und weitere, geringer belastete Teileinzugsgebiete zu erfassen. Zudem soll die nachhaltige Nachnutzung des Standortes u. a. durch die Errichtung von Photovoltaikanlagen auf den sanierten Flächen intensiviert werden.

*An dieser Stelle möchten wir, das gesamte Projektteam zur Realisierung der Sanierung, an unseren lieben Kollegen und Freund, Guido Hingst, erinnern, den „guten Geist“ vom Werk „Tanne“, der vor einem Jahr nach schwerer Krankheit verstarb. Er war über 30 Jahre lang bei der IABG im Altlastenbereich tätig. Seit 1995 betreute und leitete er eine Vielzahl von Projekten am Rüstungsalblaststandort „Tanne“ und war somit maßgebend bei der Vorbereitung und Verwirklichung der Sanierung. Wir werden ihn nie vergessen und die Sanierung in seinem Geiste erfolgreich zu Ende führen.*

## 5. Literatur

- Hingst, G., Uhde, J. (2019): Sanierungsplan Werk „Tanne“ in Clausthal Zellerfeld  
KORA-Themenverbund 5 – Rüstungsalblasten (2008): Leitfaden; Natürliche  
Schadstoffminderungsprozesse bei sprengstofftypischen Verbindungen
- Braedt, M., Hörseljou, H., Jacobs, F., Knolle, F. (1998): Die Sprengstofffabrik „Tanne“ in Clausthal-  
Zellerfeld
- Hingst, G., Radig, J. (2019): Studie zur Untersuchung der Abbauege der Explosivstoffe im  
Pufferbecken der SWRA – Werk „Tanne“, Clausthal-Zellerfeld
- BioPlanta (2009): Pilotversuch für die Behandlung des STV-belasteten Wassers aus dem Fortuner  
Wasserlauf
- IABG/VITA34 (2015): Variantenuntersuchung für die Behandlung von STV-belasteten Wässern aus dem  
Teileinzugsgebiet östlich der SWRA (D4a, D7a, S12D und diffuse Hangwässer)
- BioPlanta/VITA34 (2017): Vorplanung in Vorbereitung des Sanierungsplans zum TEG Innerste auf dem  
Gelände der Rüstungsalblast Werk Tanne in Clausthal-Zellerfeld: Untersuchungen für die Behandlung  
von STV-belasteten Wässern in einem CW aufbauend auf der Sanierungsvorplanung der IABG
- IABG mbH (2016): Aktualisierung und Fortschreibung der Gefährdungsabschätzung Sickerwasser  
2015/2016 für die Rüstungsalblast „Werk Tanne“ in Clausthal-Zellerfeld

# Optimierung der Bodenfeuchtemessungen in einem Bodenmonitoring-Programm - Am Beispiel der Intensiv-Messstelle Baltmannsweiler in Baden-Württemberg - Werkstattbericht

Ramona Schüßler<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Notwendigkeit und Nutzen von Bodenfeuchtemessungen.....	57
2. Material und Methoden.....	58
3. Ergebnisse.....	59
4. Diskussion.....	66
5. Zwischenfazit und Ausblick.....	67
6. Literatur.....	68

## 1. Notwendigkeit und Nutzen von Bodenfeuchtemessungen

Die Bodenfeuchte ist eine zentrale Variable im terrestrischen System. Sie ist sowohl zeitlich als auch räumlich sehr variabel (Vereecken et al. 2014).

Auch aus Sicht der Altlastenbearbeitung sind Kenntnisse über die Bodenfeuchte relevant. Zum einen hat sie einen Einfluss auf die Verteilung von Schadstoffen. Die Bodenfeuchte beeinflusst die Mobilität von Schadstoffen im Boden. In nassen Böden können wasserlösliche Schadstoffe leichter transportiert werden, was das Risiko einer Kontamination von Grundwasser erhöht. Ebenfalls hängt die Art und Weise, wie Schadstoffe durch den Boden transportiert werden, stark von der Bodenfeuchte ab. Dies betrifft sowohl den konvektiven Transport (Bewegung mit Wasserstrom) als auch den diffusiven (aufgrund von Konzentrationsgradienten). Die Bodenfeuchte beeinflusst die Aktivität von Mikroorganismen, die Schadstoffe abbauen können. Optimale Feuchtigkeitsbedingungen sind notwendig, um biologische Sanierungsprozesse zu unterstützen. Wassergesättigte Böden neigen zu gänzlich anderen Redoxbedingungen im Vergleich zu trockenen Böden. Diese Bedingungen beeinflussen, welche biologischen und chemischen Reaktionen stattfinden können. Viele in-situ Sanierungstechniken (wie Bioremediation oder Phytosanierung) erfordern spezifische Bodenfeuchteniveaus, um effektiv zu sein (Bahmani et al. 2018). Die Effizienz thermischer Sanierungstechniken kann durch die Bodenfeuchte beeinflusst werden, da Wasser eine hohe Wärmekapazität hat und die Erwärmung des Bodens verzögern kann. Die Bodenfeuchte muss schließlich auch berücksichtigt werden, um geeignete Maßnahmen für die Erschließung und Befahrbarkeit von kontaminierten Standorten zu planen.

Bei der derzeit eingesetzten Messtechnik sind aufgrund der Bodenheterogenität Parallelmessungen notwendig, was die Investitionskosten an den Messstellen erhöht. Zudem ist die Messtechnik fehleranfällig und erfordert einen hohen Wartungsaufwand.

Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Methoden zur Bodenfeuchtemessung zu vergleichen und praktikable Messverfahren für den Routinebetrieb an Intensivmessstellen der Landesanstalt für Umwelt Baden-

---

<sup>1</sup> Ramona Schüßler, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Ramona.Schuessler@lubw.bwl.de

Württemberg (LUBW) abzuleiten. Diese betreffen sowohl die Betrachtung der Sensorauswahl, als auch die Untersuchung von Modellierungsansätzen. Der folgende Beitrag stellt die ersten Ergebnisse der Masterarbeit zusammen und ist als Werkstattbericht anzusehen.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

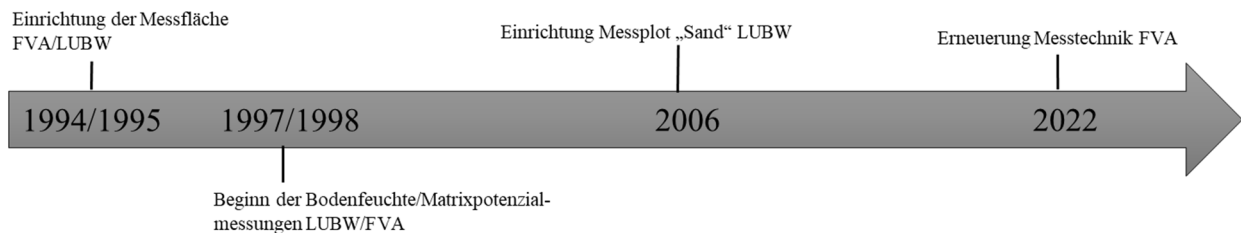


Abbildung 1: zeitlicher Überblick

Die Messstelle Baltmannsweiler befindet sich auf Stubensandstein des Mittleren Keupers. Seit 1995 besteht



Abbildung 2: eingebaute FDR-Sonden im Messfeld der offenen Baumweise in Baltmannsweiler; eigene Aufnahme

ein Sickerwassermessfeld in Schachtbauweise im Bereich einer podsoligen Braunerde aus schwach tonigem Sand, mit eingeschalteten Tonbändchen ab ca. 40 cm Tiefe. Im Jahre 2006 wurde ein weiteres Sickerwassermessfeld in offener Bauweise im Bereich einer podsolierten Braunerde aus schwach tonigem Sand ohne Tonbändchen eingerichtet. Auf der Bestandsfläche stockt Fichte mit Douglasie im Alter von 80 - 100 Jahren. Eine Kooperation besteht mit der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA), die Baltmannsweiler ebenfalls als

sogenannte Stoffflussmessfläche betreibt. (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 2008) Die Ergebnisse des Bodenfeuchtemonitorings der

FVA werden auf folgender Website bereitgestellt: <https://www.fva-bw.de/daten-tools/monitoring/intensives-oekosystemmonitoring/ergebnisse/bodenfeuchtemonitoring/ergebniss-des-bodenfeuchtemonitorings>

### 2.2 Datenherkunft und Messtechnik

Für die vorliegende Arbeit wurden Daten der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt, Abt. Boden und Umwelt sowie der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Referat 22 Boden und Altlasten zur Verfügung gestellt. Die Daten der FVA umfassen einen Messzeitraum von 2011 bis Ende 2023 und wurden für die Erstellung der Graphiken des Zusammenhangs von Wassergehalt (gemessen mit FDR-Sonde, ML2 ab 2022 mit ML3) und Matrixpotenzial (gemessen mit pF-Meter, ab 2022 mit thermischen Matrixpotenzialsensor Tensiomark) verwendet. Für die weiteren Graphiken wurde auf die Messdaten der LUBW (Tensiometer T4/6 bzw. FDR-Sonde ML2, ML3) und daraus modellierte Daten zurückgegriffen.



FDR-Sensoren (Frequency Domain Reflectometry- Sensoren) enthalten einen Schwingkreis und einen in den Boden eingebauten Sensorteil. Der Oszillator strahlt eine elektromagnetische Welle mit einer bekannten Frequenz in die Sonde ab und erzeugt ein elektromagnetisches Feld. Dieses elektromagnetische Feld wird von der Dielektrizitätskonstante des Bodens, welche u.a. vom Wassergehalt bestimmt ist, beeinflusst und die Impedanz der Sonde ändert sich. Aufgrund der Impedanzänderung wird ein Teil der eintreffenden Welle zurückreflektiert und interferiert mit der erzeugten Welle, was zu einer stehenden Spannungswelle führt. Diese Ausgangsspannung steht somit im Zusammenhang mit dem Wassergehalt des Bodens. (Mane et al. 2024) Nach diesem Messprinzip funktionieren die eingesetzten ML2 und ML3-Sonden von UP Umweltanalytische Produkte GmbH.

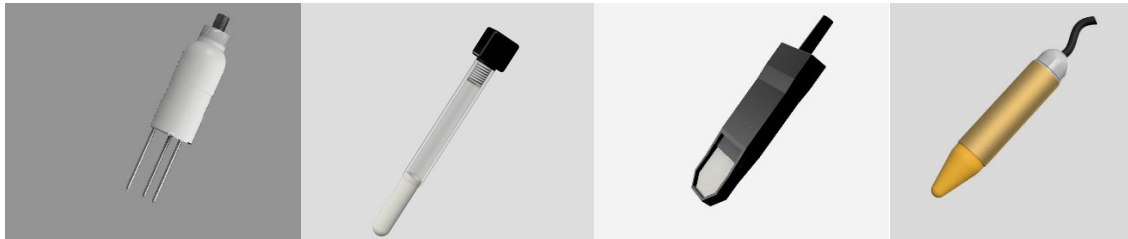


Abbildung 3: FDR-Sonde, Tensiometer, thermischer Matrixpotenzialsensoren (Tensiomark und pF-Meter), eigene Darstellung

Für die Bestimmung des Matrixpotenzials sind im Messdatensatz drei verschiedene Sensoren enthalten: Tensiometer, pF-Meter und Tensiomarks.

Tensiometer für automatische Messungen bestehen aus einer porösen Keramikzelle, einem wassergefüllten Rohr und einem Drucksensor an der Oberseite. Das Prinzip eines Tensiometers beruht auf der Messung des Drucks in der Tensiometerleitung, der dadurch erzeugt wird, dass Wasser aus dem wassergefüllten Rohr durch die Keramik in den Boden fließt, bis ein Gleichgewicht zwischen dem Wasser im Rohr und im Boden erreicht ist. An diesem Punkt wird das Matrixpotenzial des Bodens bestimmt. (Trivedi et al 2023) (Amelung et al. 2018)

Wärmekapazitätssensoren wie der pF-Meter oder Tensiomark nutzen die Änderung der Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit (spezifische Wärmekapazität) eines porösen Materials. Die Poren des Sensors gleichen sich an das Matrixpotential des Bodens an. Wärmekapazitätssensoren geben einen Wärmeimpuls in den porösen Teil des Sensors, mit bekannter pF-Kurve, ab und messen dann die Temperaturänderung, welche vom Wassergehalt beeinflusst wird. Einige Sensoren messen den Temperaturanstieg, andere die Temperaturabnahme. Je nach Sensortyp müssen die Sensoren kalibriert werden oder können direkt verwendet werden. Die Wärmekapazitätssensoren sind so konzipiert, dass sie auch in trockenen Böden und bei Frost funktionieren. (ecoTech, 2024)

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Klimadaten

Die niederschlagärmsten Jahre im gesamten Zeitraum waren 2003 (602 mm Jahressumme) und 2018 (669 mm Jahressumme). 2001 und 2002 waren hingegen die niederschlagreichsten Jahre mit 1036 mm bzw. 1065 mm. Der Durchschnitt am Standort Baltmannsweiler lag bei 879 mm von 1997 bis 2023. Im Bundesdurchschnitt betrug der Niederschlag von 1991 bis 2020 790 mm pro Jahr, in Baden-Württemberg lag der Niederschlagsdurchschnitt mit 951 mm deutlich höher als im Bundesdurchschnitt (Umweltbundesamt, 2024).

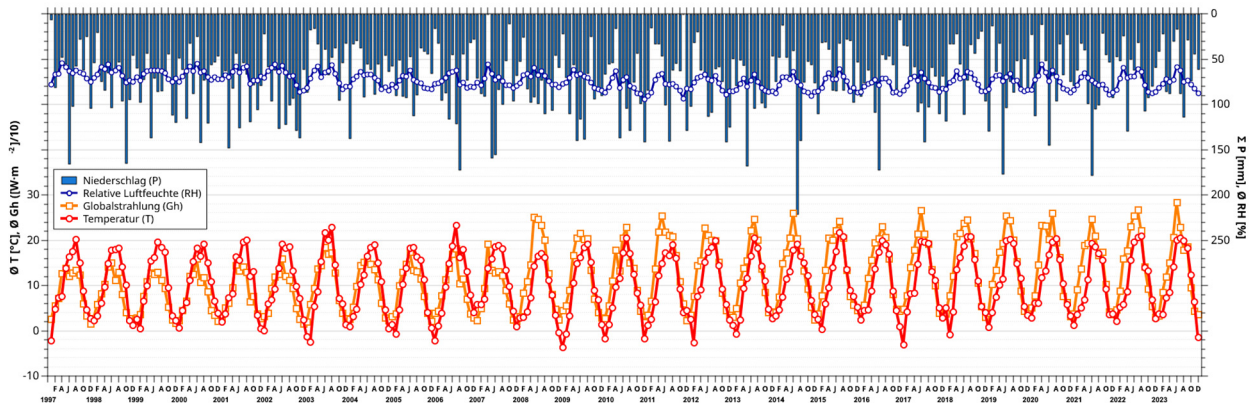


Abbildung 4: Klimadaten im Zeitraum 1997 bis 6. Dezember 2023 am Standort Baltmannsweiler, Daten erstellt von HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft GmbH mittels LARSIM, eigene Darstellung

Die Graphik zeigt, dass über den betrachteten Zeitraum die Globalstrahlung sowie die Temperatur zunahm.

Werden die Niederschläge von Sommer und Winter in den einzelnen Jahren separat betrachtet, fällt auf, dass die Winterniederschläge oftmals geringer waren als die Sommerniederschläge. Ab Dezember 2023 kann sich aufgrund der anhaltenden Niederschläge dieser Trend geändert haben, hierzu wurden allerdings noch keine Daten ausgewertet.

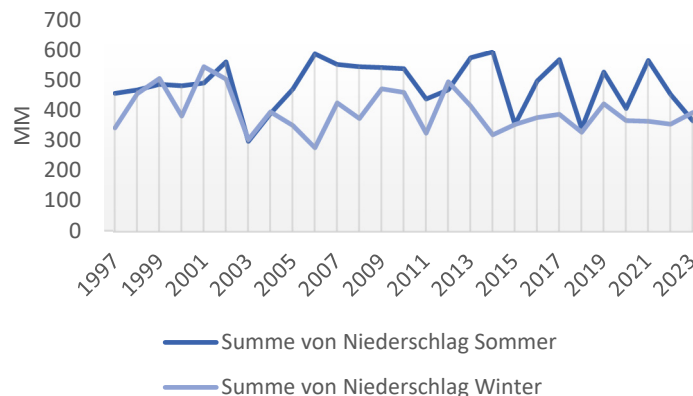


Abbildung 5: Niederschlagssummen differenziert in Sommer (Mai- September) und Winter (Oktober- April) von 1997 bis 06. Dezember 2023

### 3.2 Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und Saugspannung

Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Saugspannungskurven und der Wassergehaltskurven (Bodenfeuchte) in den Jahren 2011 bis 2023 in drei verschiedenen Tiefen. Die 30-minütigen Messwerte wurden zu Monatsmittelwerten zusammengefasst. Von 2011 bis 2022 wurde der Wassergehalt mittels ML2-Sonden gemessen, ab 2022 mittels ML3-Sonden. Die Saugspannung wurde von 2011 bis 2022 mit pF-Metern gemessen, ab 2022 wurden Tensiomarks eingesetzt. Die Angabe erfolgt in pF-Werten. Der pF-Wert entspricht dem logarithmierten Wert des Betrags des Matrixpotenzials bzw. der Saugspannung (Amelung et al., 2018). Die Erhebung von Bodenfeuchtedaten in Form von Wassergehalt und Matrixpotenzial liefert komplementäre Informationen über den Wasserzustand im Boden. Der Wassergehalt gibt den volumetrischen Anteil des Wassers im Boden an und ist direkt mit der Wassermenge verbunden, die für Pflanzen verfügbar ist oder durch den Boden transportiert wird. Das Matrixpotenzial hingegen beschreibt

die Energie, mit der Wasser im Boden gehalten wird, und beeinflusst die Verfügbarkeit und Mobilität des Wassers im Bodenprofil.

Die Messlücken (ca. 2020 bis 2023) sind durch den Ausfall der Sensoren bzw. deren Neueinbau zu erklären.

Die Sensoren wurden auf der Fläche an drei verschiedenen Positionen eingebracht: unter der geschlossenen Krone, in der Traufe und im Freiland. Zwischen den unterschiedlichen Nutzungen zeigen sich Differenzen in den Werten des Wassergehalts. Der Wassergehalt an den Sensoren im Freiland ist stets am höchsten, zwischen Traufe und geschlossener Krone lässt sich keine eindeutige Tendenz feststellen.

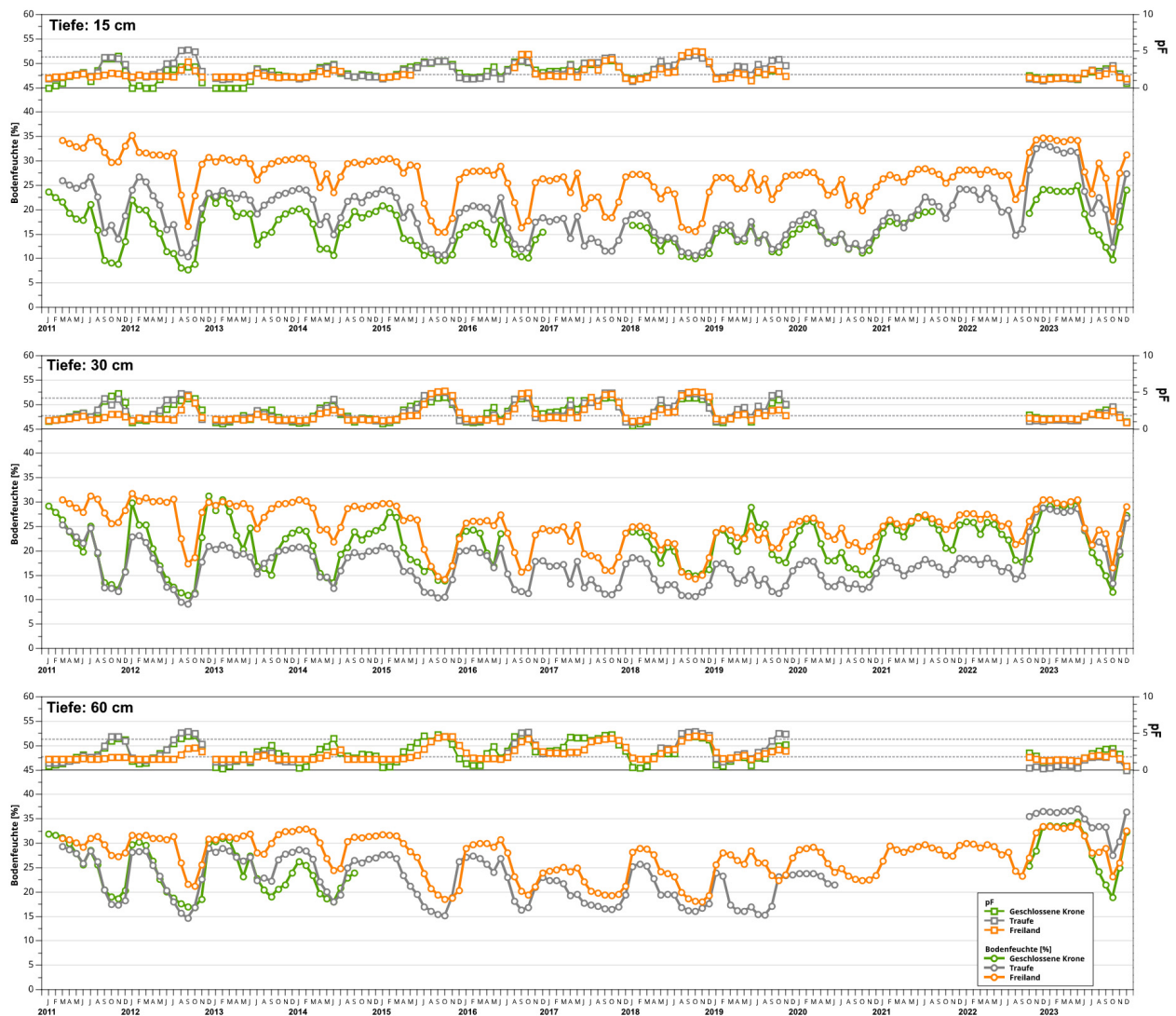


Abbildung 6: Zusammenhang von pF (gemessene Daten mittels pF-Meter ab 2022 mittels Tensiomark) und Wassergehalt (FDR-Sonden); Daten von Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Abt. Boden und Umwelt (Forest Research Institute Baden-Württemberg, Dept. Soil and Environment), eigene Darstellung

Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung lässt sich in den dargestellten Grafiken nachvollziehen. Durch die gemessenen Daten lassen sich für die untersuchten Tiefen spezifische Zusammenhänge und pF-Kurven für weitere Anwendungen ableiten.

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen Wassergehalt und Saugspannung in den Tiefen 15, 30 und 60 cm

	15 cm Tiefe	30 cm Tiefe	60 cm Tiefe
Geschlossene Krone: FDR / pF	-0.893	-0.673	-0.900
Traufe: FDR / pF	-0.850	-0.846	-0.842
Freifläche: FDR / pF	-0.752	-0.840	-0.964

Die Signifikanz ist mit den verwendeten Daten mittels Rangkorrelation nach Spearman in allen Fällen gegeben. Einflüsse aus beispielsweise Datenaufbereitung, Einbaueffekten und der Heterogenität des Bodens wurden noch nicht vollständig betrachtet.

Zwischen den verschiedenen Tiefen (15, 30 und 60 cm) lassen sich auch spezifische Zusammenhänge der Bodenfeuchte in Abhängigkeit der Tiefe erkennen. Diese wurden ebenfalls statistisch betrachtet (Tabelle 2 und Tabelle 3).

Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten nach Spearman der FDR-Sonden ML2 bzw. ML3 in den Tiefen 15 und 30 cm bzw. 30 und 60 cm

	Geschlossene Krone	Traufe	Freifläche
15/30 cm	0.888	0.941	0.958
30/60cm	0.91	0.926	0.924

Tabelle 3: Korrelationskoeffizienten nach Spearman der Saugspannungsmessungen mittels pF-Meter bzw. Tensiomark in den Tiefen 15 und 30 cm bzw. 30 und 60 cm.

	Geschlossene Krone	Traufe	Freifläche
15/30 cm	0.779	0.967	0.914
30/60cm	0.759	0.907	0.865

### 3.3 Effekte der Hysterese

Die Hysterese im Boden beschreibt das Phänomen, dass die Beziehung zwischen Bodenfeuchte und Bodenwasserpotenzial (oder Saugspannung) nicht eindeutig, sondern abhängig vom Feuchteverlauf ist. Diese nichtlineare und pfadabhängige Beziehung tritt auf, weil der Boden beim Aufnehmen und Abgeben von Wasser unterschiedlich reagiert. Die Hysterese in Böden wird hauptsächlich durch die Struktur des Porenraums und die Benetzungs- sowie Entwässerungspfade bestimmt. Beim Aufsättigen des Bodens (Benetzung) und Entwässern (Trocknen) durchläuft der Boden unterschiedliche Dynamiken. Dies führt zu einer Hystereseschleife in der Beziehung zwischen Bodenfeuchte und Wasserpotenzial. (Amelung et al. 2018)

Verschiedene Modelle versuchen die Hysterese zu beschreiben, wobei das bekannteste das van Genuchten-Modell mit modifizierten Hystereseschleifen ist. (Ottoni et al. 2015) Es wird oft durch zwei separate Kurven dargestellt:

**Benetzungskurve:** Beschreibt den Weg der Wasseraufnahme im Boden.

**Entwässerungskurve:** Beschreibt den Weg der Wasserabgabe im Boden.

Diese Modelle sind notwendig für die präzise Simulation der Wasserbewegung im Boden, insbesondere in hydrologischen Modellen und landwirtschaftlichen Anwendungen.

Um zu überprüfen, ob die Effekte der Hysterese auch an den Messdaten erkennbar sind, wurde exemplarisch aus dem LUBW-Datensatz für das Jahr 2013 ein Punktdiagramm mit den Saugspannungswerten und Wassergehalten für 20 cm Tiefe aufgetragen. Im Bereich von 20 bis 25 Volumenprozent Wasser lassen sich die kleinen Hystereseschleifen erkennen.

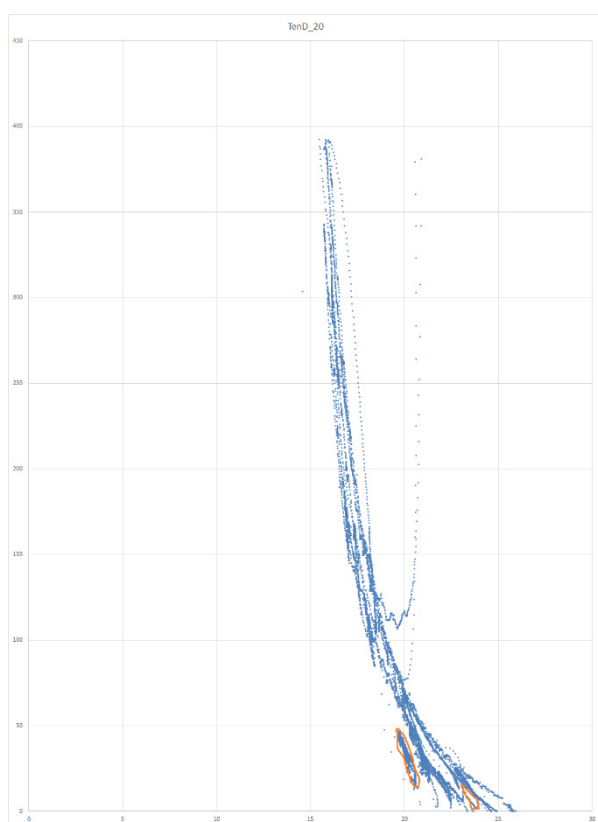


Abbildung 7a: Punktdiagramm für Saugspannung in hPa (y-Achse) und Wassergehalt in Vol-% (x-Achse) für das Jahr 2013 und 20 cm Tiefe (Daten: LUBW)

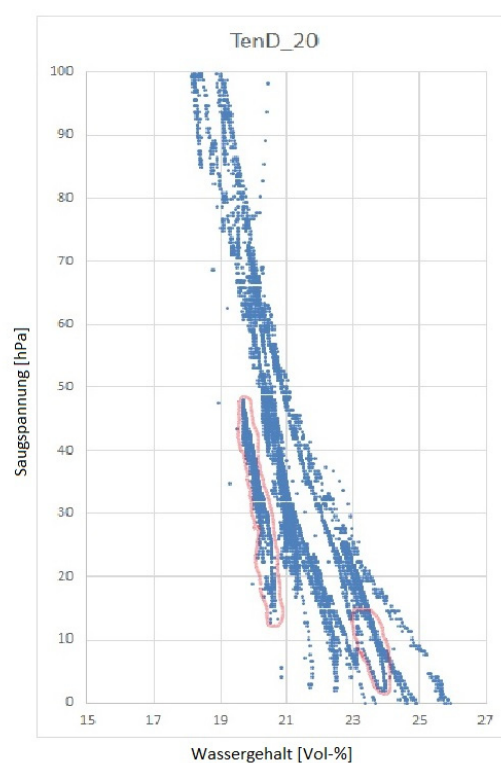


Abbildung 7b: vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 7a

Größere Schleifen sind möglicherweise Auffüllungs- bzw. Austrocknungseffekte am Tensiometer. Die Auffächerung des pF-Zusammenhangs nahe der Wassersättigung deutet auf Strukturveränderungen bei den Grobporen durch Austrocknungsprozesse hin. Die gezeigten Effekte sollen durch Auswertung von Parallelmessungen und Messdaten aus tieferen Horizonten untersucht werden.

### 3.4 Modellierte Saugspannungsgrafiken

Bodenfeuchtemessungen sind aus technischen und aus Aufwandsgründen nur in einer beschränkten räumlichen Auflösung realisierbar. Um sich ein lückenloses Bild über die Bodenwasserdynamik zu verschaffen, sind numerische Simulationsmodelle ein nützliches Mittel. Die folgenden Graphiken wurden aus modellierten Daten der LUBW-Daten aus dem BROOK90 Modell erstellt. Es zeigen sich regelmäßig die sommerlichen Austrocknungsphasen, die von oben nach unten in immer tiefere Bodenschichten vordringen. In diesen Zeiten erhöhter Verdunstung reichen die Niederschläge (die blauen Infiltrations“finger“) nicht mehr zur Versorgung der Pflanzen aus, die deshalb auf das im Boden gespeicherte Wasser zurückgreifen müssen.

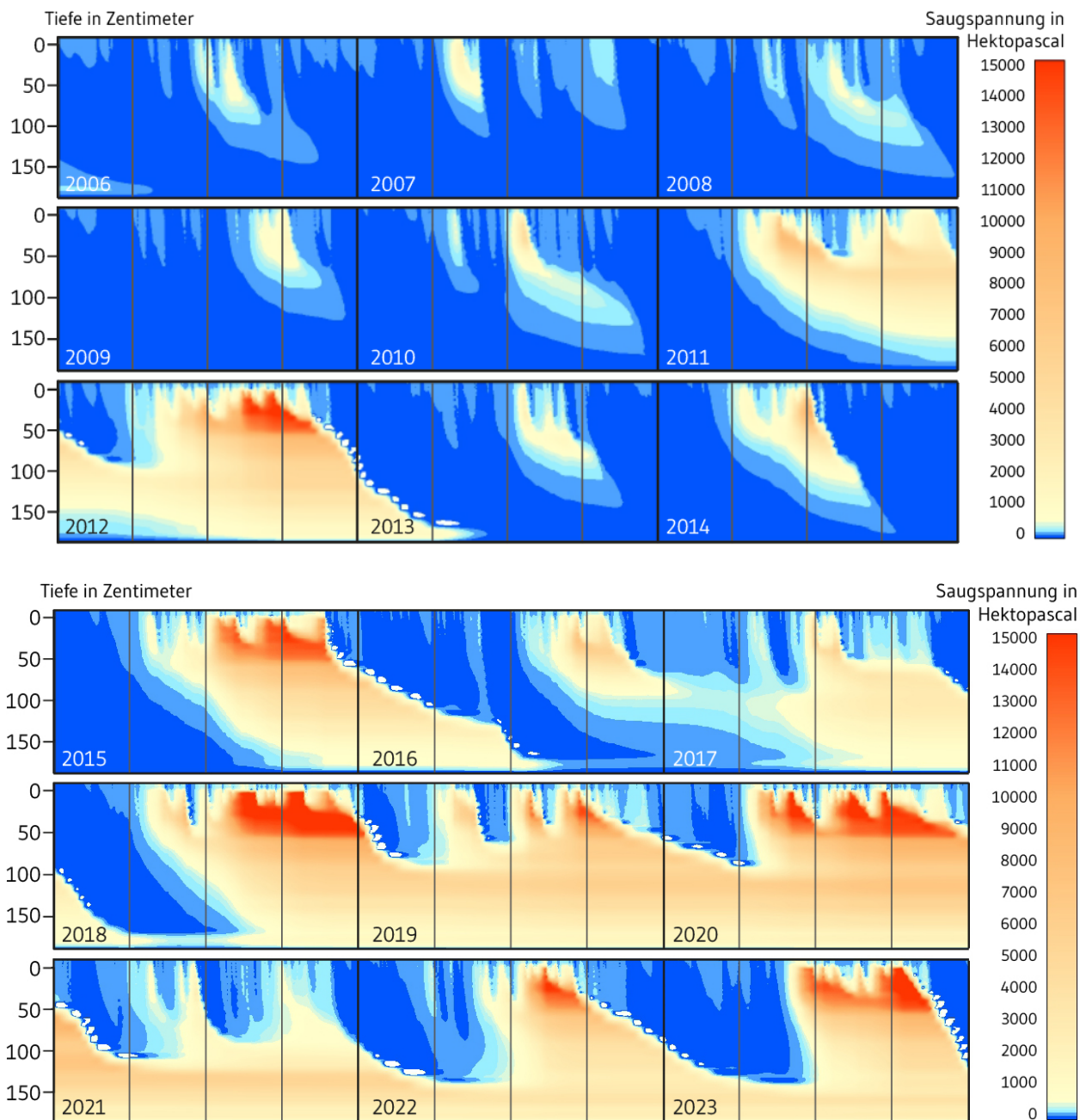


Abbildung 8: Modellierter Verlauf der Bodenfeuchte unter dem Aspekt der im Boden herrschenden Saugspannung für den Zeitraum 2006 bis Dezember 2023 und 190 cm Tiefe

Ab dem Winter erst, mit Beginn der Vegetationsruhe und deutlich abnehmender Verdunstung, vermögen die Niederschläge schließlich den Bodenwasserspeicher in der Regel wieder von oben nach unten aufzufüllen. War aber die Austrocknung des Bodens außerordentlich stark oder die winterliche Auffüllung außerordentlich schwach, wird der Bodenspeicher nur zum Teil gefüllt, mit ungünstigen Konsequenzen für das Folgejahr. Kritisch kann es für manche Pflanzen werden, wenn mehrere solcher Trockenjahre in Folge auftreten, wie zuletzt in den Jahren 2018/19 und 2019/20 sowie in schwächerer Form anhaltend bis Ende 2023. Am Standort Baltmannsweiler wachsen jedoch große Nadelbäume, deren Wurzeln tiefer als die modellierten 190 cm reichen, so dass ihnen dort vorhandenes Wasser sehr wahrscheinlich bei der Überbrückung der Trockenperioden helfen kann.

### 3.5 Zeitlicher Verlauf des Bodenwasservorrats

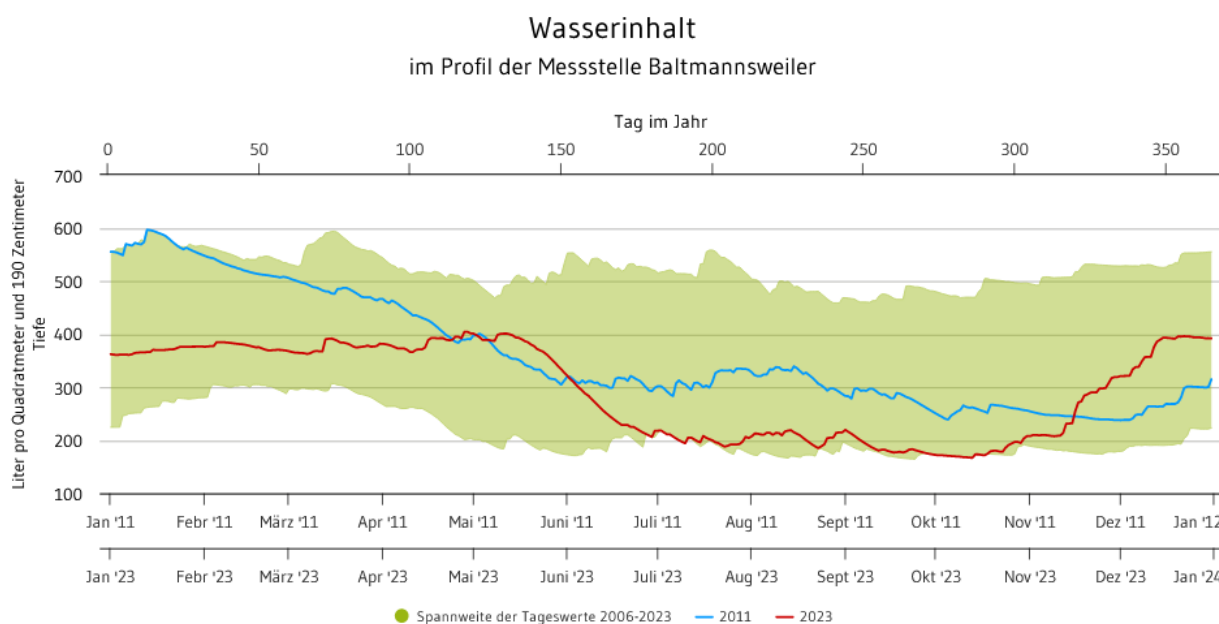


Abbildung 9: Wasserinhalt im Profil der Messstelle Baltmannsweiler von 2006 bis 2023

Die Grafik zeigt die gesamte Wassermenge in mm bzw. Liter pro Quadratmeter, die im Bodenprofil bis 190 cm Tiefe gespeichert war, im jahreszeitlichen Verlauf der Jahre 2006 bis 2023. Zusätzlich sind die Minima und Maxima der Füllstände dargestellt, die für jeden Jahrestag innerhalb der Zeitreihe bisher aufgetreten sind.

Der maximale Bodenwasservorrat beträgt etwa 600 Liter pro Quadratmeter, das entspricht der Menge Wasser, die dieser Boden natürlicherweise in seinem Porensystem festzuhalten vermag (Fachbegriff: Feldkapazität). Der minimale Füllstand bewegt sich um die 160 Liter pro Quadratmeter und kann ab dem Frühsommer bis in den Winter hinein an diesem Standort auftreten. Unabhängig von der Stärke der jeweiligen Austrocknung wird er aber niemals unterschritten. Bei diesen 160 Liter pro Quadratmeter handelt es sich um das Wasser, an das die Pflanzen aufgrund sehr hoher Saugspannungen nicht mehr herankommen können (Fachbegriff: Totwasser). Der von den Pflanzen ausschöpfbare Bodenwasservorrat beträgt somit lediglich 440 Liter pro Quadratmeter (Fachbegriff: nutzbare Feldkapazität). Vorratsangaben aus der Literatur beziehen sich immer auf eine anzugebende Bodentiefe, konventionell wird dabei häufig von 1 Meter Bodentiefe ausgegangen.

### 3.6 Zeitlicher Verlauf der Wasserflüsse

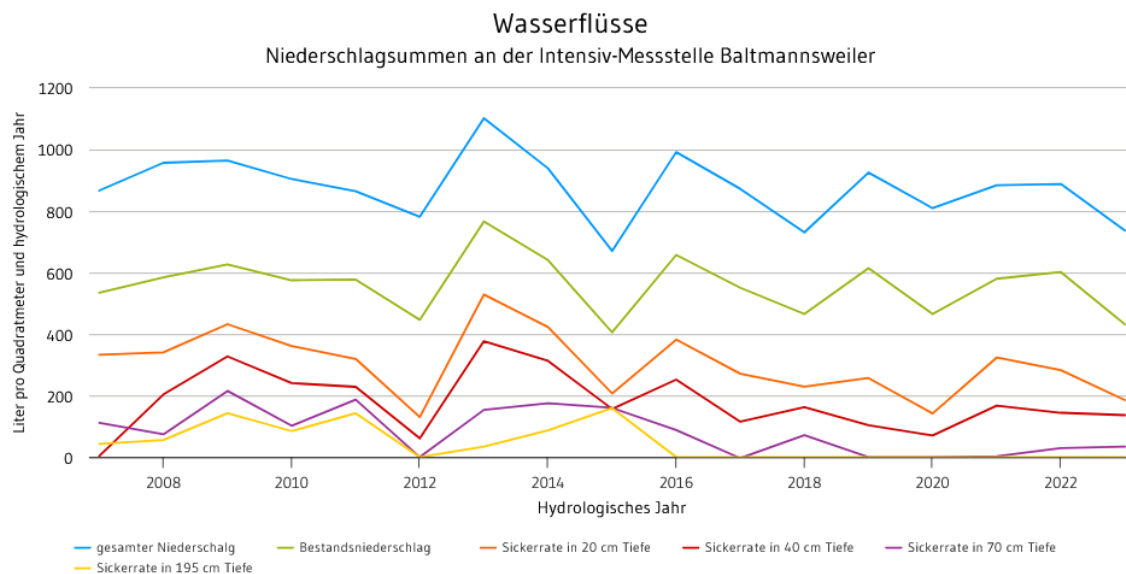


Abbildung 10: Wasserflüsse in ausgewählten Tiefen an der Messstelle Baltmannsweiler

Die bisher dargestellten zeitlichen Zustandsverläufe des Bodenwassers werden durch Wasserflüsse hervorgerufen. Diese sind für viele Fragestellungen das primäre Ziel bei der Untersuchung der Bodenwasser-Dynamik. An Intensiv-Messstellen beispielsweise werden die Sickeraten in den Einbautiefen der Saugsonden benötigt, um mit dem Sickerwasser transportierte Stofffrachten berechnen zu können. Von Interesse können aber auch Interzeptionsprozesse im Kronenraum (v. Wilpert, 2016) sein oder die Tiefensickerung aus dem Modell, die als Näherung für eine Grundwasserspense für den Landschaftswasserhaushalt dienen kann.

Es wird deutlich, wie die Flussraten vom Freiland-Niederschlag über den Bestands-Niederschlag und anschließend während der Bodenpassage mit der Bodentiefe kontinuierlich abnehmen, da das Wasser vor allem durch Verdunstung, im Boden auch zur Auffüllung des Speichers, abgezogen wird. In entsprechenden Trockenjahren kann das dazu führen, dass kein Wasser das System nach unten verlässt, es also vollständig durch Verdunstung wieder in die Atmosphäre gelangt.

Die Kenntnis der genauen Sickeraten und Wasserflüsse ist wichtig, um die mit dem Wasser transportierten Stofffrachten berechnen zu können. Denn eng gekoppelt an die Bodenwasser-Dynamik ist die Stoffdynamik der Böden, die zu den wichtigsten Treibern für Bodenveränderungen zählen. Stoffe werden gelöst und mit dem Bodenwasser transportiert, wo sie in tieferen Bodenschichten in unterschiedlichem Maße zurückgehalten werden oder ins Grundwasser gelangen.

## 4. Diskussion

Das Ziel der Arbeit besteht in der Ableitung von praktikablen Messverfahren und Modellierungsansätzen für den Routinebetrieb an Intensivmessstellen der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW). Um dieses Ziel zu erreichen ist zunächst eine Untersuchung der Einflussfaktoren und der vorliegenden Daten, die sowohl mit der bestehenden Messtechnik der LUBW als auch mit zum Vergleich geeigneter Messtechnik weiterer Forschungsinstitutionen, notwendig. Hierdurch werden ein zielführender Vergleich der Messverfahren, aber auch eine Vereinfachung der Messanordnungen, durch Erkennen von mathematischen Zusammenhängen, ermöglicht.



Die kurze Darstellung der Klimadaten hat gezeigt, dass sich die einzelnen Parameter über den Messzeitraum verändert haben. Die Änderung der Klimaparameter hat Auswirkungen auf den Boden und die Bodenfeuchte. Wie die Graphik in Kapitel 3.5 zeigt, ändert sich der Bodenwasservorrat im zeitlichen Verlauf. Die Pflanzen vor Ort müssen mit diesen Änderungen zurechtkommen. Modellierungen können hierbei helfen Aussagen für Tiefen zu treffen, in welchen Messungen aufgrund der Einbauschwierigkeiten nicht mehr möglich sind. Um die Modelle allerdings standortspezifisch anzupassen sind zahlreiche Messungen vor Ort notwendig. Dies umfasst zum einen die Klimaparameter, wobei hier z. T. bereits auf Radardaten zugegriffen werden kann. Eine Besonderheit gegenüber den „klassischen“ Klimaparametern ist, dass an der Messfläche Baltmannsweiler der Bestandsniederschlag erfasst wird. Wie in Kapitel 3.6 dargestellt, gibt es je nach Nutzungsart große Unterschiede, wie viel Wasser tatsächlich in den Boden sickern kann. Neben den Klimadaten sind auch die Messungen zur Bodenfeuchte (Wassergehalt und Matrixpotenzial) weiterhin erforderlich, um die Prozesse vollständig nachvollziehen zu können. Zusammen ermöglichen diese Messungen ein umfassendes Verständnis der Bodenwasserdynamik, das für die Vorhersage hydrologischer Prozesse und die Modellierung von Wasser- und Stoffflüssen im Boden unerlässlich ist. Durch die gleichzeitige Erhebung beider Parameter können präzisere und robustere Entscheidungen getroffen werden, die zur nachhaltigen Nutzung und Bewirtschaftung von Wasserressourcen beitragen.

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass sich über mathematische Beziehungen und numerische Modelle ein Teil der Messtechnik reduzieren lässt. So erlaubt beispielsweise die Kenntnis des ortsspezifischen Zusammenhangs zwischen Wassergehalt und Matrixpotential (pF-Kurve), unter Beachtung von weiteren Effekten, z.B. Hysterese-Effekten, die Reduzierung von Messungen. Nichtsdestotrotz sind weiterhin Messungen notwendig, um die Ergebnisse der Modellierung zu verifizieren und diese gegebenenfalls an standörtliche Veränderungen anpassen zu können.

Die angesprochene Hysterese beeinflusst die Speicherung und Bewegung von Wasser im Boden erheblich. Während der Benetzung kann der Boden mehr Wasser speichern bei gleichem Wasserpotenzial als während der Entwässerung. Sie beeinflusst somit die Infiltration und das Abflussverhalten von Böden. Dies führt zu Unterschieden in der Verfügbarkeit von Wasser für Pflanzen und in der Grundwasserneubildung. Aus diesem Grund sollten Hysterese-Effekte in Modellen zur Vorhersage von hydrologischen Prozessen und bei der Optimierung von Messanordnungen zur Bodenfeuchtebestimmung berücksichtigt werden. Demgegenüber steht allerdings ein erhöhter Parametrisierungsaufwand bei der Modellierung, der dies in der Praxis meist verhindert.

Aus den Ergebnissen der Untersuchung der Daten und ihrer Zusammenhänge ergeben sich Ansätze für die Anwendung in weiteren Arbeitsbereichen. So ist es für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung wichtig die Bodenwasserdynamik zu verstehen, um Bewässerungsstrategien zu optimieren. Eine präzise Kenntnis der Wasserspeicherung und -verfügbarkeit kann die Effizienz der Bewässerung verbessern und Wasserverschwendung minimieren. Auch zum Management von Wasserressourcen und für die Vorhersage von Hochwasserereignissen wird das Verständnis der Bodenwasserdynamik verbessert. Zuletzt lassen sich bei der Sanierung von kontaminierten Böden, durch die verbesserte Kenntnis der Bodenwasserdynamik und ihrer effizienteren Bestimmung, Sanierungsstrategien optimieren.

## **5. Zwischenfazit und Ausblick**

Die Auswertungen haben gezeigt, dass durch die bisherigen Messungen das klassische Lehrbuch-Wissen nachvollzogen werden kann und sich bekannte physikalische Effekte nachweisen lassen. Zudem werden

durch die genaue Untersuchung der ortsspezifischen Gegebenheiten an der Messstelle Baltmannsweiler und deren Daten, Möglichkeiten zur Optimierung der Messanordnung und –technik sichtbar.

Im nächsten Schritt der Arbeit soll herausgearbeitet werden, wo die Vor- und Nachteile der einzelnen Messsensoren liegen. Zudem sind vereinzelt detailliertere Betrachtungen der vorliegenden Datensätze notwendig, um mögliche weitere Einflussfaktoren zu erkennen und diese bei der Messtechnikauswahl und –anordnung zu berücksichtigen. Effekte, wie z. B. die Hysterese, sollen genauer unter dem wissenschaftlichen Ansatz betrachtet werden. Neben der Messtechnik an sich, sollen auch Optionen einer automatisierten Datenübertragung und teilautomatisierten Plausibilisierung geprüft werden, um die Arbeitsschritte zu optimieren.

## 6. Literatur

- Amelung, Wulf; Blume, Hans-Peter; Fleige, Heiner; Horn, Rainer; Kandeler, Ellen; Kögel-Knabner, Ingrid et al. (2018): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bahmani, Fatemeh; Ahmad Ataei, Seyed; Ali Mikaili, Mohammad (2018): The Effect of Moisture Content Variation on the Bioremediation of Hydrocarbon Contaminated Soils: Modeling and Experimental Investigation. In: J Environ Anal Chem 05 (02). DOI: 10.4172/2380-2391.1000236.
- ecoTech (2024): Tensiomarks, <https://www.ecotech.de/produkt/tensiomark> (letzter Abruf am 26.05.2024)
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2008): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Baden-Württemberg. Von klassischen Bodenuntersuchungen zu medienübergreifenden Umweltbilanzen. 1. Aufl., Dezember 2008. Karlsruhe: LUBW (Bodenschutz, 21).
- Mane, Siddhesh; Das, Narendra; Singh, Gurjeet; Cosh, Michael; Dong, Younsuk (2024): Advancements in dielectric soil moisture sensor Calibration: A comprehensive review of methods and techniques. In: Computers and Electronics in Agriculture 218, S. 108686. DOI: 10.1016/j.compag.2024.108686.
- Otoni M. V., Otoni Filho T. B., van Genuchten M., Rotunno Filho O. (2015): Evaluation of Different Parameterizations for the van Genuchten Soil Water Retention Function. Abrufbar unter: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/17857>
- Trivedi Ayushi, Nandeha Nirjharnee, Rajwade Yogesh, K V R Rao (2023): Sensors of soil moisture measurements. In: Land and water management engineering 2023
- Umweltbundesamt (2024): Trends der Niederschlagshöhe, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe> (letzter Abruf am 23.05.2024)
- Vereecken, H.; Huisman, J. A.; Pachepsky, Y.; Montzka, C.; van der Kruk, J.; Bogena, H. et al. (2014): On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. In: Journal of Hydrology 516, S. 76–96. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.061.
- v. Wilpert (2016): In: Wellbrock N, Bolte A, Flessa H (eds) (2016) Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 550 p, Thünen Rep 43. DOI:10.3220/REP1473930232000

# Innenstadtnahe Flächenkonversion – Eine Strategie zu besserem Stadtklima und Nachhaltigkeit?

Matthias Wieschemeyer, Martin Groten<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Zusammenfassung.....	69
2. Entwicklungsziele .....	69
3. Ziele des Bodenmanagements.....	71

## 1. Zusammenfassung

Die Innenstadtnahe Flächenkonversion spielt eine entscheidende Rolle für nachhaltige Stadtentwicklung und ein verbessertes Stadtklima. Durch die Reduzierung des Flächenverbrauchs, der Integration von Wohn- und Gewerbeflächen, der Nutzung erneuerbarer Energien und der Schaffung von Grünflächen können lebenswerte und zukunftsfähige Städte entstehen.

Grünflächen übernehmen dabei mehrere wichtige Funktionen. Sie dienen nicht nur als Spiel- und Erholungsraum, sondern können auch als Wasserspeicher (Schwammstadt-Konzept) fungieren und tragen so im Sommer zur Kühlung durch Verschattung und Verdunstung bei.

Ein weiterer wichtiger Aspekt beim innerstädtischen Flächenrecycling ist der Umgang mit dem teilweise aufgrund der Vornutzung belasteten Boden. Dies erfordert eine umfassende Planung unter Berücksichtigung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) und der Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV). Ein Bodenmanagementkonzept stellt dabei sicher, dass gesunde Wohn- und Arbeitsbedingungen geschaffen und gleichzeitig alle genannten Funktionen erfüllt werden können.

## 2. Entwicklungsziele

Im Herzen vieler Städte schlummern seit Jahrzehnten ehemals gewerblich genutzte Gelände. Diese Areale können zu innovativen und gleichzeitig nachhaltigen Quartieren entwickelt werden. Im Rahmen des Vortrages werden verschiedene Umsetzungsbeispiele dargelegt.

---

<sup>1</sup> Matthias Wieschemeyer, Martin Groten, Mull und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Neulandstr. 2-4, 49084 Osnabrück; osnabrueck@mup-group.com

## 2.1 Freiraum

Freiräume sind ein essenzieller Bestandteil innovativer Stadtentwicklung. Sie fördern nicht nur die Lebensqualität und den Umweltschutz, sondern unterstützen auch die soziale Interaktion und die Attraktivität von Städten. Durch eine durchdachte und partizipative Planung sowie die Zusammenführung nachhaltiger und flexibler Gestaltungskonzepte, wie Wasserelemente, können Freiräume maßgeblich zur positiven Entwicklung urbaner Räume beitragen.

## 2.2 Verkehrliche Erschließung

Die verkehrliche zukunftsorientierte innere und äußere Erschließung von Quartieren umfasst die Integration multimodaler Verkehrssysteme. Diese fördern den öffentlichen Nahverkehr, Fahrrad- und Fußgängerverkehr sowie Carsharing und E-Ladestationen. Die Planungen setzen auf Verkehrsberuhigung, grüne Infrastruktur im Innenraum und die Begrenzung des individuellen Verkehrs an der Quartiergrenze durch Mobility Hubs. Technologische Innovationen wie autonome Fahrzeuge und Drohnenlieferungen werden meist diskutiert, aber noch nicht umgesetzt.

## 2.3 Energetisches Konzept

Bei der energetischen Versorgung eines Quartiers müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden:

- Energetische Effizienz der Gebäude
- CO<sub>2</sub>-neutrale Wärmeversorgung mittels effizienten Wärmenetzen
- Mieterstrommodelle
- Öffentliche und private Ladestrominfrastruktur für die E-Mobilität

Das energetische Konzept eines Quartiers sollte bereits in der ersten Konzeptphase der Flächenkonversion ein zentraler Planungsbestandteil sein. Schon in einem sehr frühen Stadium des Projekts sollten zudem die vor Ort vorhandenen Wärmepotenziale, wie die der oberflächennahen Geothermie, bewertet und in die Planung mit einfließen.

## 2.4 Regenwasserbewirtschaftungs- und Schwammstadtkonzept

Motiviert durch immer häufiger auftretende Starkniederschlagsereignisse mit einhergehenden Überschwemmungen und durch den zum Teil schon deutlichen Rückgang von Grundwasserständen erlangen gezielte Regenwasserbewirtschaftungskonzepte eine immer bedeutendere Rolle. Das Schwammstadtkonzept basiert auf der Idee, dass Städte wie ein Schwamm funktionieren sollen, indem sie Regenwasser effizient aufnehmen, speichern und langsam wieder abgeben. Dies wird durch verschiedene Maßnahmen erreicht, darunter die Schaffung von Regenwasserspeichern, Retentionsdächern / Dachbegrünungen, Grünflächen und durchlässigen Belägen. Diese Elemente helfen, die Versickerung und Verdunstung von Wasser zu fördern, Überflutungen zu reduzieren und das Mikroklima zu verbessern. Das Konzept trägt auch zur Wasserspeicherung für trockene Perioden bei und unterstützt die biologische Vielfalt in städtischen Gebieten.

### 3. Ziele des Bodenmanagements

Unter der Berücksichtigung der oben genannten Planungsrandbedingungen werden verschiedene Ziel des Bodenmanagements erarbeitet. Zentrale Aspekte sind oftmals:

- Gesunde Wohn- und Arbeitsbedingungen
- Verhinderung von (zukünftigen) Schutzgutgefährdungen
- Erhalt von natürlichen Böden (Bodenschutzkonzept + BBB)
- Flächendifferenzierte Kampfmittelfreigabe entsprechend der zukünftigen Nutzung
- Größtmögliche interne Verwertung von Boden und Bauschutt
- Separation von Abfallarten nach AVV
- Dokumentation der Stoffströme (intern und extern)

Zur Festlegung der Wiedereinbaukriterien im Rahmen von Bodenumlagerungsmaßnahmen gilt es das BBoSchG bzw. die BBodSchV und ergänzend die ErsatzbaustoffV heran zu ziehen. Unter Anwendung der entsprechenden LABO-Vollzugshilfe §§6 – 8 BBodSchV (Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien in oder auf den Boden) und unter Berücksichtigung der Ausgangssituation (z.B. abgrenzbarer ehem. Industriestandort, Voruntersuchungen, usw.) können die vorgesehenen Aufgaben ggf. als Bodenumlagerung innerhalb eines räumlich abgegrenzten Industriestandort mit erhöhten Schadstoffgehalten (§6 BBodSchV Abs. 4) angesehen werden. Gemäß der LABO-Vollzugshilfe §§6 – 8 BBodSchV ist diese Umlagerung möglich, wenn die in §2 (2) Nr. 1 u. 3, Buchstaben b und c des BBodSchG genannten Bodenfunktionen nicht zusätzlich beeinträchtigt werden und die stoffliche Situation am Ort des Auf- und Einbringens nicht nachteilig verändert wird. Andernfalls erfolgt der Einbau in der Regel entsprechend den Einbaukriterien der ErsatzbaustoffV oder es bedarf einer externen Verwertung.

Soweit keine natürlichen und belastungsfreie Böden im Plangebiet vorliegen, sollten diese auch erst im Rahmen der finalen Entwicklung der Baufelder angeliefert und aufgebaut werden. Die Mindestmächtigkeiten ergeben sich dabei aus der BBodSchG/V und liegen zwischen 0,1 m und 0,6 m, bei Anlage von Baumstrukturen auch darüber hinaus.

Im Rahmen des Bodenmanagements erfolgt häufig auch eine Geländemodellierung. Aus der aktuellen und zukünftigen Geländemorphologie lassen sich die Menge und die Qualität der Bodenbewegungen ableiten, um auch die oben genannten Anforderungen bspw. für das Schwammstadt- und Grünkonzept umsetzen zu können.

Die genannten Beispiele im Vortrag zeigen Möglichkeiten auf, wie durch Flächenkonversionen in stadtnahen Gebieten nachhaltige und innovative Quartiere geschaffen werden können, die ressourcenschonend arbeiten und gleichzeitig alle Anforderungen an eine moderne Stadt erfüllen.



# Ringversuch zur Probenahme an einem begehbaren Schurf

Carmen Jaggi, Dr. Frank Küchler<sup>1</sup>

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) richtete im Jahr 2021 einen Ringversuch für Untersuchungsstellen in Bayern aus, die für den Teilbereich 1.1 (Feststoff-Probenahme) nach VSU zugelassen sind. Es erfolgte dazu im Mai 2022 eine Veröffentlichung mit dem Titel: Schurf-Probenahme-Ringversuch 2021 - Durchführung eines Ringversuchs für Untersuchungsstellen, die durch Bayern für Feststoffprobenahmen gemäß § 18 BBodSchG zugelassen sind ([https://www.lfu.bayern.de/analytik\\_stoffe/untersuchungsstellen/ringversuche/schurfprobenahme/doc/schurf\\_probenahme\\_ringversuch.pdf](https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/untersuchungsstellen/ringversuche/schurfprobenahme/doc/schurf_probenahme_ringversuch.pdf)).

## **Die Verweise auf Anlagen in der Zusammenfassung beziehen sich auf diese Veröffentlichung.**

Aufgaben im Ringversuch waren die Bodenansprache und die Bodenprobenahme in einem begehbaren Schurf.

Es handelte sich um den ersten Ringversuch dieser Art.

Die organisatorische und praktische Abwicklung des Ringversuches wurde vom ITVA e.V. im Auftrag des und in Zusammenarbeit mit dem LfU durchgeführt.

Auf dem Ringversuchsstandort in 97493 Bergtheinfeld (Landkreis Schweinfurt) wurde ein ca. 25 m langer, ca. 1 m breiter und ca. 1,2 m tiefer Graben mit Einstiegsmöglichkeit an beiden Enden angelegt. In den Graben wurden vorausgewählte Böden schicht- bzw. lagenweise eingebaut und verdichtet. Darunter stand der natürlich gewachsene Boden an, der sich deutlich von der eingebauten untersten Schicht 3 unterschied.

Der Ringversuch fand in der Zeit vom 26. bis zum 30. Juli 2021 statt. 38 Untersuchungsstellen nahmen teil.

## **Die Auswertung ergab Folgendes:**

43 verschiedene Arten von Feststellungen wurden dokumentiert, die gegen das Regelwerk verstießen. Insgesamt gab es 246 Feststellungen. Diese waren entweder kritisch (197) oder nicht kritisch (49). Kritische Feststellungen sind ergebnisrelevant. Am problematischsten waren Probenahmefehler (118 Feststellungen), die zu fehlerhaften Untersuchungsergebnissen führen. Auch Querkontaminationen (63 Feststellungen) führen in der Regel zu fehlerhaften Untersuchungsergebnissen. Die wichtigsten Vorbeugemaßnahmen sind Ordnung, Sauberkeit und präzises Arbeiten. Falsche Probenhandhabung (58 Feststellungen) kann zu Veränderungen der Proben führen, die Einfluss auf die Analyseergebnisse haben. Insbesondere bei der Befüllung der Probengefäßen traten Probleme auf. Dampf Räume in Probengefäßen begünstigen Sauerstoffzufuhr, Ausgasungen, Kondensationen, mechanische Veränderungen, Abrieb und Entmischungen. Fehlerhafte Aufzeichnungen (4 Feststellungen) führen zu Missverständnissen, Unplausibilitäten, Rückverfolgbarkeitsproblemen und in der Folge unter Umständen zu falschen

---

<sup>1</sup> Carmen Jaggi (+49 (0)385 5399 39 19), Dr. Frank Küchler (+49 (0)170 8023448). PRO UMWELT Alexandrinenstraße 7, 19055 Schwerin, Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e. V. (ITVA), Leipziger Platz 8, 10117 Berlin)

Bewertungen der Ergebnisse. Die Salzsäure zur Bestimmung des Carbonatgehaltes war in einem Fall zwar richtig gekennzeichnet, jedoch zu gering konzentriert (3%ig anstelle der vorgeschriebenen 10%igen Salzsäure). Die zahlreichen Minderbefunde bei der Bestimmung des Carbonatgehaltes lassen vermuten, dass weitere Untersuchungsstellen zu gering konzentrierte Salzsäure verwendeten.

In der Anlage 5: Checkliste "PN-Protokoll 17025" befinden sich die detaillierten, teilnehmerbezogenen Ergebnisse der Auswertung der Aufzeichnungen zur Bodenansprache und Probenahme unter Beachtung der Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025. Der Erfüllungsgrad lag im Durchschnitt aller Teilnehmerteams bei 62 %. Das beste Teilnehmerteam erreichte 86 %. Die Hauptdefizite lagen bei der fehlenden Dokumentation der Umgebungsbedingungen, der Uhrzeit der Probenahme, der Probenmenge, der Transportbedingungen, der Probengeräte, des Lageplans, mittels Fotos, der Abweichungen vom Probenahme-Verfahren und der Abweichungen vom Probenahmeplan.

Die Anlage 6: Checkliste "PN-Protokoll 18400-107" enthält eine Übersicht der teilnehmerteambezogenen Erfüllungsgrade der Normforderungen zum Inhalt von Aufzeichnungen für die Probenahmedokumentation. Diese über die DIN EN ISO/IEC 17025 hinausgehenden Anforderungen sind formal unverbindlich, weil sie noch nicht in den individuellen Listen der anzuwendenden Verfahren in den Zulassungsbescheiden der Untersuchungsstellen umgesetzt sind. In der Methodensammlung Feststoffuntersuchung 2.0 (Methosa 2.0) vom 15.06.2021 wird die DIN ISO 18400-107 für Aufzeichnungen und Berichtswesen bei der Bodenprobenahme empfohlen. Hier kamen die Probenehmer teams nur auf einen Erfüllungsgrad von 54,8 %. Die besten lagen bei 72,3 %. Ein weiterer sehr wichtiger Inhalt der Probenahmedokumentation betrifft die Homogenität des Bodens. Sie lässt sich auch als Schätzwert der Heterogenität in Prozent angeben. Die Heterogenität ist ein vor Ort bei der Probenahme relativ einfach schätzbarer Beitrag zur Messunsicherheit. Dieses Merkmal wurde von nur zwei Teilnehmern erfasst.

Inwieweit obligatorische Anforderungen der Bodenansprache nach „Kurz-KA 5 OU/DU O“ erfüllt wurden, ist in Anlage 7 des Berichtes teilnehmerbezogen dargestellt. Diese Quote lag durchschnittlich bei 78,8 %. Nur 13 Teilnehmer haben die Feinbodenart bestimmt. Zahlreiche Teilnehmer füllten nur ein Schichtenverzeichnis aus. Keinesfalls ersetzt ein klassisches Schichtenverzeichnis ein Probenahmeprotokoll.

Die für den Ringversuch auswertbaren Parameter sind in Anlage 8: Befunde Bodenansprache teilnehmerbezogen dargestellt. Es handelt sich um die Tiefenlage der Schichten in m uGOK, die Bodenfarbe, die Humusgehalte, die Feinbodenarten, die Hauptkorngrößen und die Carbonatgehalte.

Bis auf die vereinzelt Ausreißer über 10 cm sind die Schichtgrenzen durchweg sehr gut ermittelt.

Die Ansprache des Humusgehaltes erfolgt über den optischen Eindruck und die Value nach der Munsell Farbtabelle. Die Streuung der Ergebnisse wird an der Standardabweichung der Teilnehmer deutlich. Einige Teilnehmerteams haben den Humusanteil nicht ermittelt.

Bei der Bodenansprache wird der Carbonatgehalt mittels 10%iger Salzsäure bestimmt. Zu gering konzentrierte Salzsäure verursacht Minderbefunde. Die Ergebnisse der Teilnehmerteams streuten stark.

Im Bodenschutzbereich wird empfohlen, mindestens die Bodenartengruppe anzusprechen. Auch in der KA 5 wird vorgeschlagen, die Ergebnisse der Ansprache mittels Fingerprobe mit denen von analysierten Proben zu vergleichen. Deshalb wurden durch zwei Laboratorien unabhängig voneinander die Anteile an Sand, Schluff und Ton nach der DIN EN ISO 17892-4 ermittelt. Nur 13 der 38 Teilnehmer führten die Bodenansprache mit der Kurz-KA 5 durch. Dabei wurden von Ihnen 38 Bodenansprachen vorgenommen. Insgesamt waren nur fünf der 38 möglichen Bestimmungen der Bodenartengruppe von drei Teilnehmern



richtig (4,42 %). In die Praxis übertragen sind demnach nur ca. 4 % der Ansprachen der Bodenart, wenn diese tatsächlich durchgeführt werden annäherungsweise korrekt! Es ist davon auszugehen, dass der Sandanteil kollektiv unterschätzt und damit die Normallehne nicht erkannt wurden. In der ersten Schicht wurde der Tonanteil häufig überschätzt. In der dritten Schicht wurde er in vielen Fällen zutreffender bewertet. Bei internen und externen Vergleichsuntersuchungen zeigt sich immer wieder, dass viel Übung sowie Vergleiche mit Laborergebnissen erforderlich sind, um richtige Bodenansprachen sicherzustellen.

Keines der 25 Teilnehmerteams, die nicht nach der Kurz-KA 5 angesprochen haben, arbeite bei der Bodenansprache regelwerkskonform. Für die Auswertung wurden die Bodenarten Ton, Schluff, Sand und dabei nur die „Hauptkorngröße“ genutzt, die die Teilnehmerteams dokumentiert hatten. Die Nebenbestandteile waren aufgrund unterschiedlichster Schreibweisen nicht interpretier- und auswertbar. Beim ersten Horizont haben 12 Teilnehmer die Hauptbodenart Schluff erkannt (42,8 %). 16 Teilnehmer sprachen im zweiten Horizont als Hauptbodenart Schluff an (57,1 %). Im unteren, dritten Horizont haben 21 Teilnehmer Schluff richtig als Hauptbodenart angesprochen (75 %). Das Ergebnis zeigt, dass es tatsächlich nicht einfach ist, Ton und Schluff bei der Fingerprobe zu unterscheiden und die Anteile davon zu bestimmen.

Zur statistischen Auswertung wurden die Ergebnisse der Elementanalyse der Teilnehmerteams für die mittlere Schicht herangezogen. Für die Untersuchungsparameter Al, Ca, K, Cu und Na wurden jeweils in einem Diagramm die Feststoff-Konzentrationen bzw. die zu-Scores der Teilnehmer über der Nummer des jeweiligen Teilnehmerteams aufgetragen. Die Auswertung der Ergebnisse der Vor- und Wiederholbeprobungen der mittleren Schicht des Schurfes wurde in Tabellenform dargestellt. Wie zu erwarten war, ist die Streuung (Standardabweichung) der Ergebnisse der Vor- und Wiederholbeprobung (Wiederholbarkeit) signifikant niedriger als die Streuung der Ergebnisse der Teilnehmer (Reproduzierbarkeit). Die Ergebnisse belegen, dass auch bei der laboranalytischen Untersuchung von Bodenmaterial mit erheblichen Ausreißern zu rechnen ist.

Die dargestellten kritischen und nicht kritischen Feststellungen sind Regelwerks-Abweichungen, wie sie in Audits/Begutachtungen der Notifizierungsstellen und der Akkreditierungsstelle laufend festgestellt werden. Weil diese Feststellungen mit Regelwerks-Abweichungen gleichzusetzen sind, sind sie von den betroffenen Untersuchungsstellen in eigener Verantwortung zu bearbeiten. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Feststellungen auf ernste Probleme hindeuten, die die Validität der Untersuchungsergebnisse beeinträchtigen können.

Die Ergebnisse dieses Ringversuchs zeigen, dass erhebliche Probleme im Vollzug der grundlegenden Anforderungen hinsichtlich des Einsatzes der Bodenkundlichen Kartieranleitung bestehen.



Abbildung 1: Übersicht vom Ringversuchsgelande

Tabelle 1: Auswertung der allgemeinen Fehlerarten und Feststellungen

ISO 17025 Pkt.	allgemeine Fehlerart	Feststellungen Anzahl	Feststellungen in %
7.3	Probenahmefehler	118	48,0
6.3	Querkontaminationsmoglichkeiten	63	25,6
7.4	falsche Probenhandhabung	58	23,6
7.5	fehlerhafte Aufzeichnungen	4	1,6
7.2	Arbeitsanweisungen fehlen	2	0,8
6.5	HCL zu schwach	1	0,4

# Ringversuch zur Probenahme aus nicht begehbaren Schürfen

Dipl. Geol. Matthias Heinzl und Dr. Felix Geldsetzer<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Regelwerksanforderungen.....	77
2. Motivation.....	78
3. Organisation und Aufbau.....	78
4. Aufgabenstellung.....	78
5. Ergebnisse.....	79
6. Bewertung.....	81
7. Fazit.....	81

Baggerschürfe werden häufig zum Aufschluss von Böden bei der Altlastenuntersuchung, auf Deponien, zur Klärung von Entsorgungsfragen sowie bei der Fremdüberwachung von Verfüllungen in Gruben, Brüchen und Tagebauen angelegt. Oft kann das Bodenmaterial nicht unmittelbar im Schurf beprobt werden, weil die Arbeitssicherheit (z. B. mangelnde Standsicherheit, zu große Tiefe) oder die Logistik (z. B. vorausarbeitender Bagger) dagegen spricht. In diesen Fällen wird das Bodenmaterial maschinell (i. d. R. mittels Bagger) entnommen und anschließend außerhalb des Schurfs beprobt. Dazu wird das Material entweder direkt aus der Baggerschaufel entnommen oder es wird abgelegt und das so entstandene Haufwerk beprobt.

## 1. Regelwerksanforderungen

Zur Probenahme aus nicht begehbaren Schürfen existieren nur wenige detaillierte, verpflichtende Vorgaben. Hinweise finden sich v. a. in der LAGA PN 98: 2019, der DIN ISO 18400-102: 2020, der DIN ISO 10381-2: 2003 (zurückgezogen) und dem LfU-Merkblatt 3.8/4 (2017, aktualisiert 2023). Folgende Vorgaben, speziell für die Beprobung direkt aus der Baggerschaufel, lassen sich ableiten:

- Vor der Probenahme ist die Oberfläche (z. B. 5 cm bis 10 cm) abzustreifen
- Geeignete Probenahmegeräte sind Probenstecher, Bohrstöcke, Kellen und ggf. Schaufeln - alle aus nicht rostendem Stahl
- Probenahmewerkzeuge dürfen Proben nicht verunreinigen. D. h. sie dürfen keine Kontaminanten abgeben oder aufnehmen
- Möglichst die gesamte Tiefe der Baggerschaufel ist zu beproben
- Mehrere Einzel-/Teilproben sind zu entnehmen und zu Mischproben zu vereinigen

Wird das Bodenmaterial vor der Probenahme zu Haufwerken abgelegt, sind diese in Anlehnung an die PN 98 zu beproben.

---

<sup>1</sup> Dipl. Geol. Matthias Heinzl und Dr. Felix Geldsetzer, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

## 2. Motivation

Um einen Überblick zu gewinnen über das Vorgehen in der Praxis, veranstaltete das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) einen Ringversuch. Dieser richtete sich an Untersuchungsstellen (probenehmende Ingenieurbüros und Laboratorien), die nach § 18 BBodSchG für Altlasten-Untersuchungen zugelassen sind. Ringversuche sind ein Instrument der externen Qualitätssicherung. Hierbei müssen verschiedene Teilnehmer dieselbe Aufgabe lösen. Die Ergebnisse ermöglichen Rückschlüsse auf die Qualität der Leistungen in der Routine. Daraus lassen sich ggf. Ansätze für Verbesserungen ableiten.

## 3. Organisation und Aufbau

Zwei Ringversuche zur Probenahme aus Schürfen fanden vom 26. bis 30.07.2021 auf einer Außenfläche des Abfallwirtschaftszentrums (AWZ) Rothmühle bei Bergrheinfeld unter der Leitung des LfU statt. Als Auftragnehmer führte der Ingenieurtechnische Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e. V. (ITVA) dieses Ringversuchs-Projekt durch. In Erweiterung eines verpflichtenden Ringversuches zur Bodenansprache und Beprobung im Schurf bot das LfU den Teilnehmern an, freiwillig an einer weiteren Auditierung teilzunehmen, bei der die oben beschriebene Bodenprobenahme aus einem nicht begehbaren Schurf (z. B. mittels eines Baggers) simuliert wurde.

An diesem zusätzlichen Ringversuch (i. F. „RV Baggerschaufelbeprobung“) nahmen 26 der 38 Teilnehmerteams des verpflichtenden Ringversuchs teil (entspricht 68 %). Begutachtet wurde der RV Baggerschaufelbeprobung von einem Fachauditor des ITVA e. V. (Herr Dr. Tony Anacker, geschäftsführender Gesellschafter und Laborleiter der CLU GmbH Halle). Zusätzlich begleitete ein Fachauditor des LfU diesen Ringversuch.

## 4. Aufgabenstellung

Folgendes Szenario wurde vorgegeben: „Bodenmaterial aus einem ca. 4 Meter tiefen (demnach nicht begehbaren) Schurf sei zu beproben. Der Probenehmer habe den Baggerfahrer angewiesen, das Material schichtweise auszuheben. Dabei beständen für den Probenehmer die Optionen, dieses Material entweder direkt aus der Baggerschaufel zu beproben oder es zunächst in Form eines kleinen Haufwerkes ablegen zu lassen und dieses anschließend zu beproben“. Anstelle einer Baggerschaufel kam aus organisatorischen Gründen eine ca. 3 Meter breite und 0,8 Meter tiefe Radladerschaufel zum Einsatz. Das daneben bereitgestellte Haufwerk aus dem gleichen Bodenmaterial war ca. 4 Meter breit, 0,6 Meter hoch und 1,5 Meter tief (siehe Abb. 1).

Die Probenehmer durften auswählen, ob sie das Material aus der Radladerschaufel und/oder aus dem Haufwerk beproben. Dabei sollten sie sich an der üblichen Vorgehensweise ihrer Untersuchungsstelle und – soweit vorhanden - an den Vorgaben aus ihrer unternehmensspezifischen Standardarbeitsanweisung (SOP) orientieren. Entsprechend beprobte das betreffende Teilnehmer-Team und füllte die Proben in mitgebrachte Gefäße ab. Die Proben wurden nicht untersucht, sondern später verworfen. Jedes Probenehmerteam füllte ein Probenahmeprotokoll aus, welches vom leitenden Fachauditor zur Dokumentation fotografiert wurde. Danach ergab sich vielfach eine abschließende Fachdiskussion zur Vorgehensweise.



Abb. 1: Ringversuchsaufbau mit Haufwerk aus einer ausgekippten Radladerschaufel (vorne) und einer befüllten Radladerschaufel (hinten, während der Beprobung)

## 5. Ergebnisse

Die Mehrzahl der 26 teilnehmenden Untersuchungsstellen (58 %) entschied sich für eine Probenahme aus der Radladerschaufel. Etwa die Hälfte der Teilnehmerteams, die beim Ringversuch das Haufwerk beprobt haben, gab jedoch an, in der Praxis bei Schurfprobenahmen gleichermaßen aus Baggerschaufeln bzw. Haufwerken zu beproben. Laut den Teilnehmern wird die Entscheidung oft situativ getroffen: Haufwerke werden häufiger beprobt bei Deponien, vorlaufenden Baggararbeiten, ausreichendem Platzangebot und zur besseren Begutachtung der Materialzusammensetzung. Entscheidungen für die Beprobung aus der Baggerschaufel wurden oft mit dem Argument der „direkteren“ Probenahme begründet. Auch bei sandigen Böden, unter Zeitdruck, bei Platzmangel sowie in Abhängigkeit von den erwarteten Schadstoffen ist dies die bevorzugte Variante.

Als optimal für die Beprobung aus der Radladerschaufel insbesondere in der Tiefe erwies sich der Edelman-Bohrer (Außendurchmesser ca. 60 mm). Probenahmelanzen und Pürckhauer-Bohrstöcke sind ebenfalls geeignet. Wegen ihres geringen Durchmessers besteht allerdings das Risiko, gröberes Material oder Agglomerate zu verdrängen und deshalb diese Teile der Grundgesamtheit bei der Probenahme unberücksichtigt zu lassen. Die weitaus überwiegende Mehrheit der Teilnehmerteams verwendete jedoch Spaten - teils in Kombination mit Kellen oder Handschaufeln - zum Öffnen und Beprobieren des Bodenmaterials in der Radladerschaufel. Damit das Material vollständig bis zur Basis zu durchhörern erwies es sich als schwierig. Deshalb befolgte nur etwa ein Drittel der Teilnehmerteams diese Vorgabe des Regelwerks.

Folgende Regelwerks-Abweichungen wurden festgestellt:

Abweichung	Anzahl der Teilnehmerteams mit Abweichungen	Anteil an Gesamtzahl (n = 26)
keine bzw. unzureichende Homogenisierung	12	46 %
keine bzw. unzureichende Verjüngung	17	65 %
Oberfläche nicht bzw. nur unzureichend abgestreift	12	46 %
Material nicht bzw. nur unzureichend durchhörtert	16	62 %
Querkontamination bzw. unsaubere Probenahme	16	62 %
unsaubere Probenahmegeräte	3	12 %
keine Kühlung der Proben	12	46 %
Probe nicht verdichtet	3	12 %
ungeeignetes Probenahme- oder Mischgefäß	3	12 %

Beim Abfüllen der Proben ist darauf zu achten, dass die Probengefäße vollständig befüllt werden. Dazu wird das Material nach randvollem Befüllen in das Gefäß gedrückt, um den Gasraum im Probengefäß zu minimieren und verändernde Effekte wie eine Korngrößenfraktionierung beim Transport oder das Ausdampfen von Stoffen und Kondensieren in den oberen Bereichen des Gefäßes zu unterbinden. Etwa ein Drittel der Teilnehmer-Teams füllte die Gefäße nicht vollständig bzw. verdichtete das Material nicht. In der Regel wurde mit einem Probenahmewerkzeug verdichtet - nur in Einzelfällen regelwerkswidrig mit den Händen oder Arbeitshandschuhen (Querkontaminationsgefahr).

Hinsichtlich Querkontaminationen und Sauberkeit wurden folgende Fehlerquellen ggf. mehrfach festgestellt:

- a. Material der Sammel- und Mischgefäße ungeeignet (z. B. schwarze Baumarkt-Eimer)
- b. Treibstoffkanister neben Probengefäßen und -geräten im Fahrzeug
- c. Verschmutzte Probenahmegeräte auf Kühlbox abgelegt
- d. Probenmaterial mit Händen oder Arbeitshandschuhen angefasst (z. B. beim Verdichten der Probe im Probenahmegefäß)
- e. Probenahmegeräte nicht oder nur unzureichend gereinigt
- f. Aufkleber auf Probenahmegeräten
- g. Bodenmaterial nach Aufträufeln von Salzsäure zurück auf das Haufwerk geworfen oder den Carbonat-Test direkt auf dem Haufwerk durchgeführt
- h. Probenahmestellen vor der Entnahme mit Arbeitsschuhen betreten

Weder die Oberfläche der Baggerschaufel noch die seitlichen Kontaktbereiche zur Schaufel dürfen mit beprobt werden, da das Material an diesen Stellen möglicherweise nicht repräsentativ ist (Querkontaminationsgefahr, Veränderungen an der Oberfläche durch Kontakt zur Atmosphäre, UV-Strahlung und gravitative Prozesse etc.). Nur knapp die Hälfte der Probenehmer-Teams erfüllte diese Regelwerksanforderung.

Sowohl bei der Probenahme aus der Baggerschaufel wie aus dem Haufwerk sind mehrere Einzelproben zu entnehmen, die zu einer Mischprobe vereinigt werden. Letztere wird nötigenfalls zerkleinert und zunächst

homogenisiert (intensives Mischen i.d.R. auf einer geeigneten Unterlage), dann verjüngt (z. B. durch Fraktionierendes Schaufeln oder durch Aufkegeln und Vierteln mittels Probenkreuz). Das verbleibende, für die Grundgesamtheit repräsentative Material, wird als Laborprobe abgefüllt. Eine Hälfte der Teilnehmerteams homogenisierte (zerkleinerte und mischte) ausreichend. Die andere Hälfte homogenisierte die Probe entweder gar nicht (z. B. direktes Abfüllen) oder nur unzureichend (z. B. verbackene Anteile nicht zerkleinert, unzureichendes Mischen). Knapp ein Drittel der Teilnehmer verjüngte die Mischprobe fachgerecht zur Laborprobe. Dabei wurde zu etwa gleichen Teilen fraktioniert geschaufelt bzw. aufgekegelt und mit Hilfe eines Probenkreuzes geviertelt.

## 6. Bewertung

Nur ein Teilnehmerteam (4 %) führte die Probenahme ohne Regelwerksabweichung durch. Im Durchschnitt wurden 3,6 Abweichungen pro Teilnehmerteam festgestellt. Bei der Hälfte der Teilnehmerteams (50 %) fielen zahlreiche Abweichungen (4 oder mehr) auf. Nur etwa ein Fünftel der Teilnehmerteams kannte die zentralen Regelwerksanforderungen, die Oberfläche abzustreifen und das Material über die gesamte Tiefe zu beproben.

Problematisch ist, dass nur etwas mehr als ein Drittel der Probenehmerenteams Querkontaminationsrisiken weitgehend ausschloss. Gelingt dies nicht, ist die Repräsentativität der Probe gefährdet.

## 7. Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass es bei der Beprobung aus der Baggerschaufel verbreitet zu Regelwerksabweichungen kommt. Deshalb erscheint es sinnvoll, die Beprobung aus der Baggerschaufel ausführlicher und klarer als eigenständiges Verfahren im Regelwerk zu beschreiben. Immerhin gaben die Teilnehmer mehrheitlich an, dass sie bevorzugt direkt aus Baggerschaufeln und seltener aus abgelegtem Material in Form kleiner Haufwerke beproben.

Für die Beprobung von Haufwerken bestehen mit der PN 98 und der DIN 19698-1 bereits hinreichend ausführliche Regelungen, die sinngemäß die Vorgehensweise beschreiben.

Das LfU hat seine Erkenntnisse in das Merkblatt 3.8/4 „Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Gewässer“ eingearbeitet.

Die firmenspezifische Standardarbeitsanweisung (SOP) ist die Grundlage für die Durchführung eines Probenahmeverfahrens. Bei der Mehrzahl der teilnehmenden Untersuchungsstellen fanden sich in der SOP jedoch keine Vorgaben für die Beprobung aus einer Baggerschaufel. Nur etwa jede vierte Untersuchungsstelle hat die Vorgehensweise zum Probenahmeverfahren „Baggerschaufel/Haufwerk aus Schürfen“ annähernd ausreichend beschrieben. Des LfU empfiehlt den Untersuchungsstellen klare und detaillierte Beschreibungen dieses Verfahrens in ihrer SOP.





# Intelligente Robotik für die Deponie- und Altlastensanierung: Unterstützung der Altlastensanierung durch moderne Robotersysteme

Philipp Woock<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Einordnung.....	83
2. Der autonome Bagger ALICE.....	84
3. Praxistests.....	85
4. Zusammenfassung und Ausblick .....	89
5. Literatur.....	90

## 1. Einordnung

Bereits in der Vergangenheit wurde über die Fortschritte der autonomen Robotik für Altlastenkontexte berichtet [Woo23], [Woo22a], [Woo21]. Die rasanten Fortschritte in den Verfahren maschinellen Lernens werden auch vor der Altlastensanierung nicht halt machen und die Arbeitslandschaften dort mittelfristig nachhaltig verändern.

Das ROBDEKON-Kompetenzzentrum [Woo22a] [Woo22c] wurde 2018 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung ins Leben gerufen und befindet sich aktuell in der zweiten Förderphase. Die gesamte Fördersumme über den ganzen Zeitraum von 8 Jahren beläuft sich auf ca. 20 Millionen Euro. Innerhalb des Kompetenzzentrums werden verschiedene Aspekte der Dekontaminationsrobotik adressiert: Rückbau von Kernkraftwerken und kerntechnischen Anlagen, Handhabung von Gefahrstoffen sowie die Sanierung von Deponien und Altlasten.

Im Rahmen des Kompetenzzentrums hat sich das Fraunhofer IOSB intensiv mit der Befähigung von schweren Baumaschinen zur autonomen Bewältigung von Arbeitsschritten bei der Altlastensanierung beschäftigt. ROBDEKON richtet sich mit seinen Arbeiten zwar hauptsächlich an Systemintegratoren und Arbeitsmaschinenhersteller, die diese modernen Technologien auf die Arbeitsmaschinen von morgen bringen, jedoch ist der Kontakt zu Anwendern wichtig, um die praktische Anwendbarkeit nicht aus dem Blick zu verlieren.

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Philipp Woock, Fraunhofer IOSB, Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe  
[philipp.woock@iosb.fraunhofer.de](mailto:philipp.woock@iosb.fraunhofer.de)

## **2. Der autonome Bagger ALICE**

### **2.1 Autonome Baumaschinen als Robotersysteme**

In [Woo22b] wird ein Überblick über die in ROBDEKON verwendeten Baumaschinen gegeben und welche Änderungen erforderlich sind, um die Baumaschinen als Roboter einsetzen zu können.

Der autonome 24t-Bagger ALICE (Autonomous Large Intelligent Crawler Excavator) ist die Fortsetzung der Arbeiten an einem 1,8t-Minibagger (Bagger ohne Bediener, BoB), mit denen schon 2016 begonnen wurde. Als Basis dient die Algorithmen-Toolbox ATB des Fraunhofer IOSB, die modular die ganze Kette der Autonomie abdeckt [Emt17] und stetig weiterentwickelt wird.

Perspektivisch wird der Bagger ALICE durch ein ebenfalls autonomes Team von Arbeitsmaschinen begleitet, nämlich einem Unimog mit Anhänger als Dumper und einem Radlader.

Diese Plattformen haben mit dem Bagger gemein, dass sie alle erst für Autonomieaufgaben befähigt werden müssen und nicht ab Werk als Roboter agieren können, was bedeutet, Handlungsanweisungen von einer Software zu empfangen anstatt von einem Menschen. Dies beinhaltet das Vorhandensein einer elektronischen Ansteuerung zur Entgegennahme der Befehle aus der Software sowie mehrere Sensorikkomponenten zur Erkennung der eigenen Position und Orientierung (Zwei-Antennen-RTK-GNSS, IMU, Winkelgeber am Baggerarm, Odometriesensorik) bzw. der Erfassung der Umgebung (Mehrere (Hyperspektral-)Kameras, LiDARe). Detaillierte Informationen zur Hardware des Systems sind in [Woo20] [Woo21] [Woo22b] gegeben, mehr Details zur Algorithmik des Baggers sind in [Fre22] nachzulesen.

Der Fokus der Forschungsarbeiten liegt darin, Verfahren und Methoden in Labormustern als praxistauglich darzulegen, damit Hersteller und Systemintegratoren diese Erkenntnisse schnell in marktfähige Produkte umsetzen. Die Endanwender sind nur insofern Adressat von ROBDEKON, als dass sie informiert werden müssen, was technologisch möglich ist, um diese Fortschritte nachfolgend von den Herstellern einzufordern und um im internationalen Wettbewerb nicht ins Hintertreffen zu geraten. Durch schnelle Innovationszyklen wird sichergestellt, dass deutsche Marktteilnehmer modernste Technologien kennen und verwenden können.

### **2.2 Beladen eines Dumpers**

Die Beladung eines Fahrzeugs oder einer Maschine zur Weiterverarbeitung durch einen Bagger ist eine gängige Tätigkeit, die sich aufgrund der Wiederholungen und ihrer räumlich klar begrenzten Auswirkung sehr gut dazu eignet als Routinetätigkeit autonom erledigt zu werden.

Der autonome Bagger Alice ist mit mehreren LiDAR-Sensoren ausgestattet, deren Daten in eine gemeinsame Karte fusioniert werden, so dass dem System zu jeder Zeit eine aktuelle 360-Grad-3D-Rundumsicht aus ca. 6 Mio. Messpunkten zur Verfügung steht. In dieser Rundumsicht wird eine Ladefläche automatisch identifiziert, indem man sich zunutze macht, dass sich die Messpunkte der Ladeflächenseiten in der Projektion auf die Bodenebene stark häufen. Mittels Hough-Transformation werden diese Häufungen ausgewertet und daraus ein Beladungsrechteck identifiziert.

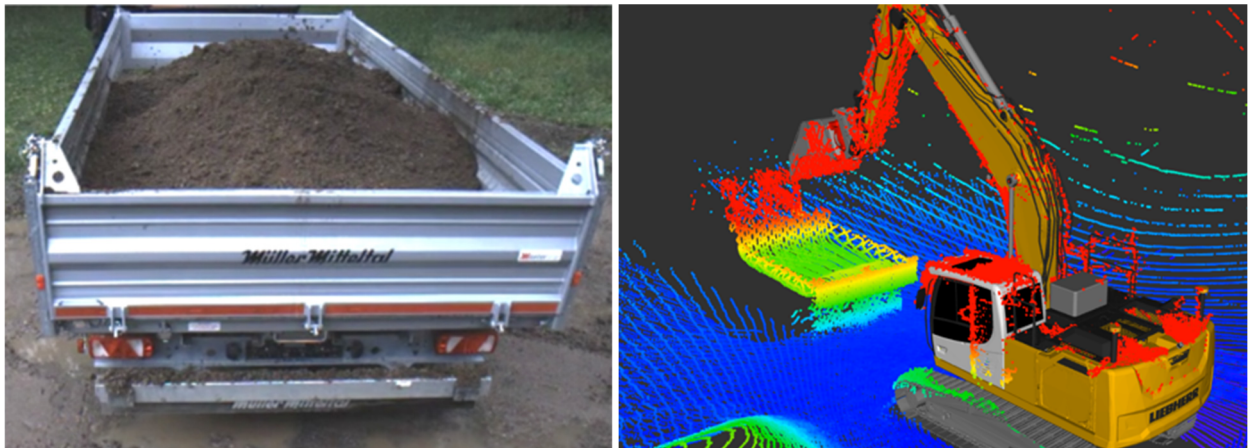


Abbildung 1: Abladevorgang auf Transportfahrzeug. Die Ränder der Ladefläche des Transportfahrzeugs werden automatisch durch die Häufung an 3D-Punkten gefunden.

### 3. Praxistests

Nachdem viele Forschungsarbeiten nötig waren, um die Basis-Befähigung der Baumaschinen als besondere Robotersysteme herzustellen, tritt ROBDEKON jetzt in eine Phase ein, in der verstärkt der Austausch mit der Praxis gesucht wird, um frühzeitig auf die Anforderungen und Bedarfe der Anwender algorithmisch einzugehen.

Im Folgenden wird über drei Praxisevaluationen berichtet, die vom Fraunhofer IOSB in Realumgebungen durchgeführt wurden. Der Vorteil solcher Evaluationen ist jedoch nicht auf die kurze Testzeit vor Ort beschränkt. Da die Algorithmen-Toolbox (ATB) des Fraunhofer IOSB auf ROS (Robot Operating System<sup>2</sup>) basiert, ist es leicht möglich, die Messdaten, die in den Praxisevaluationen aufgezeichnet wurden, im Labor jederzeit zeitrichtig erneut abzuspielen. So kann der digitale Zwilling des Baggers virtuell immer wieder die genau gleichen realen Messdaten bekommen und Anpassungen des Algorithmus zeigen nachvollziehbar und abgrenzbar ihre Wirkung.

#### 3.1 KI-Lerndatensatz

Um Robotersystemen mittels KI ein Verständnis der Umgebung beizubringen, werden typischerweise tiefe neuronale Netze auf Trainingsdaten trainiert und das System kann dann in gewissem Rahmen auf zu den Trainingsdaten ähnliche Szenarien abstrahieren. Im Automobilbereich gibt es viele öffentlich zugängliche Datensätze, die Situationen im Straßenverkehr abdecken, allerdings können diese Datensätze nur begrenzt herangezogen werden, um autonome Baumaschinen zu trainieren, da diese üblicherweise in erheblich weniger strukturierter Umgebung arbeiten, als sie der Straßenverkehr darstellt. Hierzu berichteten wir über Anstrengungen, diese Lücke mit synthetischen Daten zu schließen [Woo23]. Allerdings reichen synthetische Daten nicht aus, um die Systeme in realer Umgebung einsatzfähig zu machen, dafür müssen auch reale Daten aus echten unstrukturierten Umgebungen gewonnen werden. Daher verknüpften wir die Einsätze der autonomen Baumaschinen in Realumgebungen mit der Datenaufnahme für einen umfangreichen Datensatz, bei dem in den Bild- und 3D-LiDAR-Daten genaue Labels fürs Training von KI-

---

<sup>2</sup> <https://ros.org>

Systemen vorliegen [Mor24]. Dieser Datensatz ist öffentlich verfügbar<sup>3</sup> und stellt einen wichtigen Schritt zur Entwicklung von KI-Funktionen für autonome Baumaschinen dar.



Abbildung 2: Zu labelndes Bild (links) und Bild mit farbig überlagerten Labelkategorien (rechts). Für jedes Bild existiert ein pixelgenaues Labeling und ebenso Labels auf der zugehörigen LiDAR-Punktwolke (nicht abgebildet).

### 3.2 Steinbruchumgebung

Im Steinbruch der Firma Zech Umwelt bei Exdorf konnten im Rahmen von ROBDEKON Tests des autonomen Baggersystems in realer Umgebung durchgeführt werden. Dabei stellt die Steinbruchumgebung eine hochinteressante Anwendungsdomäne dar, in der wir in Zukunft besonders breit gefasste Einsätze von autonomen Systemen vermuten. Außerdem gaben die Tests Rückschlüsse über die bisher erzielte Robustheit des robotischen Systems. Dies liegt darin begründet, dass die meisten davor durchgeführten Tests in einer ebenen Umgebung mit weichem, feinkörnigem Bodenmaterial durchgeführt wurden. Auch wenn diese Annahmen über die Umgebung bzw. das Bodenmaterial nicht in der Software des Systems fix verankert sind, kann es passieren, dass sich aufgrund der Experimente und Tests ein Bias in die Algorithmik einschleicht, der derartige Umgebungen bevorzugt. Aus dieser Sicht ist eine Steinbruchumgebung eine äußerst stark abweichende Umgebung von den bisherigen Einsätzen: Das Bodenmaterial ist hart und liegt in groben Stücken vor. Vom Löffel herabfallende Steinbrocken stellen eine erheblich stärker schwankende Gewichtsänderung im Vergleich zu rieselfähigem Bodenmaterial dar. Zudem ist das Relief der gesamten Arbeitsumgebung stark konturiert und enthält vielen nichtebene Bereiche.

---

<sup>3</sup> <https://goose-dataset.de>



*Abbildung 3: Pilotprojekt mit autonomem Bagger im Steinbruch. Autonomer Aushub des Materials (oben).  
Autonomes Beschicken des Steinbrechers (unten).*

Die Untersuchungen im Steinbruch bezogen sich vorwiegend auf Navigation im Gelände und Grabe-/Beladungsvorgänge mit anderem Bodenmaterial. Von besonderem Interesse war das Verhalten der Baggerarm-Regelung beim Eintauchen des Baggerlöffels in das lediglich durch Sprengung gelockerte und zerkleinerte Bodenmaterial.

Die Algorithmen erwiesen sich als robust genug, dass mit kleineren Anpassungen bereits innerhalb von 2 Stunden das Beladen eines Steinbrechers im operationellen Betrieb ermöglicht wurde.

### **3.3 Baumaschinen-Testgelände**

Im Konzernlehrgelände der Firma STRABAG BMTI GmbH in Bebra konnte ROBDEKON insbesondere Tests der Grabestrategien für großflächigere Areale durchgeführt werden. In der Literatur finden sich hier häufig Boustrophedon-Ansätze, d. h. linienartiges hin und her Fahren, um eine Fläche zu bearbeiten [Kim20]. Allerdings reicht dieses Verhalten oftmals nicht aus, es ist vielmehr eine Strategie erforderlich, die nicht nur den Arbeitsradius des Baggers berücksichtigt, sondern gleichzeitig dafür sorgt, dass ein Transportfahrzeug für den Aushub an geeigneter Stelle bereitsteht. Für die Evaluation dieser Algorithmen

ist ein größeres Gelände erforderlich, das uns von der STRABAG BMTI GmbH freundlicherweise für Tests zur Verfügung gestellt wurde.

Aufgrund der Wetterverhältnisse wurde außerdem zwangsweise getestet, inwiefern das System mit sehr matschigem Untergrund zurechtkommt.

Es wurde untersucht, inwieweit die Beladungsalgorithmen mit unbekanntem Transportfahrzeugen zurechtkommen, bzw. wie schnell das Einpflegen neuer Ladeflächenmaße erfolgt.

Zusätzlich wurde außerhalb der eigentlichen Robotik geprüft, inwieweit sich digitale Beschreibungen, wie sie in der Baubranche üblich sind, in Aufgabenbeschreibungen für robotische Systeme umwandeln lassen. Dazu erhielten wir eine georeferenzierte Sollgeometrie als Dreiecksnetz im DXF-Format, die der Bagger erstellen soll. Dem folgte eine Aufbereitung mittels QGIS / GDAL, um die Geometriedaten zu laden und zu referenzieren. Dies macht im nächsten Schritt eine Interpolation des Dreiecksnetzes der Sollgeometrie erforderlich, die dann als Höhenmodell in Form eines GeoTIFFs abgespeichert wird. Im Zuge dessen werden gleichzeitig die gelieferten Daten aus dem ursprünglichen Referenzkoordinatensystem, in diesem Fall DHDN/Gauß-Krüger, in das vom Bagger erwartete ETRS89/UTM System überführt. Die Eingangsdaten für den autonomen Bagger werden derzeit als 2,5D-Höhenmodell im geographischen Koordinatensystem ETRS89/UTM beschrieben, da dieses Bezugssystem kartesisch ist und von vielen Behörden verwendet wird. Es stellt aktuell das Standardbezugssystem für die ATB des Fraunhofer IOSB dar. Nachfolgend wird dann die sog. Coverage-Planung für die einzelnen Positionen von Bagger und Transportfahrzeug für den Erdaushub durchgeführt. Ziel ist es, diesen Workflow für häufig in der Praxis anzutreffende Datenformate zu automatisieren.

### **3.4 Mülldeponie**

Ein Test in einer Originalumgebung wurde uns durch die Firmen PolyFaktur GmbH und HERMANN'S HTI-Bau GmbH u. Co. KG ermöglicht. Wir konnten das ROBDEKON-System auf einer echten (Rest-)Abfalldeponie in Meudt erproben. Die Deponie wird aktuell saniert und bisher noch unbearbeitete Teile des Abfallkörpers standen uns für Tests zur Verfügung. Hier wurden Szenarien evaluiert, die relevant für autonome Systeme auf Deponien und im Altlastenkontext sein dürften:

Es wurde das Graben am Hang untersucht, was sich durch eine geänderte Baggerlöffelführung auszeichnet, um auch hier eine ausreichende Füllung des Löffels mit Aushubmaterial sicherzustellen. Es zeigten sich Unterschiede zu den bisherigen Szenarien bei Bodenmaterial, das mit un- bzw. nur teilverrottetem Abfall durchsetzt war, da beispielsweise Stücke von Kunststofffolien aus der Baggerschaufel heraushängen können. Das macht eine robuste Hindernisvermeidung erforderlich, da Gegenstände außerhalb der Schaufel zunächst als zu vermeidendes Hindernis gelten.

Des Weiteren wurde überprüft, wie sich die entwickelten Algorithmen zum Ziehen von Gräben in einer realen Umgebung bewähren. Das Erstellen von Drainagegräben könnte zukünftig eine Aufgabe sein, die autonome Baumaschinen auf Deponiekörpern durchführen.

Zu guter Letzt wurde das Beladen von auf der Baustelle vorhandenen Transportfahrzeugen validiert, um zu demonstrieren, dass autonome Systeme nicht nur mit anderen autonomen Systemen zusammenarbeiten können, sondern auch ein Hybridbetrieb mit von Menschen bedienten Geräten möglich ist. Die Ladefläche eines gewöhnlichen Dumpers wurde als Abladebereich erkannt und der Dumper erfolgreich mit Aushubmaterial beladen.



Abbildung 4: Autonomer Bagger auf Mülldeponie. Autonome Erledigung von Grabeaufgaben am Hang (oben). Beladen eines gewöhnlichen Transportfahrzeugs (unten).

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Paper gibt einen Überblick über die Fortschritte und Herausforderungen im Bereich der autonomen Robotik zur Altlastensanierung und zeigt die Validierung der Systeme in realen Umgebungen. Das ROBDEKON-Kompetenzzentrum spielt hierbei eine zentrale Rolle, indem es innovative Lösungen für die Dekontaminationsrobotik entwickelt und mit Anwendern Anforderungen abstimmt. Als Demonstrator dient der autonome Bagger ALICE, der durch den Einsatz modernster Sensorik und Algorithmen bestimmte Aufgaben autonom erledigen kann. Die durchgeführten Praxistests in unterschiedlichen Umgebungen haben die Leistungsfähigkeit und Robustheit des Systems unter realen Bedingungen bestätigt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse tragen maßgeblich zur Weiterentwicklung und Anpassung der Algorithmen bei und stellen sicher, dass die Systeme praxistauglich und effizient sind.

Die zukünftige Arbeit im Bereich der autonomen Robotik zur Altlastensanierung wird sich auf mehrere Schlüsselbereiche konzentrieren. Erstens wird die Integration von maschinellem Lernen und KI-basierten Ansätzen weiter vorangetrieben, um die Autonomie und Effizienz der Systeme zu erhöhen. Dies umfasst die Verbesserung der Umgebungswahrnehmung, Entscheidungsfindung und Anpassungsfähigkeit der Roboter an wechselnde Bedingungen. Weiter wird ein verstärkter Austausch mit der Praxis angestrebt, um sicherzustellen, dass die entwickelten Technologien den tatsächlichen Bedürfnissen und Anforderungen der Endanwender entsprechen. Schließlich soll durch enge Zusammenarbeit mit Industriepartnern den Herstellern und Systemintegratoren der technologische Reifegrad vermittelt werden, damit autonome Robotersysteme zukünftig effizient, sicher und vielseitig einsetzbar sind.

## 5. Literatur

- [Emt17] Emter, T., Frese, C., Zube, A. et al. Algorithm Toolbox for Autonomous Mobile Robotic Systems. *ATZoffhighway worldwide* 10, 48–53 (2017). DOI: 10.1007/s41321-017-0037-0
- [Fre22] Frese, C, Zube, A., Woock, P., Emter, T., Heide, N. F., Albrecht, A., & Petereit, J.: An autonomous crawler excavator for hazardous environments, *at – Automatisierungstechnik*, 70(10), 2022
- [Kim20] Kim, J., Lee, D., & Seo, J.: Task Planning Strategy and Path Similarity Analysis for an Autonomous Excavator. In: *Automation in Construction*, 112 (Apr. 2020), S. 103108., ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103108
- [Mor24] Mortimer, P., Hagmanns, R., Granero, M., Luettel, T., Petereit, J., & Wuensche, H.-J.: The GOOSE Dataset for Perception in Unstructured Environments, *ICRA*, 2024.
- [Woo20] Woock, P.; Heide, N. F. & Kühn, D.: Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen, 16. Leipziger Deponiefachtagung (LDFT), 2020
- [Woo21] Woock, P.; Kühn, D. & Planthaber, S.: Unterstützung der Altlastensanierung durch moderne Robotersysteme, 21. Karlsruher Altlastenseminar, 2021
- [Woo22a] Woock, P.: Intelligente Robotik für die Altlastensanierung, 22. Karlsruher Altlastenseminar, 2022 (nur Vortrag)
- [Woo22b] Woock, P. & Babu, A., Franzius, V.: Altenbockum, M. & Gerhold, T. (Hrsg.), *Autonome Robotersysteme in der Altlastensanierung, Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement*, Rehm Verlag, 2022, 93. Aktualisierung, 3. Aufl.
- [Woo22c] Woock, P.; Petereit, J.; Frey, C. & Beyerer, J.: ROBDEKON – competence center for decontamination robotics, *at - Automatisierungstechnik*, 2022, 70 DOI: 10.1515/auto-2022-0072
- [Woo23] Woock, P. & Hagmanns, R.: Intelligente Robotik für die Deponie- und Altlastensanierung, *Proceedings of 33. ICP Deponie- und Altlastenseminar Karlsruhe*, 2023



# PFAS Sanierung auf dem NATO Flugplatz Wittmundhafen

Karsten Heine<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Der Standort Wittmundhafen - Historie und Ausgangslage.....	91
2. Herausforderungen für den Gesamtausbau .....	91
3. Sanierungsplan gem. § 13 BBodSchG – Rahmen- und Teilsanierungsplan .....	92
4. Planung, Bau und Inbetriebnahme der Bodenwaschanlage .....	94
5. Aufbereitungsschritte der Bodenwäsche.....	94
6. Betrieb der Bodenwaschanlage – Ergebnisse.....	95
7. Fazit und Ausblick .....	96

## 1. Der Standort Wittmundhafen - Historie und Ausgangslage

Nach den Stationierungsentscheidungen Anfang der 2010er Jahre setzt das Staatliche Baumanagement Niedersachsen seit 2018 ein Liegenschaftsbezogenes Ausbaukonzept (LBAK) für den NATO Flugplatz Wittmundhafen in Ostfriesland um. Das LBAK beinhaltet die nahezu komplette Umgestaltung und in weiten Teilen den Neubau der Flugplatzinfrastruktur mit zahlreichen Baumaßnahmen.

## 2. Herausforderungen für den Gesamtausbau

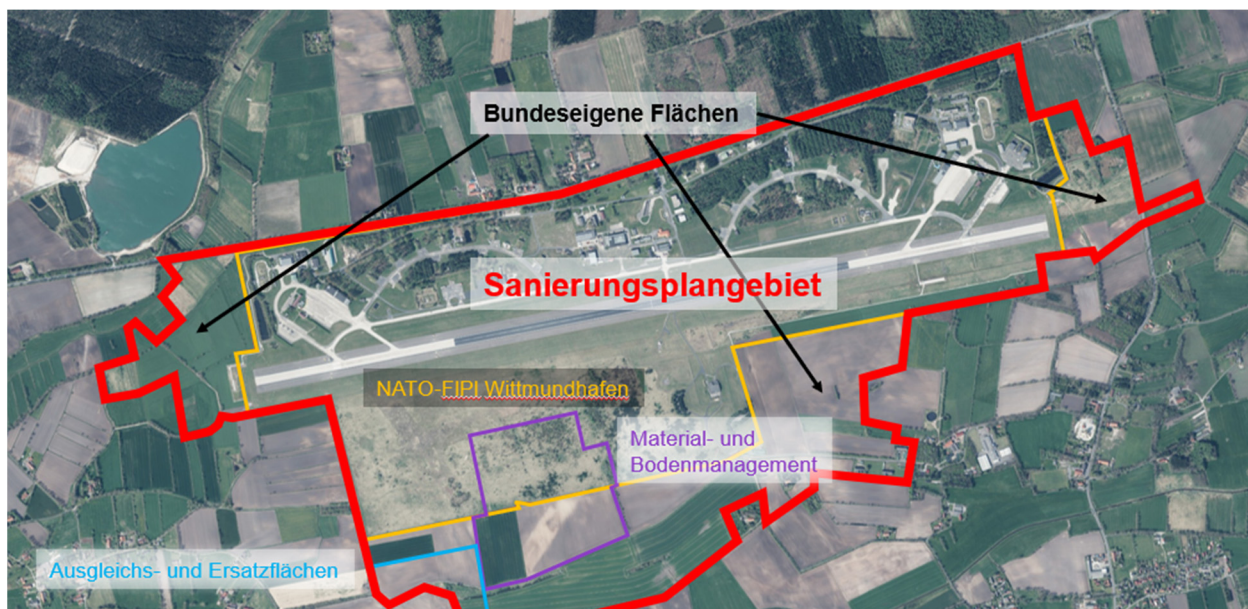


Abbildung: Geltungsbereich des Sanierungsplangebietes nach § 13 BBodSchG

Im Rahmen des bis in die 2030er Jahre dauernden Gesamtausbaus mit über 60 großen Teilbaumaßnahmen fallen 1,5 bis 2 Mio. m<sup>3</sup> Boden und mineralische Materialien an. Für den Umgang mit den großen

<sup>1</sup> Karsten Heine, Referat BL 37 – Leitstelle des Bundes für Boden- und Grundwasserschutz, Niedersächsisches Landesamt für Bau und Liegenschaften, E-Mail: karsten.heine@nbl.niedersachsen.de, Tel.: 0511 / 76351 200

Stoffströmen wurde ein Material- und Bodenmanagement (MBM) auf einer eigens dafür hergerichteten Fläche etabliert.

Im Laufe des Jahres 2022 wurde das MBM auf einer Erweiterungsfläche um eine Bodenwaschanlage zur Dekontamination von mit PFAS verunreinigten Böden erweitert.

Der Flugplatz liegt ca. zur Hälfte (westlicher Teil) im weiteren Einzugsgebiet des WW Harlinger Land, welches sich nordwestlich der Liegenschaft befindet.

Den oberflächennahen ungeschützten Grundwasserleiter bilden quartäre Sande. Diese sind überwiegend gleichförmig und eng gestuft. Der Flurabstand des Grundwassers ist mit ca. 2,5 bis 3,5 m unter GOK gering, so dass bei den vielfältigen Infrastrukturmaßnahmen mit Bodeneingriffen, wie Erneuerung, Sanierung, Erweiterung der Ver- und Entsorgung oder dem Neubau Regenrückhaltebecken, Maßnahmen zur Wasserhaltung getroffen werden müssen. Diese werden mit einer geeigneten Wasseraufbereitung über Aktivkohlefilter betrieben, um das gereinigte Grundwasser wieder infiltrieren zu können. Ausgehobene Böden werden in das MBM gebracht. Im Fall eines Kampfmittelverdachts erfolgt die Entfernung von Kampfmitteln vor der Bodenbehandlung in zwei Separationsanlagen (für Kampfmittel in einer Größe von 12,7 bis 50 mm)

### **3. Sanierungsplan gem. § 13 BBodSchG – Rahmen- und Teilsanierungsplan**

Die Genehmigung des Stoffstrommanagements erfolgte auf Grundlage des § 13 BBodSchG durch einen als verbindlich erklärten Rahmensanierungsplan für den gesamten Flugplatzstandort. Für das MBM und die Bodenwaschanlage wurde ein Teilsanierungsplan zum Rahmensanierungsplan erarbeitet und seitens der Bodenschutzbehörde ebenfalls für verbindlich erklärt.

Die Sanierungspläne (Rahmen-/Teilsanierungsplan) schließen alle genehmigungsrechtlichen Tatbestände (Wasser, Abfall, Immissionsschutz, ...) ein.

Grundlage für das MBM und ein effizientes Stoffstrommanagement ist ein Andienungs- und Abnahmekonzept mit Handlungsanweisung zum Umgang mit den Böden (Ein- und Ausbau).

Alle im Rahmen der vielen Einzelmaßnahmen anfallenden Böden und mineralischen Materialien müssen dem MBM angedient werden. Alle in den Einzelmaßnahmen benötigten Böden und mineralischen Materialien werden, sofern möglich, in den geforderten Qualitäten vom MBM bereitgestellt.

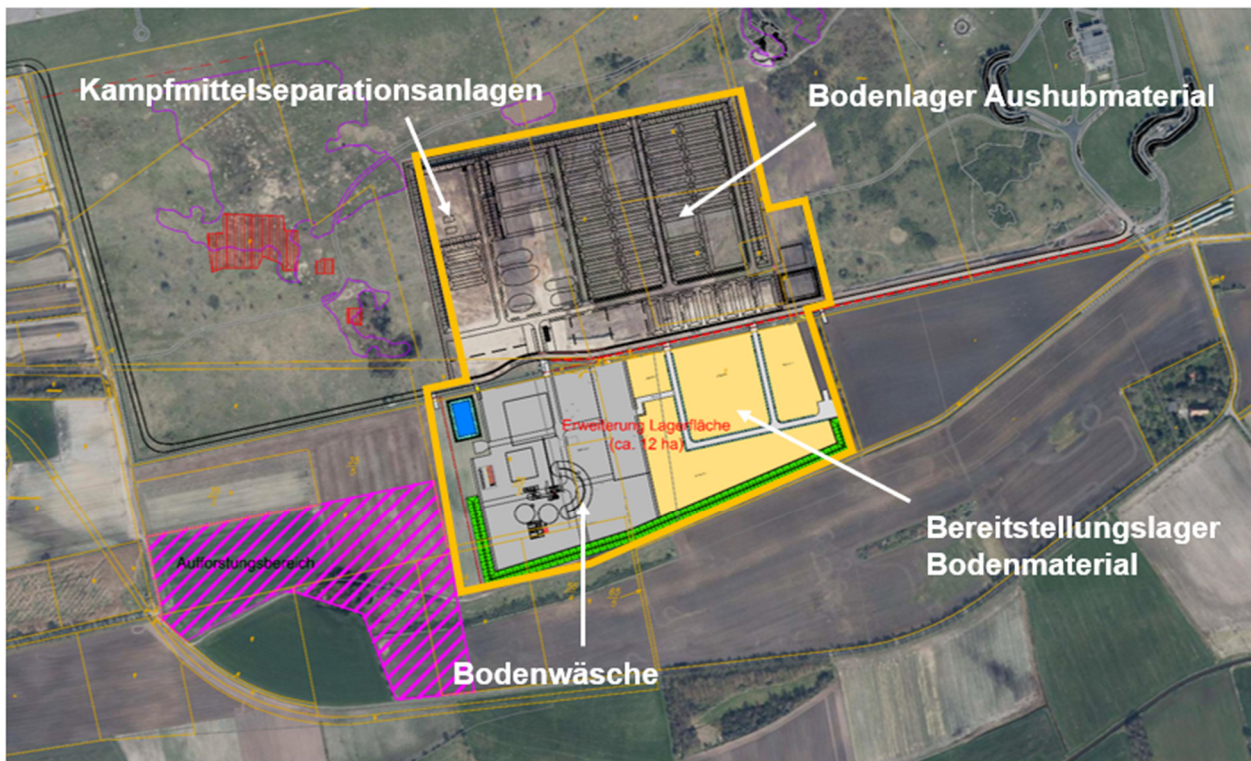


Abbildung: Flächenaufteilung im Material- und Bodenmanagement

Die Notwendigkeit der Bodenbehandlung ergab sich aus den im Rahmen der Kontaminationsbearbeitung der Bundeswehr und im Vorfeld der Baumaßnahmen durchgeführten Boden- und Grundwasseruntersuchungen. Der Kontaminationsverdacht für PFAS hat sich bei mehreren kontaminationsverdächtigen Flächen bestätigt. Neben in Teilen auch flächigen Verunreinigungen sind dies u.a. das Brandübungsbecken (Abb.), die Start- und Landebahn, die Feuerwache und die Lärmschutzhallen.



Abbildung: Feuerlöschübungsbecken (FÜB) auf dem NATO Flugplatz Wittmundhafen – ein Hotspot der Verunreinigungen mit PFAS

## 4. Planung, Bau und Inbetriebnahme der Bodenwaschanlage

Kernelement des Stoffstrommanagements ist die 2022 errichtete und seit Anfang 2023 betriebene Bodenwaschanlage mit folgenden Hauptkomponenten:

1. Logistikflächen zur Bereitstellung der mit PFAS verunreinigten Böden
2. Aufgabereinheit mit Förderung zur Wascheinheit
3. Wascheinheit zur Klassierung der Kornfraktionen (Überkorn, Sand, Feinkorn)
4. Kammerfilterpresse zur Entwässerung der abgetrennten Feinfraktion
5. Ausgabereinheit für gereinigte Böden (je Box 1.000 m<sup>3</sup>)
6. Wasseraufbereitung (Wasseraktivkohle) mit vier parallelen Straßen
7. Lagerflächen für Filterkuchen

Die Bodenwaschanlage ging nach einem mehrmonatigen Probetrieb Anfang 2023 in den Regelbetrieb.



Abbildung: Bodenwaschanlage – Gesamtansicht im südlichen Teil des Material- und Bodenmanagements

## 5. Aufbereitungsschritte der Bodenwäsche

### 5.1 Waschprozess

Der mehrstufige Wasch- und Behandlungsprozess umfasst folgende Schritte:

- Materialaufgabe und Anmischen des Bodens

- Abtrennung Überkorn > 3 mm
- Aufstromklassierung mit Abtrennung der Feinkornbestandteile < 0,063 mm
- Entwässerung der Fraktion 0,063 mm bis 3 mm auf Wassergehalt < 20%

## 5.2 Wasseraufbereitung

Die Aufbereitung und Behandlung des Waschwassers erfolgt in folgenden Anlageneinheiten:

- Sammlung (belastetes) Waschwassers in einem Vorlagebehälter  
 $V = 3.000 \text{ m}^3$
- Wasserreinigungsanlage Wasseraktivkohle, 4-strassig mit  $Q_{\max} = 200 \text{ m}^3/\text{h}$
- Vorlagebehälter Reinwasser  
 $V = 3.000 \text{ m}^3$

## 5.3 Behandlung der Feinkornfraktion

Der Feinkornanteil < 0,063 mm durchläuft nach Abtrennung im Aufstromklassierer die folgenden Entwässerungsschritte:

- Schrägllamellenklärer
- Kammerfilterpresse
- Verwertung oder Entsorgung (je nach PFAS-Gehalt)

## 6. Betrieb der Bodenwaschanlage – Ergebnisse

Seit Januar 2023 wurden mehr als 150.000 Tonnen Boden gewaschen. Ca. 95 % des Ausgangsmaterials erreichen nach einem Waschgang die Schwelle für den uneingeschränkten Wiedereinbau auf dem Standort im Rahmen der verschiedenen Baumaßnahmen.

D. h. die PFAS-Gehalte liegen sämtlich unterhalb der Geringfügigkeitsschwelle (GFS) bzw. unterhalb des gesundheitlichen Orientierungswerts (GOW für 13 PFAS gem. Leitfaden BMUV, 2022). Der Filterkuchen aus der Kammerfilterpresse ist nicht durchgängig mit PFAS belastet, so dass selbst dieser verwertet werden kann.

Nach den bisherigen Ergebnissen verbleiben weit über 90 % der PFAS im Waschwasser und adsorbieren damit auf der Wasseraktivkohle in der Wasserreinigungseinheit.

Die Aktivkohle wird in einer speziellen Anlage regeneriert und gelangt im Anschluss zurück nach Wittmundhafen. Die desorbierten PFAS werden nach dem Regenerationsprozess unter Hochtemperatur im Abgasstrom zerstört.

## **7. Fazit und Ausblick**

Die bisherige Strategie zur Bodenbehandlung hat sich neben den positiven Aspekten des Bodenschutzes als wirtschaftlich herausgestellt. Andernfalls hätten sehr große Bodenmengen außerhalb des Standortes entsorgt und im Gegenzug eingekauft werden müssen. Die Frage der Wirtschaftlichkeit hängt von der kontinuierlichen Anlieferung im und der Abnahme aus dem MBM ab.

Alle in die Planungs- und Bauprozesse involvierten Akteure der vielen parallel laufenden Baumaßnahmen tragen damit zum Erfolg des Stoffstrommanagements bei.

Planungshorizont für den Betrieb der Bodenwäsche ist zunächst ein Zeitraum von ca. 5 Jahren.

Derzeit werden Überlegungen angestellt, auch Böden von anderen Standorten der Bundeswehr in Wittmund zu behandeln. Die konzeptionelle Betrachtung und die Prüfung der genehmigungsrechtlichen Möglichkeiten sollen bis Ende 2024 erarbeitet werden.

# **Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten bei der Boden- und Grundwassersanierung: Verhältnismäßigkeit 2.0?**

**Bakenhus Albrecht, Horn Kevin, Dr. Jacobs Patrick, Dr. Reetsch Annika<sup>1</sup>**

## **Inhalt**

1. Einleitung.....	97
2. Ergebnisse.....	99
3. Diskussion.....	100
4. Referenzen.....	101

## **1. Einleitung**

Die Minimierung des Neu-Flächenverbrauchs für Wohn-, Gewerbe und Industrienutzung führt unweigerlich zu einer Um- bzw. Neunutzung von Altflächen (Brachflächen, „Brownfields“). Die Voraussetzung hierfür ist eine entsprechend der geplanten Nutzung dimensionierte Boden- und/oder Grundwassersanierung (GW-Sanierung).

Viele der derzeit in Betrieb befindlichen GW-Sanierungen haben eine Laufzeit von vielen Jahren oder gar Jahrzehnten. Bisher wurden bei diesen von Zeit zu Zeit, u. a. im Rahmen von Sanierungsaudits, Effektivität, Effizienz und Verhältnismäßigkeit der Maßnahmen überprüft und diese wurden anschließend ggfs. optimiert. Bei Bodensanierungen bleibt eine solche Analyse oftmals aus.

Die aktuellen Überlegungen zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten finden ebenfalls Anwendung in der Ökobilanzierung („Life Cycle Assessment“) und führen zu einer Neubewertung von geplanten Bodensanierungen und langlaufenden Grundwassersanierungsmaßnahmen. Im Folgenden stellen wir zwei anonymisierte Sanierungsbeispiele vor und zeigen mögliche Aspekte und Konsequenzen bei der Berücksichtigung einer höheren ökologischen Nachhaltigkeit auf.

Was bedeutet „Nachhaltigkeit“ im Bereich der Boden- und Grundwassersanierung?

Nachhaltigkeit im Bereich Boden- und Grundwassersanierung kann verschiedene Aspekte beinhalten. Zum einen können potentielle ökologische Beeinträchtigungen des Sanierungsgebietes und des dazugehörigen Landschafts- und Naturraumes, potentielle Veränderungen oder Einschränkungen der Ökosystemdienstleistungen und die Klimawirksamkeit eine Rolle spielen. Zum anderen können ebenso soziale Faktoren mit hinzugezogen werden, wie zum Beispiel die Beteiligung aller betroffener Parteien, einschließlich der AnwohnerInnen, aber auch gesundheitliche Faktoren, wie Lärmbelästigung und die gesundheitsbeeinträchtigende Wirkung von Abgasen, die durch den Abtransport von Material entstehen.

---

<sup>1</sup> Bakenhus Albrecht, Horn Kevin, Dr. Jacobs Patrick, Dr. Reetsch Annika, TAUW GmbH, Leverkusen, Berlin, albrecht.bakenhus@tauw.com

**Beispiel 1: Bodensanierung im innerstädtischen Bereich (anonymisiert)****Methodik**

Die Ökobilanz wird in der ISO-Norm 14040 als die Zusammenstellung und Bewertung der Inputs, Outputs und potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems während seines gesamten Lebenszyklus definiert. Der Zweck einer Ökobilanz besteht darin, die potenziellen Umweltauswirkungen einer Tätigkeit, eines Produkts oder Prozesses zu ermitteln, zu quantifizieren und zu bewerten und einen Einblick in Verbesserungsmöglichkeiten zu geben. Für die Bilanzierung werden die folgenden vier Phasen durchlaufen: 1. Zielsetzung, Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen, 2. Sachbilanz, 3. Wirkungsabschätzung und 4. Auswertung und Interpretation

Eine Ökobilanz konzentriert sich auf die (hauptsächlich quantitative) ökologische Dimension der Nachhaltigkeit und kann in vielerlei Hinsicht eingesetzt werden, von der Berichterstattung, dem Benchmarking und der Überwachung bis hin zur Ermittlung von Verbesserungsmöglichkeiten und dem Ökodesign (Ermittlung von Hotspots oder Hauptverursachern von Umweltauswirkungen).

In dem ersten hier vorgestellten Fallbeispiel zur Bodensanierung wurde mit der LCA-Software „SimaPro“ der Transport von nicht-gefährlichem Bodenmaterial modelliert. Die zugrundeliegenden Eingangsdaten wurden aus zwei anonymisierten Projekten der TAUW GmbH entnommen, die hier als Fallbeispiele dienen. Die Daten für die Ökobilanzierung stammen aus der Ecoinvent-Datenbank. Für die Wirkungsabschätzung wurde die schadensorientierte Methode „ReCiPe16 midpoints“ nach Huijbregts et al. (2017) verwendet, welche insgesamt 18 Umwelt- und Gesundheitsindikatoren umfasst. Diese Analyse kommt keiner vollständigen Ökobilanzierung gleich. Es handelt sich hier um eine Schnellanalyse. Zudem wurden die folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen:

- jede LKW-Fahrt berücksichtigt die Anfahrt vom Betreiber zur Baustelle (Leerfahrt), die Fahrt von der Baustelle zu einer Deponie, sowie eine weitere Leerfahrt.
- Als Transportmittel wurde ein „>32 Tonnen Sattelkipper“ gewählt, welcher der Abgasnorm „Euro 6“ entspricht.
- Bei Volumenangaben des Bodenmaterials in Kubikmetern wurde der Umrechnungsfaktor zu Tonnen von 1,7 angenommen ( $1 \text{ m}^3 = 1,7 \text{ t}$ ).

Im innerstädtischen Bereich einer Großstadt in Nordrhein-Westfalen wurde, nach Rückbau aller Gebäude der darunter anstehende Boden durch Aushub saniert. Insgesamt wurden hierfür rund 68.588 t Boden, der in vier verschiedene Entsorgungskategorien eingeteilt wurde, transportiert (Tabelle 1). Dieses Bodenmaterial wurde von verschiedenen Transportunternehmen von der Baustelle zu diversen Deponien transportiert, um dort entsorgt zu werden. Die Entfernungen vom Transporteur zur Baustelle betragen zwischen 16 und 120 km; der Mittelwert lag bei 74 km. Die Entfernungen von der Baustelle zur Deponie betragen im Mittel 69 km und variierten zwischen 37 und 86 km. Die Entfernung von einer Deponie zum Transporteur betragen im Mittel 71 km und variierten zwischen 43 und 120 km für eine Fahrt. Insgesamt entstand eine Transportleistung von rund 5,3 Millionen tkm.



Tabelle 1 Eingangsdaten für die Transportleistung einer innerstädtischen Bodensanierung.

Entsorgung/ Verwertung*	Entsorgtes Bodenmaterial [t]	Transportleistung [tkm]
Z0	61.713	4.381.623
Z1	138	24.844
Z2	5.482	520.549
>Z2	1.255	341.437
Summe	<b>68.588</b>	<b>5.268.453</b>

## 2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass durch diese Transportleistung potentiell 458 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente entstanden sind, die zur globalen Erwärmung beitragen (Tabelle 2). Hohe Werte berechnen sich auch bei der terrestrischen Ökotoxizität sowie bei (nicht) karzinogenen Toxizität für den Menschen sowie der Verknappung von fossilen Rohstoffen. Die beiden Faktoren der Toxizität berücksichtigen die Umweltpersistenz (Verbleib) und die Akkumulation in der menschlichen Nahrungskette (Exposition) sowie die Toxizität (Wirkung) einer Chemikalie. Die Einheit ist Jahr/kg emittiertes 1,4-Dichlorbenzol (1,4-DCB).

Tabelle 2 Auszug aus den Ergebnissen der Schnellanalyse für den Abtransport von Bodenmaterial aus einem innerstädtischen Bereich in NRW. Die Ergebnisse wurden unter Anwendung der ReCiPe16 Methode mit SimaPro simuliert. 1,4-DCB = 1,4-Dichlorbenzol.

Wirkungskategorie	Einheit	Wert
Globale Erwärmung	kg CO <sub>2</sub> eq	458.000
Terrestrische Ökotoxizität	kg 1,4-DCB	11.651.277
Nicht karzinogene Toxizität beim Menschen	kg 1,4-DCB	321.205
Verknappung fossiler Ressourcen	kg Öl eq	169.727
Globale Erwärmung	kg CO <sub>2</sub> eq	458.000

Ein Großteil (90%) des transportiertes Materials hätte uneingeschränkt wieder eingebaut werden können. Dies wäre jedoch nur mit positiven Auswirkungen auf Umwelt und Mensch verbunden, wenn regional nahe liegende Verwendungsmöglichkeiten gefunden werden könnten. Zu beachten ist ebenfalls, dass hier nur die Transportleistung analysiert wurde. Andere mit der Bodensanierung in Verbindung stehende Aspekte, wie der technische Aufwand das Material auszuheben, wurden nicht berücksichtigt. Es ist daher davon auszugehen, dass die Bilanz bei Betrachtung aller Aktivitäten negativer ausfallen würde.

Bei Aushubmaßnahmen fallen oft größere Mengen gering- oder unbelastete Materialien an. Werden diese über weite Strecken, zur Verbringung oder zur Wiederverwertung, transportiert, hat dies einen großen Einfluss auf eine negative Nachhaltigkeitsbilanz.

## Beispiel 2: Langlaufende Pump-and-Treat – Grundwassersanierung

Bei einer seit Ende der 90er Jahre betriebenen CKW - Grundwassersanierung werden seit ca. 15 Jahren rückläufige Schadstoffkonzentrationen und -austräge registriert, die Entnahmemenge weist eine leichte Abnahme auf (Abbildung 2). Durch die Rückläufigen CKW-Gehalte bzw. Austräge steigt der Energie- und Wasserverbrauch bezogen auf die CKW-Austragsmenge. Das CO<sub>2</sub>-Äquivalent (CO<sub>2</sub>-EQ) wurde hier nur aus dem Energie bzw. Stromverbrauch der Reinigungsanlage berechnet. Nicht berücksichtigt werden hier Aufwand entstehend aus Wartung, Aktivkohlewechsel und -verbrauch, Analytik. Die Berechnung erfolgte aus dem Energieverbrauch in kW/h multipliziert mit dem CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor Strommix (Artikel Umweltbundesamt vom 22.05.2023 unter [CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilowattstunde Strom stiegen in 2022 | Umweltbundesamt](#)).

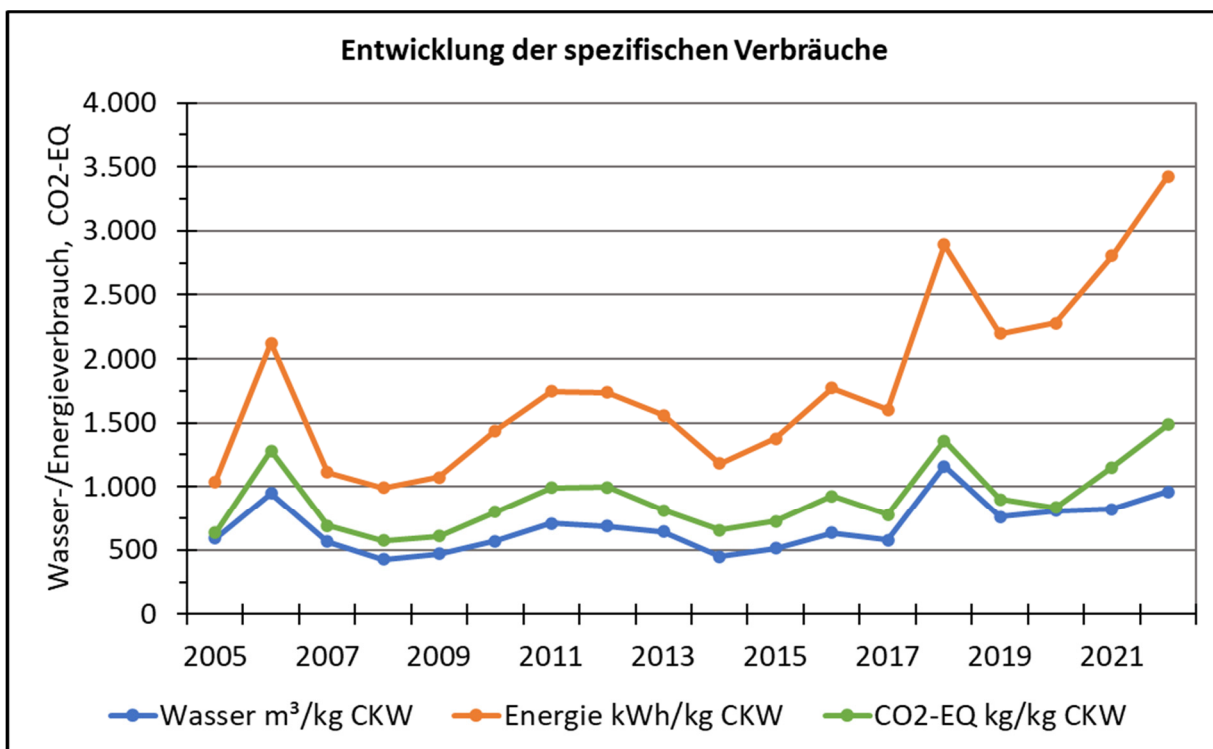


Abbildung 1: Entwicklung der spezifischen Verbräuche bezogen auf den Schadstoffaustrag.

Wurde bislang im Rahmen von Sanierungsaudits bzw. Verhältnismäßigkeitsprüfungen in der Regel der Aufwand (Energie, Wasser, Kosten) ins Verhältnis zum Austrag gesetzt und betrachtet, werden zukünftig möglicherweise Nachhaltigkeitsparameter, wie z. B. CO<sub>2</sub>-EQ, mit einbezogen werden. Summarisch wurden seit den Aufzeichnungen ab 2005 ein Äquivalent von ca. 364 t CO<sub>2</sub> verbraucht.

## 3. Diskussion

Bei Boden- und auch Grundwassersanierungen stehen der Schadstoffentlastung eine Umweltbelastung resultierend aus Rohstoffverbrauch (Wasser, Öl, Metalle, etc.) und Energieverbrauch (Strom, Transporte, etc.), berechnet als CO<sub>2</sub>-EQ, gegenüber. Die notwendige und geforderte Schadstoffentlastung bzw. eine akzeptable Umwelt(rest)belastung wird dabei unter Berücksichtigung der Gefährdung (Situation, Potential) festgelegt.

Eine Einordnung der hier berechneten Werte bezogen auf eine solche Sanierungsmaßnahme, handelt es sich hier um hohe oder eher niedrige Werte, kann derzeit noch nicht getroffen werden. Die Datenlage ist hierfür noch zu gering. Bei einer zukünftigen Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten sollten verschiedene Fragen geklärt werden (zu vervollständigenden).

- Nachhaltigkeitsparameter:
  - Welche können verlässlich ermittelt bzw. berechnet werden?
  - Welche sind zur Bewertung von Boden- und Grundwassersanierungen sinnvoll?
- Einordnung der Werte
  - Schaffung einer ausreichenden Datengrundlage zur Bewertung der Parameter-Werte.
  - Gewichtung der Nachhaltigkeit für die Berücksichtigung bei einer Verhältnismäßigkeitsbetrachtung: „Wieviel kg CO<sub>2</sub>-EQ darf die Entfernung von 1 kg Schadstoff kosten?“

Bei der Planung von Boden- bzw. Grundwassersanierungen sollten auch Alternativen in Erwägung gezogen werden, die in dieser Form bislang selten oder nicht betrachtet werden:

- kürzere Transportwege zu nähergelegenen aber teureren Deponien?
- Aufweitung der Grenzwerte für Wiederverwertung/Deponierung?
- Angepasste Auslegung von Sanierungszielen?
- Wenn keine „nachhaltige“ Sanierungsmöglichkeit gegeben: keine Bodensanierung bei eingeschränkter Nutzungsmöglichkeiten akzeptieren?
- Neubewertung der Umweltgefährdung unter Einbeziehung der Nachhaltigkeitsaspekte?
- Einstellung einer Sanierung? „Sanierung bis zum letzten Gramm Schadstoff“?

### Schlussfolgerungen

Es wird keine Sanierung bzw. Lösung geben, welche die Umwelt nicht in irgendeiner Weise belastet. Es wird zukünftig dann eher darum gehen, diejenige Lösung zu finden und umzusetzen, welche die Umwelt unter Berücksichtigung der möglichen Gefährdung und der Nachhaltigkeitsaspekte und -kriterien am wenigsten schädigt.

## 4. Referenzen

- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F. et al. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int J Life Cycle Assess* 22, 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Klöpffer, W. and Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*. Weinheim, Germany. Wiley-VCH, 440 pp., ISBN 978-3-527-32986-1
- Pré SimaPro (2023). <https://pre-sustainability.com/articles/lca-and-c2c-friends-or-foes/>, <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>



# Vorsorgender Bodenschutz durch Einsatz eines Bodenschutzkonzepts und einer bodenkundlichen Baubegleitung

Dr. Silvia Lazar<sup>1</sup> und Julia Eisele<sup>2</sup>

## Inhalt

1. Bodenschutzkonzepte in der Anwendung .....	103
2. Grundsätzliches zu Bodenschutzkonzepten .....	106
3. Literatur .....	107

## 1. Bodenschutzkonzepte in der Anwendung

### 1.1 Inhalte eines Bodenschutzkonzeptes

Die Regelungen der DIN 19639 „Bodenschutz bei Planung und Durchführung von Bauvorhaben“ zählen mittlerweile zu den anerkannten Regeln der Technik, auf die § 4 Abs. 5 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung explizit hinweist. Ein zentrales Kernstück der DIN 19639 ist hierbei die Erstellung eines Bodenschutzkonzeptes als Grundlage einer Bodenkundlichen Baubegleitung. Nach § 2 Abs. 3 Landes-Bodenschutz- und Altlastengesetz ist bei Vorhaben, die auf mehr als 0,5 Hektar auf natürliche Böden einwirken, vom Vorhabenträger ein Bodenschutzkonzept zu erstellen.

Dass einheitliche Regelungen zum Bodenschutz bei Bauvorhaben sinnvoll sind, hatten zuvor bereits Erfahrungen aus der Schweiz gezeigt. Kostspielige Aufwendungen nach Bauende, die aufgrund mangelnder Bodenqualität notwendig wurden, oder die Weigerung von Eigentümern, dem Bau von Infrastrukturmaßnahmen zuzustimmen, weil landwirtschaftliche Flächen langfristig beeinträchtigt würden, führte bei verschiedenen Vorhabenträgern zur Entscheidung, selbstständig Maßnahmen zum Bodenschutz beim Bauen umzusetzen.

Durch die Beteiligung von Akteuren aus der Bauwirtschaft bei der Erarbeitung der DIN konnten praxisrelevante Erfahrungen in die Vorgaben der DIN einfließen. Wesentlich aus dieser Perspektive war beispielsweise, dass Maßnahmen für die Bauphase im Vorfeld – durch ein „Bodenschutzkonzept“ - geplant und beauftragt werden müssen, da diese Maßnahmen in der Regel kostenrelevant sind und hierbei ein effektiver Bauablauf mitgedacht werden kann.

Ein Bodenschutzkonzept sollte nach DIN 19639 hierbei die in Tabelle 1 aufgeführten folgenden Inhalte abdecken. In welchem Umfang die einzelnen Punkte abzuhandeln sind, ist von den Rahmenbedingungen des Vorhabens im Einzelfall abhängig.

---

<sup>1</sup> Dr. Silvia Lazar, Regierungspräsidium Freiburg, [silvia.lazar@rpf.bwl.de](mailto:silvia.lazar@rpf.bwl.de)

<sup>2</sup> Julia Eisele, Regierungspräsidium Stuttgart, [julia.eisele@rps.bwl.de](mailto:julia.eisele@rps.bwl.de)

Tabelle 1: Inhalte des Bodenschutzkonzeptes nach DIN 19639

Nr.	Inhalte	Zu klären (vereinfacht)
a)	Vorhabenbeschreibung	Wo, wie und wann ist das Bauvorhaben geplant?
b)	Datenerfassung	Wie verdichtungs- bzw. erosionsempfindlich sind die Böden im Plangebiet?
c)	Zu erwartende Beeinträchtigungen	Überlagerung von a) und b): Wo und wie stark werden Böden beeinträchtigt?
d)	Maßnahmenbeschreibung	Wie können die erwarteten Beeinträchtigungen aus c) vermieden werden?
e)	Bodenschutzplan	Wo und in welchem Umfang sind die Maßnahmen aus d) konkret anzuwenden?
f)	Informationsvermittlung	Wie und durch wen werden die Informationen aus d) und e) vermittelt?
g)	Dokumentation	Wie werden die Maßnahmen aus d) und e) dokumentiert?
h)	Rekultivierung	Wie werden die Böden rekultiviert?
i)	Zwischenbewirtschaftung	Kann eine Zwischenbewirtschaftung umgesetzt werden? Wenn ja, durch wen und wie lange?
j)	Maßnahmen bei Funktionseinschränkungen	Falls abzusehen ist, dass die zu erwartenden Beeinträchtigungen nicht vermieden werden können, welche Maßnahmen zur Wiederherstellung sind vorgesehen?

Für die Erstellung des Bodenschutzkonzeptes wird in DIN 19639 ein Mindestdatensatz angegeben, der notwendig ist, um die Bodeneigenschaften und -empfindlichkeiten zu bewerten. Minimal notwendig ist hierbei die Angabe der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden und der Erosionsgefährdung.

## 1.2 Umfang von Bodenkartierungen

Im Einzelfall ist oftmals bei der Beauftragung des Bodenschutzkonzeptes zu klären, in welchem Umfang Bodenkartierungen notwendig sind, um die Verdichtungsempfindlichkeit und Erosionsempfindlichkeit bestimmen zu können. Dabei sind nach DIN 19639 alle Böden als verdichtungsempfindlich anzusehen – Ausnahmen sind Sandböden, deren Ton- und Schluffgehalt unter 15 % und Humusgehalt unter 8 % liegen oder Böden mit einem Grobbodenanteil von mehr als 75 %.

Insofern sind Bodenkartierungen – durchgeführt nach KA 5 bzw. DIN 4220) – vor allem dann sinnvoll, wenn sich abzeichnet, dass im Plangebiet abweichend verdichtungsempfindliche Böden vorliegen: entweder weil sie wenig oder weil sie besonders stark verdichtungsempfindlich sind. Letztes liegt z.B. bei grundwasserbeeinflussten Böden vor. Grundsätzlich ist hierbei eine erste Orientierung anhand von Bodenkarten im Maßstab 1:50.000 sinnvoll. Zu beachten ist jedoch, dass sich teilweise innerhalb einer Kartiereinheit deutliche Profilunterschiede zeigen können. Abbildung 1 zeigt beispielhaft, dass sich innerhalb der Kartiereinheit „Braunerde – a3 nach LGRB-Kartenviewer“ sowohl sehr mächtige Böden am Hangfuß als auch sehr geringmächtige Böden im Kuppenbereich befinden. Da diese Unterschiede für die notwendigen Maßnahmen in der Bauphase haben, ist hier eine Kartierung zur Abgrenzung der Verdichtungsempfindlichkeit sinnvoll.

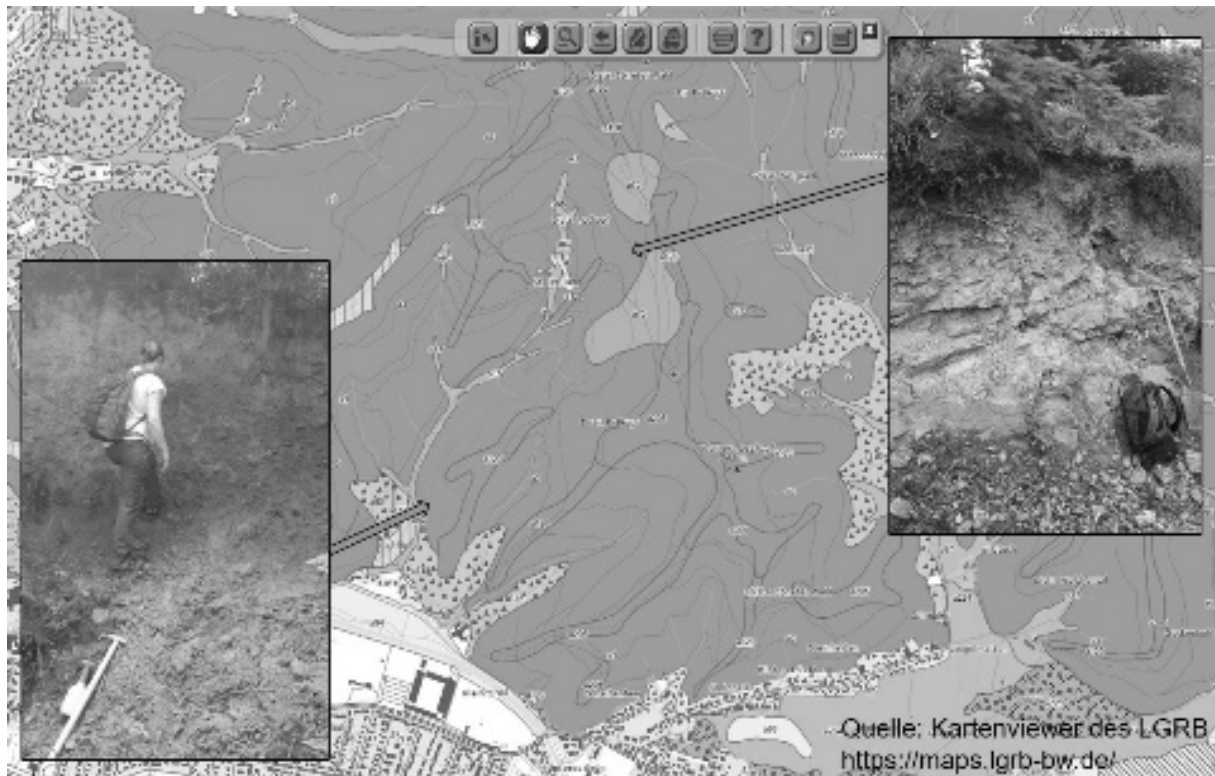


Abbildung 1: Beispiel aus dem Kartenviewer des LGRB mit zwei Profilen innerhalb der Kartiereinheit „a3“:  
Braunerde aus Paragneisschutt führenden Fließerdalen und Hangschutt

### 1.3 Böden Maßnahmen zum Schutz

Sinnvollerweise werden die notwendigen Maßnahmen auf Grundlage der Empfindlichkeiten von Böden geplant. Die Maßnahmen werden hierbei konkreten Flächen zugeordnet, die kartografisch in einem Maßnahmenplan, dem sog. Bodenschutzplan dargestellt werden.

Wesentlich ist hierbei, dass die Bestellung einer Bodenkundlichen Baubegleitung zur Begleitung eines Bauvorhabens die Erstellung von geeigneten Planunterlagen, d.h. einem Bodenschutzkonzept, voraussetzt. Nach der Philosophie der DIN 19639 agiert eine Bodenkundliche Baubegleitung auf der Grundlage der in einem Bodenschutzkonzept genannten Maßnahmen. Je konkreter diese beschrieben sind, desto effektiver kann der Bauablauf und der Schutz der Böden gewährleistet werden.

### 1.4 Ziele eines Bodenschutzkonzeptes

Wesentliches Ziel eines Bodenschutzkonzeptes ist die Umsetzung von effektiven Bodenschutzmaßnahmen im Bauvorhaben unter Berücksichtigung des Bauablaufs. Welche Maßnahmen effektiv sind, hängt vom Standort und dem Vorhaben ab. Die Verschneidung der Standortseigenschaften mit der Baumaßnahme bildet somit die Grundlage für die Erarbeitung geeigneter Maßnahmen.

## 2. Grundsätzliches zu Bodenschutzkonzepten

### 2.1 Ausrichtung des Bodenschutzkonzepts am Ziel

Das bodenkundliche Wissen stellt die Ausgangsbasis für die Erstellung des Bodenschutzkonzepts dar. Das Kernstück sind jedoch die projektspezifischen und standortangepassten Bodenschutzmaßnahmen. Darauf sollte das Bodenschutzkonzept ausgerichtet sein.

### 2.2 An wen richtet sich das Bodenschutzkonzept?

Wie in allen Projekten sind mehrere Akteure bei Baumaßnahmen beteiligt. Die Haupt-Adressaten eines Bodenschutzkonzepts sind:

- Behörde:  
Ist das Bodenschutzkonzept genehmigungsfähig?
- Planende / Vorhabenträger:  
Was muss in die Ausschreibung? Was ist kostenrelevant?
- Bauausführung / Bauleitung:  
Wie sollen die ausgeschriebenen Maßnahmen umgesetzt werden?
- Bodenkundliche Baubegleitung:  
Welche Vorgaben sind einzuhalten/umzusetzen? Wann sind Bauleitung und Vorhabenträger zu informieren?

Ein Bodenschutzkonzept sollte verständlich formuliert sein und sich auf die baurelevanten Inhalte konzentrieren. Viele Informationen erhöhen scheinbar zwar die Wahrscheinlichkeit, alle notwendigen Punkte abzudecken, führen aber schnell zur Unübersichtlichkeit. Bodenbildende Prozesse mögen etwa entscheidend für die Entstehung der Böden sein, leiten sich daraus jedoch keine bodenschutzrelevanten Maßnahmen ab, ist zu überlegen, ob diese Informationen im Bodenschutzkonzept näher erläutert werden müssen. Je konkreter die Aussagen und Vorgaben eines Bodenschutzkonzeptes sind, umso belastbarer wird das Konzept. Werden beispielsweise die anfallenden Bodenmassen und die sich daraus ergebenden Lagerflächen unzureichend ermittelt, kann dies nachträglich zu hohen Zusatzkosten führen. Zur verständlichen Formulierung gehört auch die klare Trennung zwischen Vorgaben und reinen Empfehlungen. Ein Bodenschutzkonzept ohne konkrete Vorgaben ist nicht genehmigungsfähig. Diese sollten jedoch immer auf den Bauablauf bezogen und kontrollierbar sein. Lediglich allgemeine Formulierungen, wie beispielsweise „Der Boden sollte nicht bei Nässe befahren werden“ sind nicht zielführend und können in der Ausschreibung nicht berücksichtigt werden, da sowohl ein Eingreifwert als auch die sich für den Bauablauf ergebenden Konsequenzen (z.B. der Einsatz von Baggermatten auf einer Fläche von x m<sup>2</sup>) fehlen.

### 2.3 Das Bodenschutzkonzept aus Behördenperspektive

Die Behörde prüft das gesamte Bodenschutzkonzept auf Genehmigungsfähigkeit. Dabei liegt das Augenmerk unter anderem auf folgenden Aspekten:

- Abgrenzung des Geltungsbereichs (Fläche und Aufgaben)



- Ausreichende Ermittlung/Schätzung von BE- und Lagerflächen und Massenbilanz
- Belastbarkeit der An- und Vorgaben
- Erfassung Bodenkundlicher Daten
- Projektspezifische und standortsangepasste Ausarbeitung
- Aktualität der rechtlichen Grundlagen und des Stands der Technik
- Umgang mit überschüssigem kulturfähigem Bodenmaterial

## **2.4 Struktur und Qualitätssicherung**

In einem gut strukturierten Bodenschutzkonzept bauen die einzelnen Kapitel aufeinander auf. Über Verweise zwischen den Kapiteln kann eine Fragestellung schnell beantwortet werden. Befindet sich z.B. im Baufeld ein Bereich mit anthropogen belastetem Bodenmaterial, wird dieser in der Beschreibung des Standorts mit seinen Eigenschaften und Ausmaßen erfasst. Zudem werden Verweise zu den Kapiteln eingefügt, die für dieses Bodenmaterial relevant sind (z.B. separate Lagerung).

Der Einsatz von vorformulierten Textbausteinen ist nur dann sinnvoll, wenn sich daraus keine widersprüchlichen oder missverständlichen Aussagen ergeben. Daher ist immer eine abschließende Kontrolle erforderlich. Diese Qualitätssicherung ist zunächst zwar mit Aufwand verbunden, spart jedoch zeitaufwändige Nacharbeiten und langwierige Diskussionen während des Baus über missverständlich formulierte oder nicht bedachte Punkte.

Selten liegen zum Zeitpunkt der Erstellung eines Bodenschutzkonzepts alle erforderlichen Daten vor. Wird klar kommuniziert, wie mit fehlenden Informationen umgegangen wird und wie diese im weiteren Ablauf ergänzt werden, erleichtert dies die Prüfung und Anwendung des Bodenschutzkonzepts. Ist z.B. noch nicht bekannt, ob eine Bodenkundliche Baubegleitung hinzugezogen wird, ist dies im Bodenschutzkonzept zu vermerken.

## **2.5 Fazit**

Ein gut strukturiertes und zielorientiertes, auf den Bauablauf abgestimmtes Bodenschutzkonzept, ist mit Mehraufwand verbunden. Dieser zahlt sich jedoch aus, weil Konflikte und kostenrelevante Nachbesserungen vermieden werden. Das Genehmigungsverfahren wird beschleunigt, die bodenschutzfachliche Grundlage für die Ausschreibung bereitgestellt und die Anwendung in der Bauausführung erleichtert. Zudem bietet ein gutes Bodenschutzkonzept eine solide Grundlage für die Bodenkundliche Baubegleitung und verkürzt Baustellentermine während des Baus.

## **3. Literatur**

BBodSchV: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, Ausfertigungsdatum 9.7.2021

DIN 19639: Bodenschutz bei Planung und Durchführung von Bauvorhaben, Sept. 2019

DIN 4220: Bodenkundliche Standortbeurteilung - Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen), Nov. 2020

Kartenviewer des LGRB: <https://maps.lgrb-bw.de>

LBodSchAG: Landes-Bodenschutz- und Altlastengesetz Baden-Württemberg, zuletzt geändert durch Gesetz von 17.12.2020



# Erste Komplettsanierung eines HCH-Produktionsstandorts im Dreiländereck Frankreich-Deutschland-Schweiz

Dipl. Ing. Hans-Ulrich Knehr<sup>1</sup>

## Index

1. Zusammenfassung.....	109
2. Projekthistorie .....	110
3. Schadstoffe.....	110
4. Stand bei Projektübernahme.....	111
5. Durchgeführte Verbesserungsmaßnahmen .....	112
6. Emissionsmaßnahmen, Grenzwerte und Kommunikation .....	114
7. Arbeitsschutz und Biomonitoring .....	115
8. Aushub und Entsorgung.....	115

## 1. Zusammenfassung

Europas größte Sanierung eines mit HCH (Hexachlorcylohexan) belasteten Produktionsstandortes in Hünningen, im Dreiländereck Frankreich-Schweiz-Deutschland, wurde abgeschlossen.

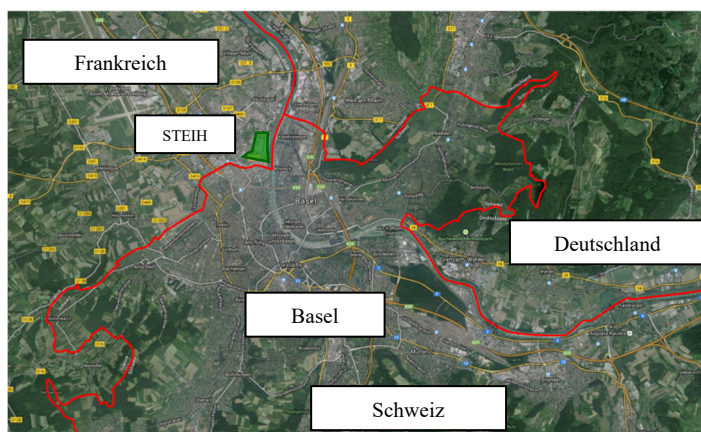


Abbildung 1: Lage Sanierung STEIH im Dreiländereck

Die erstmalige Komplettsanierung eines HCH-Standortes in dieser Größenordnung unter höchstem Emissions- und Arbeitsschutz stellten eine besondere Herausforderung dar, die für den Auftraggeber sogar einen Wechsel des Generalunternehmers zu Beginn der Sanierung erforderlich machte.

---

<sup>1</sup> Dipl. Ing. Hans-Ulrich Knehr, Züblin Umwelttechnik GmbH, Maulbronner Weg 32, Markgröningen

## 2. Projekthistorie

Im Jahr 1974 wurde die seit 1947 betriebene HCH – bzw. Lindanproduktion der Firma 'Produits Chimiques Ugine Kuhlman' auf dem 55.000 m<sup>2</sup> großen Gelände eingestellt. Sandoz erwarb 1973 das Gelände zur Errichtung einer Industriekläranlage für die umliegenden Chemiewerke und betreibt diese zusammen mit anderen Chemiefirmen als STEIH S.A.R.L bis 2012. Nach der Einstellung des Betriebs wird vom Eigentümer die freiwillige Sanierung des Geländes veranlasst.



Abbildung 2: ehemalige Lindanproduktion



Abbildung 3: Industriekläranlage

Die Sanierungsarbeiten starten im Jahr 2012. Bereits 2013 stoppt die STEIH S.A.R.L die Arbeiten, nachdem vom Sanierungsbetrieb Emissionen und Geruchsbelästigungen ausgehen.

Es wird ein Emissions-/Immissionsmaßnahmenplan incl. umfangreichem Messprogramm ausgearbeitet und technische Maßnahmen zur Ausführung und Emissionsminderung von Sanierungsfirmen abgefragt.

Die STEIH verwendet freiwillig die schärferen Schweizer Toleranzwerte, die auch Geruchsbelästigungen ausschließen sollen. Mit Spezialisten werden Probenahmemethoden modifiziert, um die Grenzwerte auch sicher rund um die Uhr überwachen zu können. Die Ausarbeitung des Maßnahmenplans in Abstimmung mit den Behörden resultiert u.a. in einem Immissions-Frühwarnsystem.

Im August 2014 wird der Auftrag für die weitere Sanierung an das Konsortium der Arge MZ-Hünigen bestehend aus den Firmen Marti und Züblin Umwelttechnik GmbH vergeben. Die vom Konsortium vorgeschlagenen Verbesserungsmaßnahmen werden umgesetzt. In der mehrmonatigen Testphase und im späteren laufenden Betrieb erfolgt ein laufender Informationsaustausch insbesondere mit den Behörden aus der Schweiz und Frankreich.

Im Juni 2015 wird der reguläre Sanierungsbetrieb wieder aufgenommen.

Bis zum Aushubende werden über 788.000 t Boden ausgehoben, teilweise gewaschen und wieder eingebaut oder in thermischen Anlagen in ganz Europa behandelt.

## 3. Schadstoffe

Als Hauptschadstoffe waren produktionsbedingt verschiedene Isomere von Hexachlorcyclohexan (HCH), Benzol und verschiedene Chlorbenzole im Untergrund des Standortes detektiert worden. Die Verteilung der HCH-Belastungen ist in Abbildung 4 dargestellt. Nach den Erkundungsergebnissen sollten die höher belasteten Bereiche vor allem in den ersten Tiefenmetern angetroffen werden.

Das ehemals produzierte Hauptprodukt Lindan und HCH-Isomere incl. Nebenstoffen lag teilweise in Reinform und als zementgebundener 'HCH-Beton' vor.



Abbildung 4: Verteilung der HCH Belastung im Untergrund

#### 4. Stand bei Projektübernahme

Zum Zeitpunkt des Wechsels des Generalunternehmers waren fast alle oberirdischen Bauwerke entfernt. Ein Teilbereich der Sanierungsfläche (s. Abbildung 5) war mit Hallen überbaut. Der Aushub in den Hallen und der Abtransport fand schon über mehrere Monate statt, jedoch waren die Hallen noch vielfach mit belasteten Haufwerken belegt.

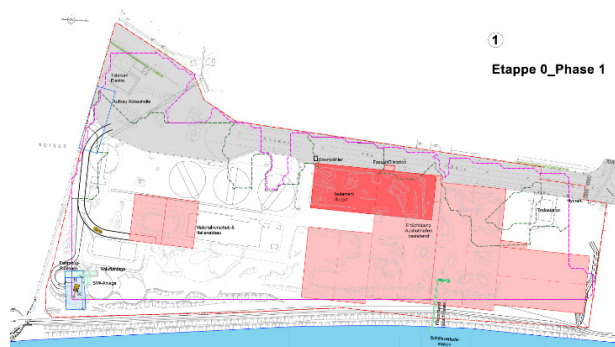
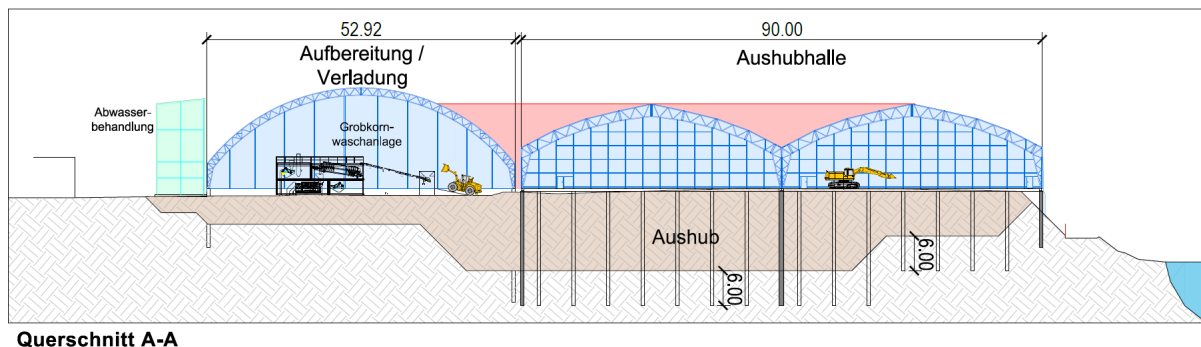


Abbildung 5: Überdachung vor Verbesserungsmaßnahmen

Die Aushubtiefe sollte bis zu 12 m betragen. Die Gesamtkonstruktion aus Halle plus Unterbau musste einen Höhenunterschied des Geländes von ca. 6-7 m ebenfalls mit abdecken. Die Unterkonstruktion der alten und der neuen Hallen bestand aus Stahlträgern, die in Verlängerung auch gleichzeitig als Gründung dienten. Der Bereich der freiliegenden Stahlträger war ebenfalls luftdicht einzuhausen und an die Hallen selbst anzubinden (vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. unten 'Schnitt neue Hallen und verschiebbare Aushubhalle').



Querschnitt A-A

Abbildung 6: Schnitt neue Hallen und verschiebbare Aushubhalle

## 5. Durchgeführte Verbesserungsmaßnahmen

Die hauptsächlichen Emissionspfade betrafen die Dichtigkeit der einzelnen Systeme. Die Dichtigkeit der bestehenden Hallen war unzureichend, so dass ein permanenter ausreichender Unterdruck innerhalb der Einhausungen nicht erreicht werden konnte. Die Emissionsmaßnahmen bei der Schiffsverladung waren nicht ausreichend. Die Abluftreinigung war unterdimensioniert.

Folgende hauptsächlichen Verbesserungsmaßnahmen wurden deshalb umgesetzt:

- Ertüchtigung der bestehenden Hallen durch Installation einer zweiten Dachhaut über die bestehenden Hallen mit Abdichtung zum Untergrund



Abbildung 7: Abdichtung bestehende Halle

- Zusätzliche Überdachung des Aushubbereichs, s. Abb. 8.  
Zur Emissionsminderung wurden weitere Geländeteile mit Hallen überbaut und an das Unterdrucksystem angeschlossen. Ein Teilbereich wurde durch eine verschiebbare 'Aushubhalle, erst während des Sanierungsbetriebs durch einen zweimaligen Vershub überdacht. Der jeweilige Vershub von der in Abb. 8 und 9 dargestellten Ausgangsetappe 1 zu den Etappen 2 und 3 erfolgte nach dem kompletten Rückbau der belasteten Böden in diesem Bereich. Für den Vershub wurde die Halle aus dem Unterdrucksystem ausgekoppelt und nach der Anbindung wieder angekoppelt.

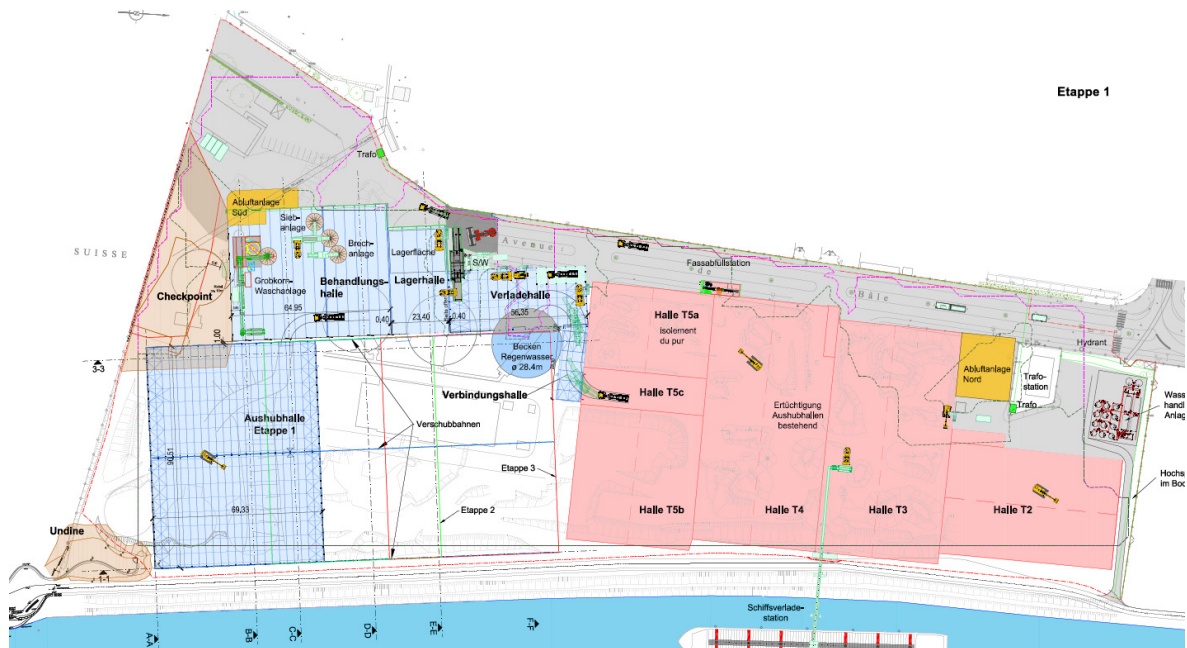


Abbildung 8: Überdachung nach Verbesserungsmaßnahmen



Abbildung 9: Luftbild Überdachung

- Installation von 2 Abluftreinigungsanlagen mit einem Durchsatz von zusammen 175.000 m<sup>3</sup>/h
- Einrichtung einer Containerschleuse mit Wascheinrichtungen
- Erstellung von Dockingstationen für Baugeräte – kein Ausschleusen der Geräte für Personaleinsatz mehr erforderlich
- Entwicklung und Neubau einer gekapselten Schiffsverladung mit einem unterdrucksicheren Anschluss des Verladerüssels an das Schiff. Planung und Bau einer abdichtenden Schiffsabdeckung mit Andockeinrichtung für den Verladerüssel. Installation einer Unterdruckhaltung auf dem Schiff mit Abluftreinigung.



Abbildung 10: gekapselte Schiffsverladung

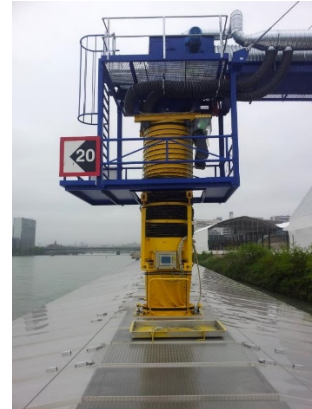


Abbildung 11: Anschluss Schiff

- Installation einer Bodenwäsche innerhalb der Hallen
- Errichtung einer zentralen Wasserreinigungsanlage (350 m<sup>3</sup>/h) für das gesamte anfallende Abwasser aus Abstromsicherung (Grundwasser), Waschwasser Bodenwäsche, Schleusenwasser und Regenwasser aus den Dach- und befestigten Flächen.

## 6. Emissionsmaßnahmen, Grenzwerte und Kommunikation

Die permanente Unterdruckhaltung im Hallensystem, während der Schleusungsvorgänge und bei der Schiffsverladung waren Garant für die Einhaltung der scharfen Immissionswerte von bis zu 30 Nanogramm/m<sup>3</sup> (beta-HCH) während der ganzen Bauzeit. Der Unterdruck in den Hallen wurde an 16 Messstellen online überwacht und aufgezeichnet.

Die permanente Abluftüberwachung der Abluftreinigungsanlagen mittels Gaschromatograph informierte über die Entwicklungen in der Rohluft, zwischen den einzelnen Filterstufen und kontrollierte die zulässigen Emissionswerte der Abluftreinigung.

Eine zweistufige Immissionsüberwachung sollte die Mitarbeiter und die Bevölkerung über unzulässige Immissionen absichern. Stufe 1: Messpunkte auf dem Sanierungsgelände. Stufe 2 Messpunkte im weiteren Außenbereich des Sanierungsgeländes vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und 13 unten.

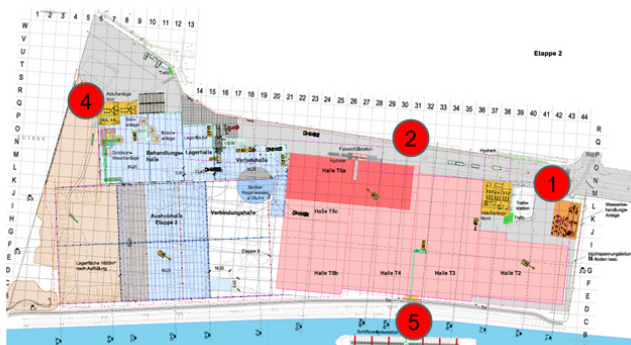


Abbildung 12: Monitoring Immission direktes Umfeld

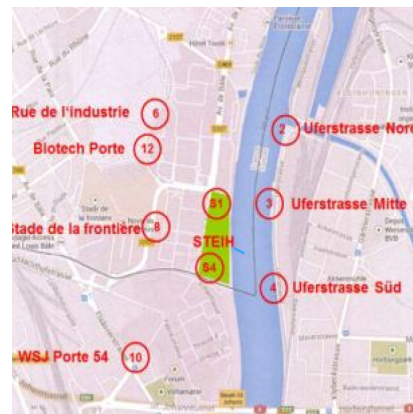


Abbildung 13: Monitoring Immission im Umfeld



Das Sanierungsgelände liegt ausschließlich in französischem Hoheitsgebiet. Durch die unmittelbare Grenznahe und die möglichen Auswirkungen auf die Baseler Bevölkerung waren die Baseler Umweltbehörden aber von Anfang an involviert und ermittelten zusammen mit dem Projektteam Toleranzgrenzwerte für die Baseler Bevölkerung.

Es mussten deshalb für die Schweiz und Frankreich unterschiedliche Grenzwerte berücksichtigt werden. Deutschland war kein direkter Anreiner, aber von Beginn der Maßnahme an ebenso involviert.

Das Umweltamt Basel veranlasste auch eigene Messungen und unangemeldete Geruchsbegehungen. Die sehr niedrige Geruchsschwelle von vorkommenden HCH- Isomeren, die weit unter den Grenzwerten liegt, konnte als eine Art Tracer für mögliche Undichtigkeiten bei den verschiedenen Systemen (Hallen, Schleusen, Schiffsverladung etc.) genutzt werden.

Ein 3-stufiges Frühwarnsystem (grün,gelb,rot) sollte rechtzeitig über sich anbahnende Grenzwertüberschreitungen informieren und erforderliche Maßnahmen einleiten bzw. die Einstellung des Sanierungsbetriebs anzeigen.

Komplettiert wurde die Immissionsüberwachung durch regelmäßige Geruchsbegehungen des gesamten Geländes durch das Konsortium und den Bauherrn. Die Einrichtung eines Meldetelefon bei Geruchsauffälligkeiten ermöglichte es auch für die Bevölkerung auf geruchliche Auffälligkeiten hinzuweisen.

Die Kontrollen der französischen Umweltbehörde erfolgten nach den vorgegebenen gesetzlichen Auflagen. Bis auf eine kurze gelb-Phase (Korrekturmaßnahmen) während der Testphase waren die Immissionswerte wortwörtlich immer im grünen Bereich.

Die französischen und Schweizer Umweltbehörden wurden laufend über die ermittelten Messwerte oder besondere Maßnahmen z.B. Hallenverschub informiert.

## **7. Arbeitsschutz und Biomonitoring**

Bei Arbeiten mit Personeneinsatz in den Hallen wurden Schutzanzug und Pressluftatmer eingesetzt. Die eingesetzten Baumaschinen waren alle mit Atemdruckluftversorgung und gekapselten Kabinen ausgestattet. Das Personal nahm während der gesamten Sanierung an einem Biomonitoring teil.

## **8. Aushub und Entsorgung**

788.000 t Boden wurden ausgehoben, zum Teil gewaschen und wieder eingebaut und 620.000 t in thermischen Anlagen in ganz Europa behandelt. Der Transport erfolgte je nach HCH-Konzentration per Schiff, mit dichten Containern oder, wenn HCH nahezu in Reinform auftrat, in Fässern.

Während des gesamten Aushubbetriebes waren Siebanlagen und Brecher in den Hallen im Einsatz, um die Annahmearbeiten der Entsorger betreffend Korngröße einzuhalten und waschbares Material zu generieren.

Die Entsorgungskapazitäten der über 10 Entsorgungsanlagen in ganz Europa waren je nach Schadstoffpotential sehr unterschiedlich. Hexachlorcylohexan, sowie die vorhandenen unterschiedlichen Chlorbenzole, beinhalten unterschiedliche Chloranteile und erzeugen so unterschiedliche Chlorfrachten im zu behandelnden Boden. Dies beeinflusste im Wesentlichen die Annahmekapazitäten der Entsorgungsanlagen. Je nach Chlorfracht war eine Andienung von teilweise nur wenigen Tonnen pro Woche möglich.

Neben den baulichen Randbedingungen orientierte sich die Aushublogistik daher vor allem an der optimalen Ausnutzung der einzelnen Entsorgungswege. Der Aushub, die Vorbehandlung, die Analytik, die ausreichende Zwischenlagerung im Hallenbereich und die Transportlogistik waren laufend aufeinander abzustimmen.



Abbildung 14: Ansicht Gesamtprojekt mit erster sanierter Fläche und Schiffsverladung

Mit ca. 550.000 t stellte der Schiffstransport, mit dem die geringer belasteten Böden abtransportiert wurden, den größten Teil. Bei einem Ausfall des Schiffstransportes fallen hier schnell erhebliche Lagermengen mit Platzbedarf an und beeinflussen den Aushubfortschritt. Im Laufe der Sanierung kam es durch die wochenlange Trockenheit und den daraus resultierenden niedrigen Rheinständen zu teilweise monatelangem Ausfall des Schiffstransportes. Mit Umstrukturierungen des Aushubgeschehens, des zweifachen Hallenverschub, den Hallenumbauten und mehrfacher Lagerhaltung bis zu 50.000 t Boden in den Hallen konnte dies weitestgehend kompensiert werden.

Die ca. 70.000 t Boden mit mittlerer Chorfracht wurden mit Containern per Bahn zu den Entsorgungsanlagen transportiert. Das ausgehobene Reinmaterial, ca. 3.300 t, gelangte über eine Fassabfüllstation in dichte Transportfässer und konnte per LKW-Transport einer Wiederverwertung zugeführt werden.

Die Wiederverfüllung der Aushubbereiche erfolgte vorwiegend nach dem Freimessen der Aushubsohlen und Böschungen und dem Abkoppeln der Hallen aus dem Unterdrucksystem bzw. nach dem Rückbau der Aushubhallen. Für das Verfüllmaterial waren nicht die französischen Grenzwerte für Boden sondern die schärferen Schweizer Grenzwerte mit zusätzlichen, vom Bauherrn ausgewiesenen Werten für spezielle Einzelstoffe einzuhalten. Im grenznahen Bereich gab es auf französischer Seite kaum Bautätigkeiten, so daß auch kaum Verfüllmaterial generiert werden konnte. Auf deutscher Seite liegen im Dreiländereck u.a. geogen bedingte Schwermetallbelastungen vor, die eine Annahme von Verfüllmaterial nach den vorgeschriebenen Grenzwerten nicht erlaubte. So wurde fast ausschließlich geeignetes Material aus Bauvorhaben und Bodenlagern aus der Schweiz importiert.

Trotz schwieriger Anfangsbedingungen durch die Übernahme eines bereits begonnenen Sanierungsprojekt konnte durch die Neukonzeption der kritischen Bereiche das Vertrauen der Behörden erreicht werden und das Projekt zur Zufriedenheit aller zum Abschluss gebracht werden.



*Abbildung 15: Ansicht Gesamtfläche nach erfolgreicher Sanierung*



# Nachweis, Verbleib und Wirkung von Mikro- und Nanoplastik im Boden

Martin Hoppe<sup>1</sup>, Karsten Schlich<sup>2</sup>, Axel Lamparter<sup>1</sup>,  
Georg Scheeder<sup>1</sup>, Kristof Dorau<sup>1</sup>, Jan Köser<sup>1</sup>

## Inhalt

Zusammenfassung.....	119
1. Einleitung.....	120
2. Material und Methoden.....	121
3. Ergebnisse und Diskussion.....	122
4. Schlussfolgerungen.....	125
5. Literatur.....	126

## Zusammenfassung

Es bestehen große Wissenslücken hinsichtlich der Wirkung und des Verbleibs von Mikroplastik (MPs, 1 - 5.000 µm) und Nanoplastik (NPs, < 1 µm) im Boden. Je kleiner die Partikel werden, so schwieriger wird ihr Nachweis in Umweltmedien. Dementsprechend ist der Einsatz von Modellpartikeln notwendig, um Wirkung und Mobilität von NPs in Böden abschätzen zu können. Undotierte und Palladium (Pd)-dotierte Polystyrol-Partikel (PS-P (343 nm), PS-Pd-PS-P (442 nm)) wurden synthetisiert, charakterisiert und auf zwei Ackerböden (Cambisol, Podzol) appliziert. Hierbei lagen die Zielkonzentrationen im Boden bei 25 mg kg<sup>-1</sup>, 75 mg kg<sup>-1</sup> und 225 mg kg<sup>-1</sup> für die avisierten Laborversuche (DIN EN ISO 22030, 2011) mit Hafer (*Avena sativa*).

Die Partikel wurden in Pflanzen und Böden mit verschiedenen Techniken untersucht. Zu den Analysemethoden zählen Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM-EDX), Pyrolyse-Gas-Chromatographie-Massenspektrometrie (Pyr-GC-MS) nach Lösemittel-Extraktion und induktiv gekoppeltes Plasma mit Massenspektrometrie (ICP-MS) nach Königswasser-Aufschluss.

Die applizierten Partikel wurden sowohl mittels ICP-MS (Pd, 89 - 99%) als auch mittels Pyr-GC-MS (73 - 120%) anhand hoher Wiederfindungsraten nachgewiesen. Außerdem zeigen die REM-Aufnahmen, dass die Partikel unaggregiert in den Böden und auf den Pflanzenwurzeln vorlagen. Durch die Bestimmung der Pd-Gehalte in Böden und Wurzeln konnte eine Partikelanreicherung auf der Wurzeloberfläche

---

<sup>1</sup> Dr. Martin Hoppe, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, 30655 Hannover, 0511 6433098, martin.hoppe@bgr.de;

Dr. Axel Lamparter, BGR, Stilleweg 2, 30655 Hannover, 0511 6432355, axel.lamparter@bgr.de;

Georg Scheeder, BGR, Stilleweg 2, 30655 Hannover, 0511 6432822, georg.scheeder@bgr.de;

Dr. Kristof Dorau, BGR, Stilleweg 2, 30655 Hannover, 0511 6433287, kristof.dorau@bgr.de;

Dr. Jan Köser, BGR, Stilleweg 2, 30655 Hannover, 0511 6433839, jan.koeser@bgr.de

<sup>2</sup> Dr. Karsten Schlich, Fraunhofer IME, Auf dem Aberg 1, 57392 Schmallenberg, 02972 302495, karsten.schlich@ime.fraunhofer.de

nachgewiesen werden. Wahrscheinlich werden die Partikel aus dem Boden mit dem Transpirationsstrom hin zur Wurzel verlagert. Trotz der Anreicherung der Partikel auf der Wurzel konnten keine negativen Auswirkungen auf das Wachstum von Hafer festgestellt werden ( $\leq 225 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Die getesteten Bodenmikroorganismen (Tests nur mit Podzol) und die Benetzbarkeit der Böden (Cambisol, Podzol) zeigten keine klaren Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die getesteten Partikel, weshalb weiterführende Versuche mit einer größeren Anzahl von Böden notwendig sind. Grundsätzlich sind insbesondere dotierte Modellpartikel hilfreich für die Methodenentwicklung und die Methodvalidierung in der Forschung zu NPs in Umweltmedien.

## 1. Einleitung

Mikroplastik wurden in den letzten Jahren zu einem Brennpunkt der Umweltforschung (Dorau et al., 2023; Huang et al., 2022). Insbesondere Böden sind durch Einträge von Plastik stark bedroht (Pérez-Reverón et al., 2023). Hierbei sind Bewässerung mit Abwasser, der Einsatz von Klärschlamm und Kompost sowie die Nutzung von Mulchfolien bedeutende Eintragspfade für MPs in Böden (Bläsing & Amelung, 2018). In den letzten Jahren nehmen die verfügbaren Forschungsergebnisse über den Verbleib und die Wirkung von MPs in der Umwelt zu, wohingegen die Forschung zu NPs weiterhin limitiert ist (Wang et al., 2021). Die bestehenden Wissenslücken zu NPs lassen sich grundsätzlich mit fehlenden analytischen Nachweismethoden begründen, die besonders bei hohen Konzentrationen von natürlicher organischer Substanz zum Tragen kommen (Hurley & Nizzetto, 2018). Methoden wie Pyr-GC-MS zeigen einerseits vielversprechende Ergebnisse für den Nachweis von NPs in Böden (Pérez-Reverón et al., 2023), andererseits stellt beispielsweise der Nachweis von PS in Pflanzenwurzeln aufgrund von natürlichen Styrol-Monomeren eine Herausforderung dar (Taylor et al., 2020). Dementsprechend ist der Einsatz von dotierten Modellpartikeln eine gute Alternative, um die Mobilität von NPs in verschiedenen Umweltmedien zu untersuchen (Mitrano et al., 2019). Insbesondere hydroponische Versuche zeigen eine Aufnahme von nanoskaligen Partikeln ( $< 500 \text{ nm}$ ) über die Wurzel in oberirdische Pflanzenteile (Li et al., 2020; Real et al., 2022). Im Gegensatz dazu zeigen andere Studien eine Anreicherung von NPs in den Wurzeln aber keine Translokation in oberirdische Pflanzenteile (Luo et al., 2022; Taylor et al., 2020). Wahrscheinlich bestimmt auch die Art der Exposition (hydroponisch vs. terrestrisch), ob die getesteten Partikel in oberirdische Pflanzenteile verlagert werden.

Die Forschung zur Pflanzentoxizität von MPs und NPs zeigt bisher keine einheitlichen Ergebnisse (Zhang et al., 2022). Effekte auf Pflanzen werden u. a. von Partikelgröße, Partikelladung und Polymertyp bestimmt (Hartmann et al., 2022). Wang et al. (2022a) schlussfolgern aus der Mehrheit der vorliegenden Literatur, dass MPs und NPs direkte Wirkungen auf Pflanzen haben, sich in den Pflanzen anreichern und dadurch möglicherweise die Ernährungssicherheit bedrohen können.

Die Effekte von MPs and NPs auf Bodenmikroorganismen sind momentan nicht vollständig geklärt, u. a. wurden positive und negative Effekte auf Bodenmikroorganismen (Bodenatmung) festgestellt (Wang et al., 2022b). Dementsprechend sind weiterführende Studien nötig, um herauszufinden, ab welchen Konzentrationsniveaus bestimmte Polymere zu negativen Effekten auf Bodenmikroorganismen führen können.

Der Eintrag von Mikroplastik in Böden kann die Bodeneigenschaften verändern (Wang et al., 2022b). Der Eintrag von hydrophoben MPs und NPs, hat das Potenzial die Benetzungshemmung von Böden zu erhöhen. Dies kann zu einer verringerten Infiltrationskapazität von Wasser führen (Bughici & Wallach, 2016).

In der vorliegenden Studie wurden undotierte und mit Pd dotierte PS-P ohne zusätzliche Additive und Benetzungsmittel hergestellt, dialysiert und charakterisiert. Anschließend erfolgte die Applikation der Partikel auf zwei Ackerböden (Cambisol, Podzol). Diese Böden wurden für einen chronischen Pflanzentest (*DIN EN ISO 22030, 2011*) mit Hafer verwendet. Zusätzlich wurde der Einfluss der Partikel auf Bodenorganismen und die Benetzungshemmung der Böden untersucht.

## 2. Material und Methoden

Für Details zu den folgenden Unterkapiteln sowie zu den statistischen Methoden siehe Hoppe et al. (2023).

### 2.1 Synthese von Polystyrol-Partikeln mit und ohne Dotierung

Die Synthese der Partikel (PS-P, PS-Pd-PS-P) erfolgte ohne Zugabe von Benetzungsmitteln und Additiven in drei Schritten. (I) Emulsionspolymerisation nach Nichols (1987) wurde unter Verwendung von Styrol ( $C_8H_8$ , ReagentPlus,  $\geq 99\%$ , Merck, Darmstadt, Deutschland) und Kaliumperoxidisulfat ( $K_2S_2O_8$ , puriss. p.a.,  $\geq 99.0\%$ , Merck, Darmstadt, Deutschland, Reaktionsstarter) durchgeführt. Die synthetisierten PS-P wurden für den zweiten Syntheseschritt und als Referenz in den Bodenversuchen genutzt. (II) Nach der Prozedur von Xu et al. (2008) erhielten die PS-P eine Dotierung mit Pd-Nanopartikeln (30-50 nm), welche aus Palladiumnitrat ( $Pd(NO_3)_2$ , Strem Chemicals, Kehl, Deutschland) auf die Oberfläche der PS-P synthetisiert wurden (PS-Pd-P). (III) Unter Verwendung von Styrol, Divinylbenzol (DVB, 60 - 65%, Merck, Darmstadt, Deutschland) und  $K_2S_2O_8$  erfolgte eine Beschichtung der PS-Pd-P aus dem zweiten Syntheseschritt, analog zu den Vorgehensweisen von Huang et al. (2012) und Braconnot et al. (2013). Durch die Beschichtung wird verhindert, dass sich die Pd-Nanopartikel auf der Oberfläche der Partikel befinden, was möglicherweise deren Mobilität und Wirkung in Umweltmedien verändern könnte. Nach der Synthese wurden die Partikel dreifach gegen destilliertes Wasser dialysiert (1:100 v/v, 12 - 14 kDa, Spectrumlabs, Dallas, USA), um verbliebene Styrol-Monomere, DVB,  $K_2S_2O_8$  und Ethanol (p.a.,  $\geq 99.5\%$ , Merck, Darmstadt, Deutschland) zu entfernen. Die Partikeldispersionen wurden anschließend auf eine Elektrolytkonzentration von  $4 \text{ mmol L}^{-1}$  Natriumdihydrogenphosphat ( $NaH_2PO_4$ , Merck, Darmstadt, Deutschland) eingestellt.

### 2.2 Experimenteller Aufbau

Für die weiterführenden Versuche wurden zwei Referenzböden ([RefeSol 01A](#), [RefeSol 04A](#)) verwendet, die als Braunerde ([World Reference Base](#) (WRB): Cambisol)) und Podsol (WRB: Podzol) klassifiziert wurden (Ad-hoc-AG Boden, 2006). Die Applikation der PS-P und PS-Pd-PS-P zu den Böden erfolgte als Dispersion mit einer Hintergrundkonzentration von  $4 \text{ mmol L}^{-1} NaH_2PO_4$ . Die avisierten PS-Zielkonzentrationen liegen bei  $25 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $75 \text{ mg kg}^{-1}$  und  $225 \text{ mg kg}^{-1}$ . Hierfür wurden 400 mL der Dispersionen in drei Verdünnungsstufen zu jeweils 2500 g Boden gegeben, anschließend erfolgte eine manuelle Durchmischung der Böden für 15 min, die Wasserhaltekapazität (WHK) wurde auf 60% der maximalen WHK mit destilliertem Wasser eingestellt. Um die chronischen Pflanzenversuche mit Hafer nach DIN EN ISO 22030 (2011) durchzuführen, erfolgte die Einwaage der Böden in 56 Pflanztöpfe (2 (Böden) \* 2 (Partikeltypen) \* 3 (Konzentration) \* 4 (Wiederholungen) + 2 (Bodenkontrollen) \* 4 (Wiederholungen) = 56 (Einzeltöpfe)). Nach der Applikation der Hafersamen wurden die Töpfe unter konstanten Bedingungen in einer Klimakammer für sieben Wochen inkubiert. Anschließend erfolgte die Begutachtung des Pflanzenwachstums, des Weiteren wurden Pflanzensprosse, Wurzeln und Böden für die chemische Analytik und die Messung der Benetzungshemmung (Boden) entnommen.

## 2.3 Analytik

Vor der Applikation zu den Böden wurden die Partikel grundlegend charakterisiert, wobei die Messung von Partikelgröße und Zetapotential mittels dynamischer und elektrophoretischer Lichtstreuung (Zetasizer Nano ZS, Malvern Panalytical, Malvern, Großbritannien) in den applizierten Dispersionen erfolgte. Die Messungen der PS-Gehalte in den Applikationsdispersionen, Böden und Pflanzen wurde nach Extraktion mit Dichlormethan (DCM,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , 99.8%, Carl Roth GmbH, Karlsruhe, Deutschland) mit Pyr-GC-MS (Agilent 5975 C, Santa Clara, USA) vorgenommen. Darüber hinaus kamen bildgebende Verfahren, wie REM (Sigma 300VP FEG, Zeiss, Oberkochen, Germany) zum Einsatz. Die Bestimmung der Pd-Gehalte in Dispersionen, Böden und Pflanzen erfolgte mit ICP-MS (Agilent ICP-MS 7500ce und 7900, Agilent Technologies, Santa Clara, USA) nach Königswasseraufschluss (*DIN EN 16174, 2012*).

Zur Bestimmung der Aktivität von Bodenmikroorganismen wurde der Podzol nach der Applikation der Partikel für sechs Monate unter konstanten Bedingungen inkubiert (*DIN ISO 15685, 2012*). Die Messungen der potentiellen Nitrifikation (Ammonium oxidierende Bakterien (AOB)), der Hemmung der Nitrifikation (Basalatmung) und die substratinduzierte Respiration (SIR) erfolgten nach einem und nach sechs Monaten.

Die Benetzungshemmung der Böden wurde über die Kontaktwinkel (contact angle (CA)) nach Bachmann et al. (2000) bestimmt, wobei die CA an gesiebten ( $< 2$  mm) und luftgetrockneten Bodenproben mit einem Tropfenform Analysator (DSA 30, Krüss, Hamburg, Germany) bestimmt wurden. Auf jeder Probe wurden zehn Tropfen abgesetzt, die CA wurden unmittelbar nach dem Aufsetzen der Tropfen bestimmt.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

Weitere Details zu den im Folgendem dargestellten Ergebnissen finden sich bei Hoppe et al. (2023).

### 3.1 Charakterisierung von Böden und Polystyrol-Partikeln

Der [RefeSol 01A](#) ( $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 5.61$ ,  $C_{\text{org}} = 9.3 \text{ g kg}^{-1}$ , Tongehalt =  $61 \text{ g kg}^{-1}$ ) wurde nach bodenkundlicher Kartieranleitung als Braunerde klassifiziert, was nach WRB einem Cambisol entspricht (Ad-hoc-AG Boden, 2006). Der [RefeSol 04A](#) ( $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 5.11$ ,  $C_{\text{org}} = 30 \text{ g kg}^{-1}$ , Tongehalt =  $54 \text{ g kg}^{-1}$ ) wird als Podsol (WRB: Podzol) angesprochen (ebd.).

Die verschiedenen Verdünnungsstufen der Dispersionen waren bei der Applikation zu den Böden kolloidal stabil, wobei der Phosphat-Puffer die elektrische Leitfähigkeit und den pH-Wert in den Dispersionen konstant hielt. Die mittlere Partikelgröße lag bei 343 nm für die PS-P und bei 442 nm für die PS-Pd-PS-P. Das negative Zetapotential von unter -53 mV, deutet auf eine hohe kolloidale Stabilität und Mobilität der Partikel im Boden hin.

### 3.2 Nachweis von Polystyrol-Partikeln in Böden und Pflanzen

Ein zentraler Punkt der vorliegenden Arbeit war die Nachweisbarkeit der Partikel in Umweltmedien mit verschiedenen Methoden sicherzustellen. Abbildung 1.2 zeigt schematisch, dass dies für Böden und Pflanzenwurzeln mit Pyr-GC-MS, ICP-MS quantifiziert werden konnten, hierbei lagen die Wiederfindungsraten für beide Methoden im Boden auf einem hohen Niveau (73 - 120%). Wie schon bei Taylor et al. (2020) gezeigt, ist der Nachweis von PS in Pflanzenwurzeln aufgrund von natürlichen Styrol-Monomeren schwierig, was sich in hohen Nachweisgrenzen widerspiegelt ( $65 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Dementsprechend ist die Pd-Dotierung unerlässlich, um die Nachweisbarkeit der Partikel in der Pflanze vornehmen zu können, insbesondere für die niedrigen Zielkonzentrationen im Boden ( $\leq 75 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Da im höchsten



Ansatz ( $225 \text{ mg kg}^{-1}$ ) kein Pd in den oberirdischen Pflanzenteilen nachgewiesen werden konnte, ist davon auszugehen, dass die Partikel eher auf als in der Wurzel akkumuliert wurden. REM-Aufnahmen zeigen die Partikel auf der Wurzeloberfläche, was jedoch eine Aufnahme in die Wurzel nicht vollständig ausschließen kann. Die Ergebnisse bestätigen den Stand der Forschung für terrestrische Pflanzenversuche mit NPs, die eine Anreicherung von NPs in bzw. auf den Wurzeln, aber keine Translokation in oberirdische Pflanzenteile nachweisen konnten (Luo et al., 2022; Taylor et al., 2020). Im Gegensatz dazu zeigen hydroponische Versuche eine Aufnahme von nanoskaligen Partikeln ( $< 500 \text{ nm}$ ) über die Wurzel in oberirdische Pflanzenteile (Li et al., 2020; Real et al., 2022).

## Palladium doped polystyrene particles for environmental testing

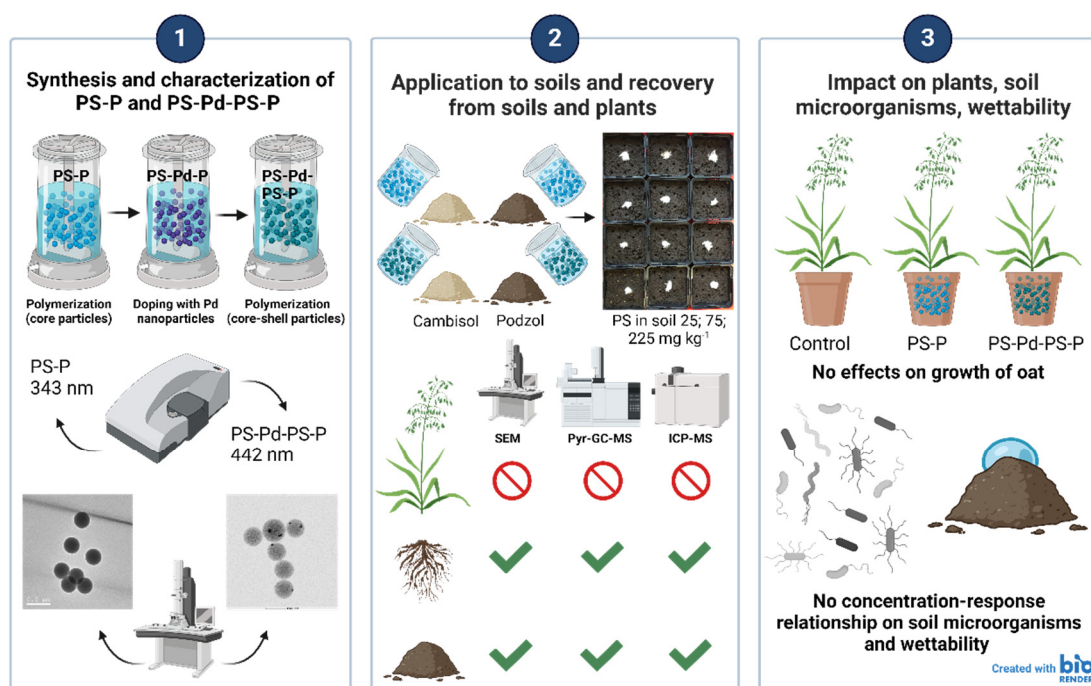


Abbildung 1: Untersuchungen zu Wirkung und Verbleib von Nanoplastik-Partikeln in Böden in drei Schritten: (I) Herstellung und Charakterisierung von Nanoplastik-Partikeln mit und ohne Palladium-Dotierung. (II) Applikation der Nanoplastik-Partikel zu verschiedenen Böden und deren Nachweis in Böden und Pflanzen. (III) Wirkung der Nanoplastik-Partikel auf Pflanzenwachstum, Mikroorganismen und Benetzbarkeit von Böden. Geändert nach Hoppe et al. (2023).

Insbesondere die Art der Exposition (hydroponisch vs. terrestrisch), scheint demnach neben Faktoren wie Partikelgröße, Partikelladung und Polymertyp zu bestimmen, ob die Partikel in oberirdische Pflanzenteile aufgenommen werden. Grundsätzlich zeigen sowohl hydroponische als auch terrestrische Ansätze eine Anreicherung von NPs in der Rhizosphäre. Wahrscheinlich werden die Partikel mit dem Transpirationsstrom zur Wurzeloberfläche transportiert (Li et al., 2020), was ihre Mobilität in Umweltmedien unterstreicht, die wahrscheinlich durch das niedrige Zetapotential ( $\leq -53 \text{ mV}$ ) induziert wird. Dies ist wichtig für Toxizitätstests, da eine Zunahme der Partikelgröße durch Aggregation falsche Einschätzungen zur Wirkung der Partikel in der Umwelt induzieren könnten. Die vorliegenden REM-Aufnahmen zeigen keine aggregierten Partikelcluster in den Böden nach der Partikelzugabe. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass mit dem gewählten Testdesign, die Wirkung und der Verbleib von negativ geladenen und additivfreien PS-P getestet wurde. Aufgrund der besonderen Bedeutung der Oberflächenladung (Zetapotential) für Mobilität und Toxizität der Partikel, wird für nachfolgende Studien zusätzlich auch die Untersuchung von ungeladenen und positiv geladenen PS-P empfohlen.

### 3.3 Einfluss der Polystyrol-Partikel auf das Wachstum von Hafer

In Abbildung 2 sind wesentliche Wuchsparameter für die variierenden Konzentrationen an PS-P und PS-Pd-PS-P für beide Böden aufgeführt. In 32 der 36 Fälle sind keine signifikanten Auswirkungen auf das Haferwachstum zu sehen. Wenn leichte Effekte auf das Wachstum vorliegen, so zeigen diese keine klassischen Dosis-Wirkungs-Beziehungen.

Created with 

Particle concentration in soil	Plants						Bacteria						SWR	
	Fertile pods		Shoot length		Fresh wt. shoots		AOB		Basal respiration		SIR		Contact angle	
	After 2 months		After 2 months		After 2 months		1 months 6 months		1 months 6 months		1 months 6 months		After application	
														
PS-P 215 mg kg <sup>-1</sup>	–	0	0	0	0	0	0	–	–	0	0	0	+	0
PS-Pd-PS-P 197 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	–	0	0	0	0	0	–	0	0	0	0	0
PS-P 73 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	–	0	–	–	0	0	0	0	0
PS-Pd-PS-P 61 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0	0	–	–	0	0	0	0	–
PS-P 26 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	–	0	0	0	0	0
PS-Pd-PS-P 22 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	–	0	–	0	0	0	0	0	–

 Cambisol   
  Podzol   
  Significant increase compared to the control, p<0.05   
  Significant decrease compared to the control, p<0.05   
 0 No effect

Abbildung 2: Effekte von undotierten und mit Palladium dotierten Nanoplastik-Partikeln auf das Wachstum von Hafer, Bodenmikroorganismen und die Benetzbarkeit von Böden. Geändert nach Hoppe et al. (2023).

Trotz der nachgewiesenen Anreicherung der Partikel auf der Wurzeloberfläche, können grundsätzlich keine negativen Auswirkungen der PS-P und PS-Pd-PS-P auf das Wachstum der Haferpflanzen festgestellt werden. Forschungen zur Pflanzentoxizität von MPs und NPs zeigt bisher keine einheitlichen Ergebnisse (Zhang et al., 2022). Andererseits schließen Wang et al. (2022a) aus der Mehrheit der vorliegenden Literatur, dass MPs and NPs direkte Wirkungen auf Pflanzen haben, was mit der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden konnte. Die widersprüchlichen Ergebnisse begründen sich möglicherweise durch die Vielzahl an Partikeleigenschaften, die mögliche Effekte auf Pflanzen steuern können. Die Pflanzentoxizität von NPs wird maßgeblich durch Partikelgröße, Partikelladung und Polymertyp bestimmt (Hartmann et al., 2022). Hinsichtlich der Pflanzentoxizität sind deshalb weiterführende Versuche mit ungeladenen und positiv geladenen PS-P nötig, um Widersprüche der aktuellen Forschungsergebnisse aufzuklären.

### 3.4 Einfluss der Polystyrol-Partikel auf Mikroorganismen im Boden

Es sei hier darauf verwiesen, dass die Versuche ausschließlich mit dem Podzol durchgeführt wurden. Ein deutlich größeres Probenkollektiv wäre nötig gewesen, um grundsätzliche Aussagen über die Wirkung der verwendeten Partikel auf Bodenmikroorganismen treffen zu können. Die in Abbildung 2 zusammengefassten Ergebnisse bestätigen die unklaren Forschungsergebnisse zur Wirkung von MPs und NPs auf Bodenmikroorganismen, u. a. wurden in der Literatur positive und negative Effekte auf Bodenmikroorganismen (Bodenatmung) festgestellt (Wang et al., 2022b). Gegenüber den Kontrollen konnten weder nach einem noch nach sechs Monaten Effekte auf die SIR nachgewiesen werden. Auch die Aktivität der AOB zeigte nach einem Monat keine Veränderung gegenüber den Kontrollen, jedoch wurde nach sechs Monaten eine Abnahme der AOB-Aktivität verzeichnet. Bei der Basalatmung verhielt es sich

umgekehrt, hier traten negative Effekte der PS-P und PS-Pd-PS-P nur nach einer Inkubation von einem Monat auf. Wenn negative Effekte gemessen wurden, lagen keine Dosis-Wirkungs-Beziehungen vor. Dementsprechend sind weiterführende Studien nötig, um herauszufinden, ab welchen Konzentrationsniveaus bestimmte Polymere zu negativen Effekten auf Bodenmikroorganismen führen können.

### 3.5 Einfluss der Polystyrol-Partikel auf die Benetzungshemmung der Böden

Abbildung 2 zeigt, dass sich der CA in der Mehrzahl der Versuchsansätze nicht signifikant verändert hat. Die Ergebnisse für den Podzol, dessen CA (124°) auf eine hohe Benetzungshemmung impliziert, lässt keine eindeutigen Schlüsse hinsichtlich einer möglichen Veränderung der Benetzbarkeit durch die Zugabe der Partikel zu. Der CA (58°) des Cambisols deutet auf eine gute Benetzbarkeit des Bodens hin. Eine signifikante Erhöhung des CA (68°), was einer Abnahme der Benetzbarkeit entspricht, wurde ausschließlich in der höchsten PS-P-Variante (225 mg kg<sup>-1</sup>) nachgewiesen. Aufgrund der unklaren Ergebnisse sind Versuche mit höheren Spannweite an Applikationskonzentrationen an einem großen Probenkollektiv nötig, um den Einfluss der Partikel auf die Benetzungshemmung abzuschätzen.

## 4. Schlussfolgerungen

Die Synthese von dotierten und undotierten PS-P ohne Verwendung von Benetzungsmitteln und Additiven verlief erfolgreich. Die Partikel weisen eine hohe kolloidale Stabilität auf und sind bei der Applikation zu den Böden nicht aggregiert, was eine wesentliche Voraussetzung für Ökotoxizitätstests ist. Die Wiederfindungsraten der applizierten Partikel in den Böden waren mit beiden Methoden (Pyr-GC-MS, ICP-MS) sehr hoch, für den Nachweis in Pflanzen sind jedoch die dotierten Partikel (PS-Pd-PS-P) besser geeignet, da die Bestimmungsgrenze der Pd-Messung wesentlich niedriger sind als die der PS-Messungen. Die Partikel sind hervorragend für die Methodenentwicklung, Ökotoxizitätsversuche und Transportversuche mit Böden geeignet. Da die Quantifizierung von realen NPs in Böden mit dem derzeitigen Stand der Technik nicht möglich ist, sind Modellpartikel die einzige Möglichkeit und ein wertvolles Werkzeug, die Wirkung und den Verbleib nanoskaliger Polymerpartikel in Böden zu untersuchen. In zukünftigen Syntheseansätzen sollten Partikelladung, Partikelform und die Breite der Partikelgrößenverteilung stärker variiert werden, um ein ganzheitliches Bild über Wirk- und Transportmechanismen von NPs zu generieren.

Die Pflanzenversuche haben keine negativen Effekte auf das Wachstum von Haferpflanzen gezeigt, was möglicherweise auch auf die additivfreie Synthese zurückzuführen ist. Eine negative Wirkung auf Bodenmikroorganismen kann auf Basis der gezeigten Ergebnisse momentan nicht ausgeschlossen werden. Gleiches gilt für eine mögliche Erhöhung der Benetzungshemmung, zumindest in gut benetzbaren Böden. Dementsprechend sind weiterführende Untersuchungen mit größeren Probenkollektiven notwendig.

Für umfassendere Schlussfolgerungen aus den vorliegenden Forschungsergebnissen sei auf Hoppe et al. (2023) verwiesen.

## 5. Literatur

- Ad-hoc-AG Boden. (2006). Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, & Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Eds.). (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung: Mit 41 Abbildungen, 103 Tabellen und 31 Listen* (5., verbesserte und erweiterte Auflage). In Kommission: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller).
- Bachmann, J., Horton, R., van der Ploeg, R. R., & Woche, S. (2000). Modified sessile drop method for assessing initial soil–water contact angle of sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 564–567. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642564x>
- Bläsing, M., & Amelung, W. (2018). Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Science of The Total Environment*, 612, 422–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>
- Braconnot, S., Eissa, M. M., & Elaissari, A. (2013). Morphology control of magnetic latex particles prepared from oil in water ferrofluid emulsion. *Colloid and Polymer Science*, 291(1), 193–203. <https://doi.org/10.1007/s00396-012-2700-4>
- Bughici, T., & Wallach, R. (2016). Formation of soil–water repellency in olive orchards and its influence on infiltration pattern. *Geoderma*, 262, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.002>
- DIN EN 16174:2012-11, Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden\_ - Aufschluss von mit Königswasser löslichen Anteilen von Elementen; Deutsche Fassung EN\_16174:2012. (n.d.). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1859031>
- DIN EN ISO 22030:2011-09, Bodenbeschaffenheit\_ - Biologische Verfahren\_ - Chronische Toxizität in höheren Pflanzen (ISO\_22030:2005); Deutsche Fassung EN\_ISO\_22030:2011. (n.d.). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1804931>
- DIN ISO 15685:2012-12, Bodenbeschaffenheit\_ - Bestimmung der potentiellen Nitrifizierung und Hemmung der Nitrifizierung\_ - Schnellverfahren mittels Ammoniumoxidation (ISO\_15685:2012). (n.d.). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1917030>
- Dorau, K., Hoppe, M., Rückamp, D., Köser, J., Scheeder, G., Scholz, K., & Fries, E. (2023). Status quo of operation procedures for soil sampling to analyze microplastics. *Microplastics and Nanoplastics*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.1186/s43591-023-00063-5>
- Hartmann, G. F., Ricachenevsky, F. K., Silveira, N. M., & Pita-Barbosa, A. (2022). Phytotoxic effects of plastic pollution in crops: What is the size of the problem? *Environmental Pollution*, 292, 118420. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118420>
- Hoppe, M., Köser, J., Scheeder, G., Lamparter, A., Dorau, K., Grüger, L., Dierkes, G., & Schlich, K. (2023). Palladium-doped and undoped polystyrene nanoplastics in a chronic toxicity test for higher plants: Impact on soil, plants and ammonium oxidizing bacteria. *NanoImpact*, 32, 100484. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2023.100484>
- Huang, D., Wang, X., Yin, L., Chen, S., Tao, J., Zhou, W., Chen, H., Zhang, G., & Xiao, R. (2022). Research progress of microplastics in soil-plant system: Ecological effects and potential risks. *Science of The Total Environment*, 812, 151487. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151487>
- Huang, Z., Wang, C., Li, Y., & Wang, Z. (2012). Controlled preparation of core–shell polystyrene/polypyrrole nanocomposite particles by a swelling–diffusion–interfacial polymerization method. *Colloid and Polymer Science*, 290, 979–985.
- Hurley, R. R., & Nizzetto, L. (2018). Fate and occurrence of micro(nano)plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006>
- Li, L., Luo, Y., Li, R., Zhou, Q., Peijnenburg, W. J. G. M., Yin, N., Yang, J., Tu, C., & Zhang, Y. (2020). Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nature Sustainability*, 3(11), 929–937. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0567-9>

- Luo, Y., Li, L., Feng, Y., Li, R., Yang, J., Peijnenburg, W. J. G. M., & Tu, C. (2022). Quantitative tracing of uptake and transport of submicrometre plastics in crop plants using lanthanide chelates as a dual-functional tracer. *Nature Nanotechnology*, *17*(4), 424–431. <https://doi.org/10.1038/s41565-021-01063-3>
- Mitrano, D. M., Beltzung, A., Frehland, S., Schmiedgruber, M., Cingolani, A., & Schmidt, F. (2019). Synthesis of metal-doped nanoplastics and their utility to investigate fate and behaviour in complex environmental systems. *Nature Nanotechnology*. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0360-3>
- Nichols. (1987). NASA Technical Memorandum. *PREPARATION OF and POLYSTYRENE MICROSPHERES and FOR LASER*.
- Pérez-Reverón, R., Álvarez-Méndez, S. J., González-Sálamo, J., Socas-Hernández, C., Díaz-Peña, F. J., Hernández-Sánchez, C., & Hernández-Borges, J. (2023a). Nanoplastics in the soil environment: Analytical methods, occurrence, fate and ecological implications. *Environmental Pollution*, *317*, 120788. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120788>
- Real, A. E. P. del, Mitrano, D. M., Castillo-Michel, H., Wazne, M., Reyes-Herrera, J., Bortel, E., Hesse, B., Villanova, J., & Sarret, G. (2022). Assessing implications of nanoplastics exposure to plants with advanced nanometrology techniques. *Journal of Hazardous Materials*, *430*, 128356. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128356>
- Taylor, S. E., Pearce, C. I., Sanguinet, K. A., Hu, D., Chrisler, W. B., Kim, Y.-M., Wang, Z., & Flury, M. (2020). Polystyrene nano- and microplastic accumulation at Arabidopsis and wheat root cap cells, but no evidence for uptake into roots. *Environ. Sci.: Nano*, *7*(7), 1942–1953. <https://doi.org/10.1039/D0EN00309C>
- Wang, F., Feng, X., Liu, Y., Adams, C. A., Sun, Y., & Zhang, S. (2022a). Micro(nano)plastics and terrestrial plants: Up-to-date knowledge on uptake, translocation, and phytotoxicity. *Resources, Conservation and Recycling*, *185*, 106503. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106503>
- Wang, F., Wang, Q., Adams, C. A., Sun, Y., & Zhang, S. (2022b). Effects of microplastics on soil properties: Current knowledge and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, *424*, 127531. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127531>
- Wang, L., Wu, W.-M., Bolan, N. S., Tsang, D. C. W., Li, Y., Qin, M., & Hou, D. (2021). Environmental fate, toxicity and risk management strategies of nanoplastics in the environment: Current status and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, *401*, 123415. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123415>
- Xu, L., Wu, X.-C., & Zhu, J.-J. (2008). Green preparation and catalytic application of Pd nanoparticles. *Nanotechnology*, *19*(30), Article 30. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/30/305603>
- Zhang, J., Wang, X., Xue, W., Xu, L., Ding, W., Zhao, M., Liu, S., Zou, G., & Chen, Y. (2022). Microplastics pollution in soil increases dramatically with long-term application of organic composts in a wheat–maize rotation. *Journal of Cleaner Production*, *356*, 131889. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131889>



# Natural Attenuation (NA) und Stimulation des Bioabbaus (ENA) in der Praxis der Altlastenbearbeitung

Dipl.-Geol. Axel Müller & Prof. Dr. Andreas Tiehm<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Anaerober und aerober Abbau von AKW und LHKW .....	130
2. Natural Attenuation (NA) .....	130
3. Enhanced Natural Attenuation (ENA) .....	133
4. Literatur .....	136

Natural Attenuation (NA) oder die natürliche Schadstoffminderung ist mit der Nutzung des mikrobiologischen Abbaus beim Grundwasserschutz und der Altlastenbearbeitung längst zu einer akzeptierten und zunehmend angewendeten Handlungsoption geworden und findet auch in der Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung Berücksichtigung (§17 BBodSchV vom 09.07.2021). Unter dem Begriff „Natural Attenuation“ werden alle Prozesse zusammengefasst, die unbeeinflusst durch den Menschen zu einem Rückgang der Ausdehnung und Konzentration von Schadstofffrachten führen. Der mikrobiologische Abbau ist dabei der wesentliche Vorgang, der einen Netto-Verlust der Schadstofffrachten bewirkt. Die Nutzung biologischer Abbauprozesse zur Eliminierung von z.B. aromatischen Verbindungen oder halogenierten Lösungsmitteln gilt als nachhaltig, umweltschonend und kostengünstig (Tiehm & Schmidt 2007).

Ihre Überwachung wird als Monitored NA (MNA) bezeichnet und dient der Kontrolle ihrer Wirksamkeit. MNA wird weder als Sanierungs- noch als Schutz- und Beschränkungsmaßnahme eingestuft. Die Anwendung erfolgt im Rahmen eines MNA-Konzepts und ist nur dann möglich, wenn eine Sanierungsmaßnahme für den jeweiligen Standort unverhältnismäßig ist (LABO, 2015). Voraussetzung für die Genehmigungsfähigkeit eines MNA-Konzepts ist der Nachweis und ein fundiertes Verständnis der NA-Prozesse am jeweiligen Standort. In Fällen, in denen spezifische Standortbegebenheiten wie z.B. die mangelnde Verfügbarkeit von Elektronenakzeptoren den natürlichen Abbau limitieren, kann eine gezielte Stimulation des natürlichen Abbaus wie Enhanced NA (ENA) ein geeignetes Sanierungsverfahren sein. NA und ENA setzen aber immer ein umfassendes Prozessverständnis sowie ein qualifiziertes Monitoring voraus (LABO 2015, Tiehm & Schmidt 2007).

Die häufigsten Altlast-Schadensherde umfassen Gaswerksstandorte, Altablagerungen, Reinigungsbetriebe und Standorte der Metallverarbeitenden Industrie. Die Hauptschadstoffe an diesen Standorten bilden die aromatischen Kohlenwasserstoffe (AKW) und leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffe (LHKW). Aus einigen Projekten liegen Langzeiterfahrungen sowohl aus MNA- wie auch aus ENA-Projekten vor, die an vier Standortbeispielen hier näher erläutert werden.

---

<sup>1</sup> Dipl.-Geol. Axel Müller & Prof. Dr. Andreas Tiehm, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe Straße 84, 76139 Karlsruhe, (0721) 9678-223, [axel.mueller@tzw.de](mailto:axel.mueller@tzw.de), (0721) 9678-137, [andreas.tiehm@tzw.de](mailto:andreas.tiehm@tzw.de)

## 1. Anaerober und aerober Abbau von AKW und LHKW

An Teeröl-kontaminierten Standorten werden neben den BTEX-Aromaten und EPA-PAK auch weitere aromatische Kohlenwasserstoffe (AKW) wie Inden, die heterozyklischen Kohlenwasserstoffe (NSO-HET) und kurzkettige Alkylphenole (SCAP = short-chain alkylphenols) berücksichtigt, da diese ebenfalls lange Grundwasserfahnen bilden und als toxikologisch relevant eingestuft werden (Müller et al. 2012, Müller et al. 2014). Teeröl-bürtige Stoffe können unter aeroben oder anaeroben Bedingungen abgebaut werden. Der bevorzugte terminale Elektronenakzeptor (TEA) für den Abbau von Kohlenwasserstoffen ist Sauerstoff. Für viele Verbindungen ist auch ein anaerober Abbau möglich, wobei im Wesentlichen die TEA Nitrat, Eisen(III), Mangan(IV), Sulfat oder Carbonat genutzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Energieeffizienz der Abbauprozesse bildet sich im Abstrom von Schadensherden häufig eine charakteristische Redoxabfolge aus. Limitierungen des Abbaus können bei hohen Konzentrationen im Herdbereich (Toxizität), bei nicht verfügbaren TEA sowie bei einem Mangel an Nährstoffen auftreten.

Bei der anaerob-reduktiven Dechlorierung von Chlorenchen dienen Wasserstoff oder Acetat als Elektronen-Donoren und stammen in der Regel aus der Fermentation komplexerer organischer Auxiliarsubstrate. Der reduktive Abbau geht von Perchlorethen (PCE) und / oder Trichlorethen (TCE) über die Zwischenprodukte 1,2-cis-Dichlorethen (cDCE) und Vinylchlorid (VC) im Idealfall bis zum dehalogenierten Endprodukt Ethen. Häufig kommt es allerdings zur Akkumulation der toxischen bzw. krebserregenden Metabolite cDCE und VC, da an vielen Standorten die dazu notwendigen strikt anaeroben Bedingungen nicht vorliegen oder Schlüsselorganismen wie *Dehalococcoides* spp. nicht ausreichend vorhanden sind (Kranzioch et al. 2015, Müller et al. 2022). Die intermediären Abbauprodukte der reduktiven Dechlorierung sind auch unter aeroben Bedingungen abbaubar. Der aerobe-oxidative Abbau führt zu einer vollständigen Mineralisierung, d.h. zum Abbau zu Wasser, Chlorid und Kohlenstoffdioxid. In einigen Fällen läuft der Abbau co-metabolisch, meist aber produktiv ohne zusätzliches Auxiliarsubstrat ab (Tiehm et al. 2008, Schmidt et al. 2010, Schmidt & Tiehm 2011). Dabei dient das Chlorethen als Wachstumssubstrat und Elektronen-Donor sowie Sauerstoff als Elektronen-Akzeptor. 2014 wurde am TZW erstmals weltweit auch der produktive TCE-Abbau beschrieben (Schmidt et al. 2014).

## 2. Natural Attenuation (NA)

### 2.1 Fallbeispiel Altablagerung unter stationären Redoxbedingungen

Es handelt sich um eine ehemalige Sandgrube, die u.a. mit Gaswerksabfällen verfüllt ist. Die Teeröle drangen über die Grubensohle hinaus in den angrenzenden Porengrundwasserleiter und haben den wassererfüllten Untergrund imprägniert. Nach Abschluss der Sanierungsuntersuchung wurde eine Herdsanierung als unverhältnismäßig eingestuft. Die vom Schadensherd ausgehende Emission beträgt aktuell über 1,0 kg / d für die Routine-Parameter BTEX-Aromaten und EPA-PAK. Daneben wurden am Standort aber auch die NSO-HET, ihre Metabolite, die SCAP sowie die am Standort ebenfalls relevanten Chlorenchene untersucht. Die Fahnenlängen betragen für die PAK und NSO-HET rd. 500 m, für die BTEX-Aromaten und weitere AKW wie Inden rd. 250 m. Die NSO-HET-Metabolite, die SCAP sowie die Chlorenchene bilden kürzere Fahnen (170 m). Die Toxizitätsbestimmungen (Leuchtbakterienhemmtest) zeigen, dass durch die mikrobiologischen Umsetzungen im Abstrom keine toxikologisch kritischen Metabolite entstanden sind.



Das Konzept zum Prozessverständnis sieht den Einsatz unterschiedlicher Methoden und Parameter (multiple lines of evidence approach) vor: Schadstoffprofile, Toxizität, Redoxzonierung, mikrobiologische Bestandsaufnahme, Mikrokosmen, reaktives Stofftransportmodell. Die Schadstoffprofile liefern bereits Anhaltspunkte, dass die Schadstoffreduktion auf mikrobiologische Abbauprozesse zurückgeht: Es konnte eine relative Anreicherung von Benzol, Indan und Acenaphthen sowie bei den NSO-HET von Carbazol und methylierten O-Heterozyklen beobachtet werden. Weiter erfolgt eine vollständige anaerob-reduktive Dechlorierung vom PCE zum Ethen. Schadensherd-nah spielen insbesondere Sulfat-reduzierende und methanogene Prozesse eine Rolle. Eisen(III)-reduzierende Prozesse sind auch im weiteren Abstrom relevant. Nitrat-reduzierende und aerobe Prozesse gewinnen erst an den Fahnenrändern durch seitliche Einmischung nicht kontaminierter Wässer an Bedeutung. Die mikrobielle Besiedelung mit aeroben und anaeroben stoffwechselaktiven Bakterien belegt das Potential der Biozönose. Der PCR-Nachweis der fünf dechlorierenden Mikroorganismengruppen (einschließl. *Dehalococcoides* spp.) unterstreicht zudem die am Standort ausgeprägte Dechlorierung. Die in den anaerob/aeroben Mikrokosmen ermittelten Abbaureihenfolgen zeigen eine hohe Übereinstimmung zu den im Feld zu beobachtenden Schadstoffprofilen und beweisen den natürlichen Schadstoffabbau unter den unterschiedlichen Redoxbedingungen. Die Untersuchungsdaten wurden in ein reaktives Stofftransportmodell implementiert, das im Rahmen von MNA fortgeschrieben wird.

Der Standort wird zur Prognoseprüfung der Fahnenstationarität seit 20 Jahren überwacht. Die Schadstoffmindernden Redoxprozesse sowie die mikrobielle Abbauproduktivität erweisen sich dabei als langzeitstabil. Es ist zu beobachten, dass die Frachten an BTEX-Aromaten seitdem signifikant rückläufig sind (Abbildung 1), während die Acenaphthen-Fahne sich nahezu - mit einem leicht rückläufigen Trend - stationär verhält.

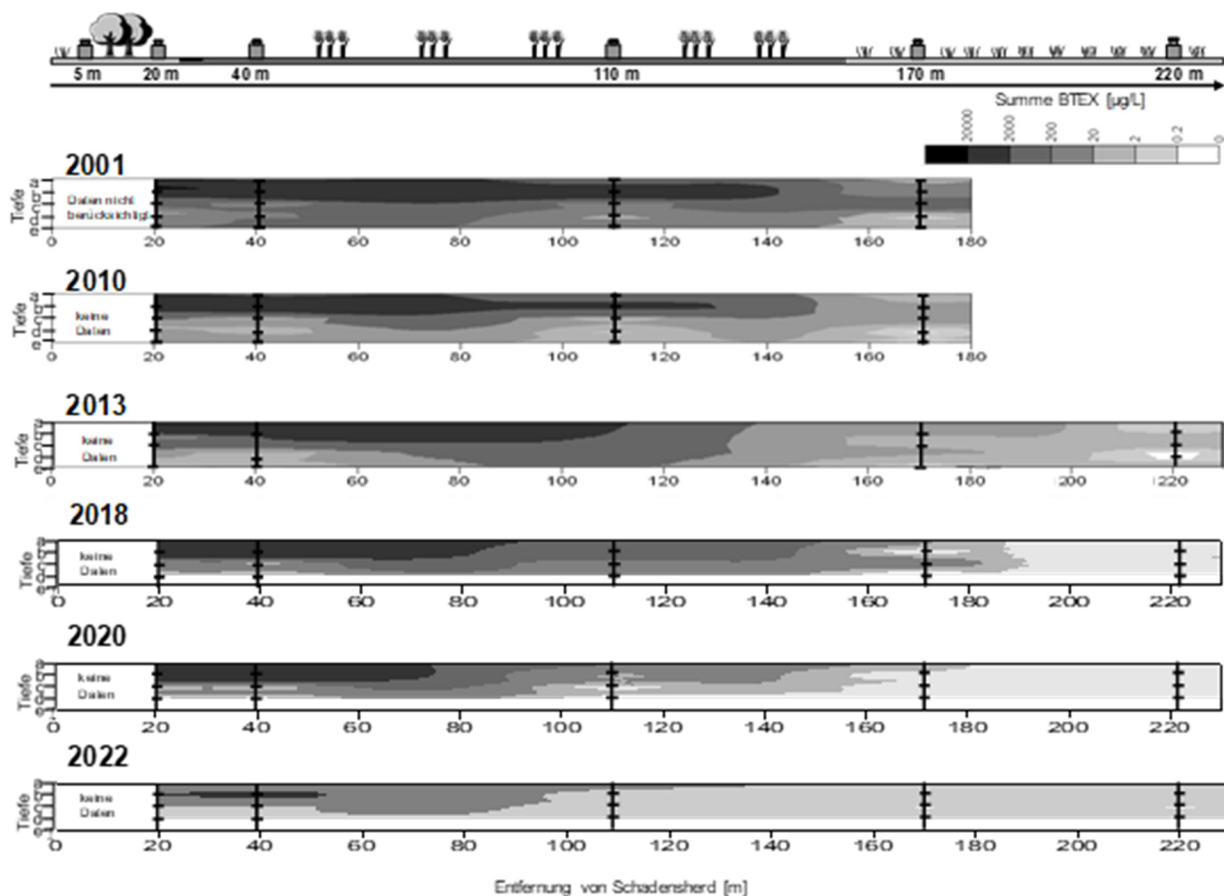


Abbildung 1: Längsschnitte der BTEX-Konzentrationen entlang der Hauptabstromlinie von 20 m bis 170 m (E2 - E5) in 2001, 2010 bzw. bis 220 m (E-) in 2013 jeweils in den Tiefen a - e sowie von 20 m bis 220 m (E2 - E-) in 2018, 2020, 2022 jeweils in den Tiefen b - d.

Neben dem chemisch-mikrobiologischen-Monitoring ist auch ein hydraulisches Monitoring für das Gesamtverständnis z.B. bei Drehungen der Fließrichtung wichtig. Die auch aktuell hohen Abbau-Raten in der Fahne (Halbwertszeit z.B. Benzol 87 Tage und Acenaphthen 173 Tage) in Verbindung mit den nach wie vor hohen aus dem Herd freigesetzten Frachten (z.B. Benzol 0,75 kg/d, Acenaphthen 0,07 kg/d) belegen die hohe Leistungsfähigkeit des natürlichen Bioreaktors.

## 2.2 Fallbeispiel ehemaliges Gaswerk unter dynamischen Redoxbedingungen

Das ehemalige Gaswerk befindet sich in unmittelbarer Ufernähe zum Oberrhein (rd. 280 m). Die Hauptverunreinigungen konzentrieren sich auf die ehemaligen unterirdischen Kondensatgruben, die 2010/2011 mittels Bodenaushub bzw. Großlochbohrungen bis 11 m uGOK beseitigt wurden. Nach Sanierungsabschluss betrug die Emission noch rd. 0,7 kg/d Fracht organische Stoffe. Im Porengrundwasserleiter dominieren AKW, EPA-PAK und NSO-HET das Schadensbild mit einer Fahnenlänge von rd. 200 m.

Die meisten MNA-Konzepte liegen – wie im Beispiel oben - für Standorte mit nur wenig variierenden Strömungs- und Redoxbedingungen vor. Hier wurde erstmals der Einfluss der instationären Grundwasserströmung und der Redoxbedingungen auf die Schadstoffminderung untersucht (Salowsky et al. 2021). Die Schadstoffprofile an diesem Standort zeigen eine zum oben beschriebenen Standort (Abschnitt 2.1) ähnliche relative Anreicherung bei insgesamt abnehmenden Konzentrationen (Acenaphthen, Benzol, Inden, Carbazol, methylierte O-Heterozyklen). Der Einfluss des Rheins auf den Grundwasserspiegel, die Schadstoffkonzentrationen und die Redoxbedingungen in der Fahne erfolgt über ein Langzeitmonitoring mittels Multiparametersonde. An den Rändern der Schadstofffahne ist zeitweise bei Rhein-Hochwasser und influenten Strömungsverhältnissen Sauerstoff verfügbar, was aerobe und verstärkt Eisen(III)-reduzierende Abbauprozesse ermöglicht und im Wesentlichen die ausgeprägte Schadstoffminderung am Standort begründet. Der Nachweis des Eisen(III)-reduzierenden und aeroben Schadstoffabbaus erfolgte in Labor-Mikrokosmen (Abbildung 2).

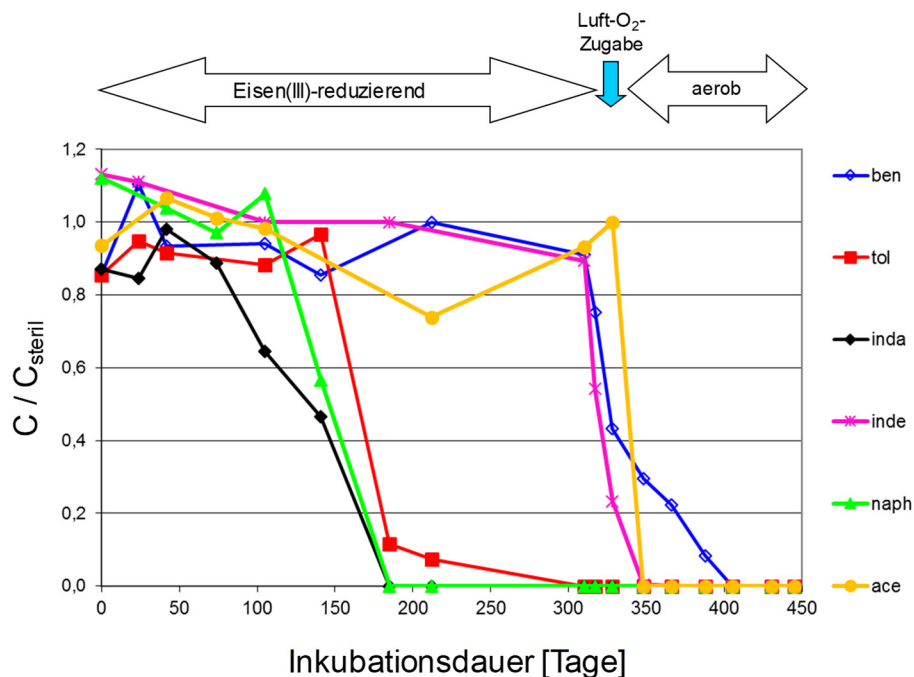


Abbildung 2: Mikrobiologischer Abbau (Konzentrationen relativ zur Sterilkontrolle) für Benzol (ben), Toluol (tol), Indan (inda), Inden (inde), Naphthalin (naph) und Acenaphthen (ace) unter zunächst Eisen(III)-reduzierenden und anschließend aeroben Abbaubedingungen (aus: Salowsky et al. 2021).

Anhand der Feld- und Labordaten wurde ein reaktives Stofftransportmodell erstellt. Das konzeptionelle Modell und die Simulation des reaktiven Transports konnte dabei die Interpretation der ausgeprägten Schwankungen der Schadstoffkonzentration erleichtern.

Im Beobachtungszeitraum von über 10 Jahren sind auch aufgrund der Sanierungsmaßnahme die Herdnahen Konzentrationen an BTEX-Aromaten um rd. zwei bzw. die der EPA-PAK und NSO-HET um rd. eine Größenordnung zurückgegangen. MNA zeigt, dass die Prozesse unter den instationären Strömungs- und Redoxbedingungen zu einer vergleichsweise kurzen Fahne führen und anhaltend wirksam sind. Die Fahne schrumpft für alle Schadstoffklassen signifikant. Die grundsätzlichen Anforderungen an ein MNA-Konzept nach dem LABO-Positionspapier 2015 (Prozessverständnis, Frachtreduktion, Fahnenstationarität, zeitliche Stabilität der NA-Prozesse) sind erbracht.

### **3. Enhanced Natural Attenuation (ENA)**

#### **3.1 Fallbeispiel Lack- und Farbenfabrik (Stimulation Sulfat-reduzierender AKW-Abbau)**

Der etwa 50-jährige Produktionsbetrieb der Lack- und Farbenfabrik führte zu einer AKW-/BTEX-Verunreinigung des Grundwasserkörpers mit Belastungen in der Summe von bis zu rd. 20 mg/L. Eine über mehr als 10 Jahre laufende pump&treat-Maßnahme erwies sich als kostenintensiv und ineffizient. Erste Hinweise auf ein NA-Abbaupotential am Standort ermöglichten in Abstimmung mit den Behörden ein Abschalten der Grundwassersicherung in Verbindung mit einem Monitoring der sich im Anschluss ausbreitenden Fahne sowie vertieften NA-/ENA-Untersuchungen. Im Zuge des langjährigen Monitorings hatte sich eine über 120 m lange Fahne ausgebildet und NA wurde als alleinige Sanierungsoption als unzureichend bewertet und ENA einer näheren Prüfung unterzogen.

Die intensive Betrachtung der Felddaten im Hinblick auf Hinweise eines natürlichen Schadstoffabbaus zeigten eine relative Abreicherung von Toluol, Ethylbenzol und o-Xylol. Am Standort dominierende Substanzen wie m-/p-Xylol sowie 1,2,4-Trimethylbenzol breiteten sich demgegenüber vergleichsweise weit aus und waren an der Fahnen Spitze vergleichsweise angereichert. Die Redoxzonierung wies ein strikt anaerobes Grundwassermilieu auf. Gleichzeitig zeigten sich erhebliche Limitierungen an den alternativen Elektronenakzeptoren Nitrat und Sulfat durch ihre vollständige anaerobe Umsetzung bereits im mittleren Teil der Fahne, was mutmaßlich zu der vergleichsweise langen Fahne führte. Mikrokosmen zur Bewertung des anaeroben Stimulationspotentials belegten sowohl mit Nitrat oder Sulfat einen deutlich verbesserten Abbau. Das Eliminierungspotential mit Sulfat wurde mit > 95 % beziffert, wobei auch die dominierenden Substanzen mit Sulfat umgesetzt wurden. Nachdem weitere Versuche zeigten, dass bei einer möglichen Stimulation mit Nitrat a) hohe Mengen an Nitrat durch die parallel stattfindende Sediment-Oxidation verbraucht werden und b) ein Verblockungsrisiko (Fällung Eisen(III)-Mineralspezies) besteht, wurde ENA mit Sulfat am Standort als die aussichtsreichste Variante bewertet und zur Umsetzung empfohlen.

Die Machbarkeit von ENA mit Sulfat wird in einem mehrjährigen Pilotversuch erfolgreich gezeigt. Die Einmischung / Verteilung von Sulfat gelang mit Hilfe großvolumiger Infiltrationsbrunnen sehr gut. In der Folge zeigten sich kontinuierlich rückläufige BTEX-/AKW-Gehalte im Testfeld. Der Nachweis des Sulfat-reduzierenden AKW-Abbaus erfolgte a) über die sehr gute Übereinstimmung der Sulfat-reduzierenden Abbaumuster im Feld mit denen im Labor (schneller Abbau von m-/p-Xylol / Trimethylbenzole, langsamer

Abbau von Benzol) (Abbildung 3) sowie b) über eine eigens im Rahmen des Projektes entwickelten Bio-monitoring-Methode mit Nachweis der dissimilatorischen Sulfitreduktase als Schlüsselenzym der Sulfat-Reduktion mittels PCR (Polymerase-Chain-Reaction) (Müller et al. 2020).

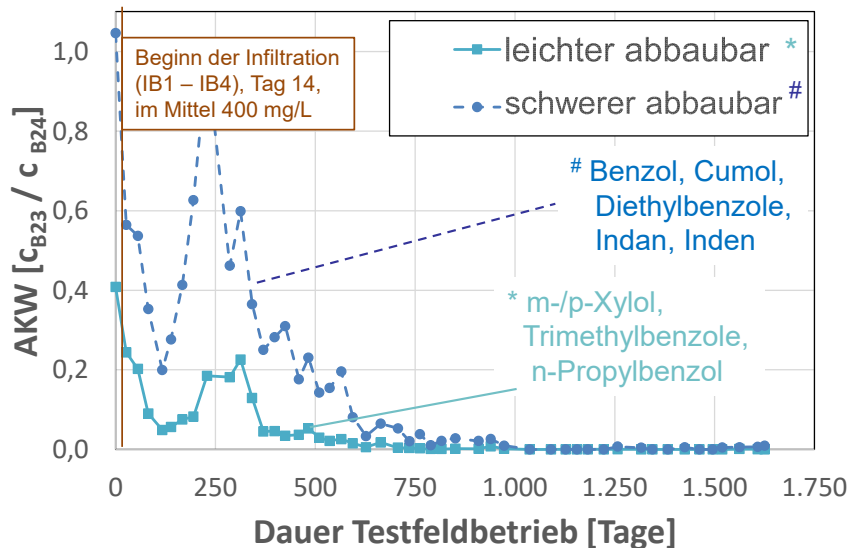


Abbildung 3: Konzentrations-Abnahme für den Bilanzraum B24 → B23 (normiert  $c_{B23}/c_{B24}$ ) der unter Sulfat-reduzierenden Bedingungen schneller bzw. langsamer abbaubaren Einzelsubstanzen während des Pilotbetriebs; die unter Sulfat-reduzierenden Redoxbedingungen abbaubaren AKW wurden in kontrollierten Labor-Abbauversuchen identifiziert (Mikrokosmen).

Das vorliegende Prozessverständnis belegt weiter, dass der Abbau der mit Sulfat schlecht abbaubaren Restbelastungen über Eisen(III)-reduzierende wie auch über denitrifizierende und aerobe Abbauprozesse am Fahnenrand erfolgt. Der inzwischen seit mehr als sechs Jahren laufende Sanierungsbetrieb unterstreicht die Praxistauglichkeit des Verfahrens.

### 3.2 Fallbeispiel metallverarbeitender Betrieb (Stimulation aerober TCE-Abbau)

Der Beispielstandort befindet sich im Bereich von großflächigen Industrieanlagen. Der Untergrund setzt sich aus Kluftgesteinen des Gipskeupers zusammen. Hauptkontaminant ist meist TCE, wobei auch das aus der anaerob-reduktiven Dechlorierung resultierende cDCE in relativ hohen Konzentrationen auftritt. Zur Gefahrenabwehr wurde in der Vergangenheit eine Grundwasserreinigungsanlage (pump & treat) betrieben. Aufgrund der hohen Kosten und der zu erwartenden Tailing-Effekte der pump & treat – Maßnahme wurde am Standort nach Möglichkeiten zur Optimierung der Sanierungsstrategie gesucht. In Mikrokosmen zur Bestimmung des aeroben Abbaupotentials wurde ein aerober TCE-Abbau mit Grundwasser aus sieben von acht untersuchten Messstellen festgestellt. Die Analyse der Chloridbildung belegte eine stöchiometrische Chloridfreisetzung und somit eine vollständige Mineralisierung von TCE (Schmidt et al. 2014, Gaza et al. 2015, Gaza et al. 2019). Dies war weltweit der erste Nachweis für einen produktiven aeroben TCE-Abbau.

Die Machbarkeit zur Stimulierung des aerob-produktiven TCE-Abbaus wurde im Rahmen eines Pilotversuchs am Beispielstandort erprobt. Durch diese Untersuchungen wurden vertiefte Erkenntnisse über den aeroben TCE-Abbau gewonnen, die ein erhebliches Potential zur Weiterentwicklung von ENA-Konzepten besitzen, aber auch ein vertieftes Prozessverständnis im Hinblick auf aerobe NA-Prozesse an LCKW-kon-

taminierten Standorten ermöglichen. Der aerob-produktive Abbau von TCE ermöglicht am Beispielstandort, an dem PCE nur eine untergeordnete Rolle spielt, eine direkte Stimulierung des aeroben Chlorethen-Abbaus im Feld in Rahmen der ENA-Maßnahme. Das grundlegende Standort-spezifische Prozessverständnis für den aeroben TCE-Abbau als Grundlage für die Auslegung des Pilotbetriebs wurde in den voran gegangenen Mikrokosmen erlangt ( $O_2$ -Optimum, lag-Phase zur Adaption, Nährstoffe). Im Feld erfolgte neben der Schadstoffreduktion der Abbaunachweis mit Hilfe der Isotopenfraktionierung (Abbildung 4). Für die ENA-Maßnahme ist die Einbringung von Sauerstoff notwendig. Verschiedene Milieufaktoren - z.B. Temperatur, pH-Wert, Begleitkontaminanten etc. - können den TCE-Abbau beeinflussen.

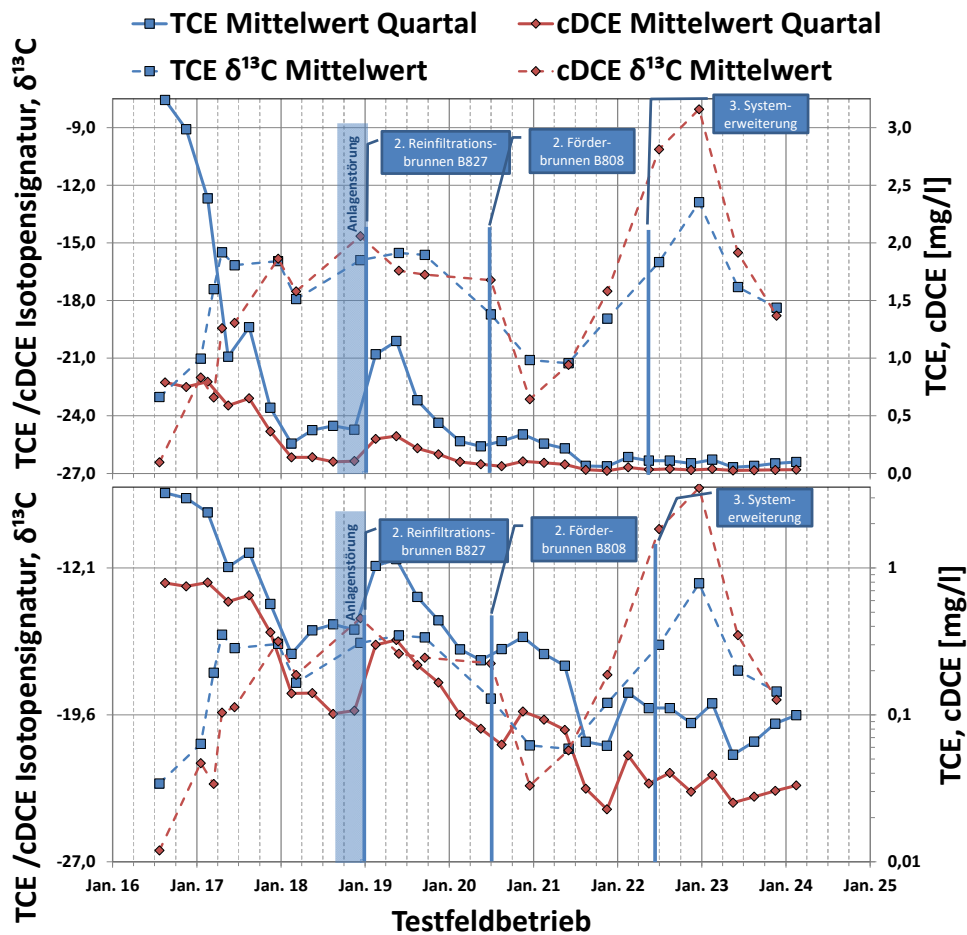


Abbildung 4: TCE- und cDCE-Quartalsmittelwerte (oben linear, unten logarithmisch) sowie Mittelwerte der TCE- und cDCE-Isotopensignaturen [‰] über einen Zeitraum von 7,5 Jahren (Q3/16 - Q2/23).

Insgesamt belegt der nun seit mehr als sieben Jahren laufende Pilotbetrieb, dass die TCE-abbauenden Bakterien auch nach Betriebs-Störungen und mehreren Erweiterungen des Wirkraums in der Lage sind, sich neu anzupassen und über lange Zeit eine stabile, robuste und sehr leistungsstarke TCE-Mineralisation zu ermöglichen. Gesamtzellzahlen sowie eine neu am TZW etablierte PCR-Biomonitoring-Methode bestätigen dies und belegen eine robuste und sehr gute mikrobielle Abbauproduktivität. Vor dem Hintergrund des weltweit an diesem Standort erstmals gelungenen Nachweises des aeroben TCE-Abbaus unter in-situ Feldbedingungen, wird der Testfeldbetrieb fortgesetzt, um in der Summe zu einem fundierten und verlässlichen Prozessverständnis hinsichtlich der Stabilität des aeroben TCE-Abbaus im Langzeitbetrieb zu gelangen. Dies ist unabdingbare Voraussetzung für die bereits vorgenommenen und noch geplanten Umstellungen auf eine „full-scale“-ENA-Sanierungskonzeption.

## 4. Literatur

- Gaza S., Schmidt K., Friedrich M., Hansel H., Tiehm A. (2015) Ein neuer aerober biologischer Abbauweg für Trichlorethen: TCE als Wachstumssubstrat. *altlastenspektrum* 5/2015: 174-181.
- Gaza S., Schmidt K. R., Weigold P., Heidinger M., & Tiehm A. (2019) Aerobic metabolic trichloroethene biodegradation under field-relevant conditions. *Water research*, 151, 343-348.
- Kranzioch I., Ganz S., Tiehm A. (2015) Chloroethene degradation and expression of Dehalococcoides dehalenase genes in cultures originating from Yangtze sediments. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22: 3138-3148.
- LABO (2015) LABO-Positionspapier „Berücksichtigung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse bei der Altlastenbearbeitung“. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, Ständiger Ausschuss Altlasten – ALA. Ad-hoc Unterausschuss „Natürliche Schadstoffminderung“ 15.09.2015.
- Müller A., Augenstein T., Tiehm A. (2012) Entwicklung und Umsetzung eines MNA-Konzeptes an einem Teeröl-kontaminierten Standort. *Veröffentlichungen aus dem TZW Karlsruhe (ISSN 1434-5765), Band 51*, 220.
- Müller A., Schneider A.-L., Kraßnitzer S., Tiehm A., Brinkmann M., Lehmann G., Deutschmann, Hollert H. (2014) Identifikation von prioritären NSO-Heterozyklen auf Basis von neuen Felddaten und Toxizitäts-Tests. In: *Symposium Strategien zur Boden- und Grundwassersanierung*, DECHEMA, Darmstadt, 24.-25. November 2014, Tagungsband: 64-67.
- Müller A., Schell H., Stange C., Willmann A., Schmid K.-H., Tiehm A. (2020) Stimulierung des Abbaus von Monoaromaten mit Sulfat. In: *Kursunterlagen zum Seminar 02/2020 „Natural Attenuation (NA) in der Praxis der Altlastenbearbeitung“*, Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg, Karlsruhe 08. Okt. 2020: 4/1-4/27.
- Müller A., Schäfer W., Schumacher K., Hoffmann U., Nordmann T., Puster H., Tiehm A (2022): Sequentiell anaerob-aerober LCKW-Abbau an der ehemaligen chemischen Reinigung Hemesath. In: *24. Symposium Strategien zur Sanierung von Boden & Grundwasser*, DECHEMA, Frankfurt, 28./29. Nov. 2022, Tagungsband: 52–57.
- Salowsky H., Schäfer W., Schneider A.-L., Müller A., Dreher C., Tiehm, A. (2021) Beneficial effects of dynamic groundwater flow and redox conditions on Natural Attenuation of mono-, poly-, and NSO-heterocyclic hydrocarbons. *Journal of Contaminant Hydrology* 243: 103883.
- Schmidt K. R., Augenstein T., Heidinger M., Ertl S., Tiehm, A. (2010) Aerobic biodegradation of cis-1,2-dichloroethene as sole carbon source: Stable carbon isotope fractionation and growth characteristics. *Chemosphere* 78 (5): 527–532.
- Schmidt K. R., Tiehm A. (2011) Natural attenuation am Chlorethen-Standort Frankenthal: Bedeutung des sequentiell anaerob-aeroben Bio-Abbaus. *Altlastenspektrum* 5: 212–219.
- Schmidt K.R., Gaza S., Voropaev A., Ertl S., Tiehm A. (2014) Aerobic biodegradation of trichloroethene without auxiliary substrates. *Water Res.* 59: 112-118.
- Tiehm A., Schmidt K.R. (2007) Methods to evaluate biodegradation at contaminated sites. In: Knödel K., Lange G., Voigt H.-J. (Eds.): *Environmental geology – Handbook of field methods and case studies*. Springer, Berlin, Heidelberg: 876-911.
- Tiehm A., Schmidt K. R., Pfeifer B., Heidinger M., Ertl S. (2008) Growth kinetics and stable carbon isotope fractionation during aerobic degradation of cis-1,2-dichloroethene and vinyl chloride. *Water research* 42 (10-11): 2431–2438.

# Industriepark Schwarze Pumpe – Bergrechtliche Sanierung eines komplexen Grundwasserschadens im Prozess des Strukturwandels in der Lausitz

Ulrike Schöbel<sup>1</sup> und Dr.-Ing. Thomas Daffner<sup>2</sup>

## Inhalt

1. Schwarze Pumpe – gewaltige Perspektive .....	137
2. Kontaminationssituation .....	139
3. Grundwasser- und Bodensanierung .....	141
4. Neuordnung der Sanierung.....	145
5. Literatur.....	148

## 1. Schwarze Pumpe – gewaltige Perspektive

Wegen der Braunkohle ist der so genannte Strukturwandel in der Lausitz ein Dauerzustand – Umsiedlung, Wandel der Landschaft und Industrie, Abwanderung. Die Energiebasis und gewaltige Perspektive für die Braunkohleindustrie der DDR war das Braunkohlekombinat Schwarze Pumpe. In den 50er Jahren wurde die Idee geboren und anschließend umgesetzt – einen Verbund aus verschiedenen Industrien zur Braunkohleveredelung an einem Standort zu konzentrieren, um die Synergieeffekte zu nutzen. Der Standort Schwarze Pumpe war essenziell für den Arbeiter- und - Bauernstaat sowie dessen Bürger. Von hier aus wurde die DDR mit Briketts, Koks, Stadtgas und Elektroenergie versorgt. Aus der gesamten DDR zogen Arbeitskräfte in die bis dahin abgelegene Niederlausitz. Das als sozialistische Wohnstadt ausgerufene Hoyerswerda hatte 1955 7.555 Einwohner und erreichte 1981 den Höhepunkt der Bevölkerungsentwicklung mit 71.124 Bewohnern [1].

Das Werk wurde förmlich aus dem Boden gestampft und umfasste eine Fläche von ca. 7 km<sup>2</sup> mit einer Kokerei (BHT – Braunkohlehohtemperaturkoks), drei Brikettfabriken, drei Kraftwerken und einem Druckgaswerk inkl. Nebenanlagen (vgl. Abbildung 1). Die Abfallprodukte wurden in den nahegelegenen Deponien Terpe und Zerze verkippt.

In den 30 Jahren Betrieb kam es u.a. aufgrund der Unerfahrenheit, der Neuentwicklungen, der Mangelwirtschaft und durch menschliches Versagen, zu vielen Havarien bzw. Handhabungsverlusten. In den späteren Betriebsjahren war die Technik aufgrund der Mangelwirtschaft veraltet und auch die Bauwerke durch eine Überlastung oft erneuerungsbedürftig. Schadstoffe wie MKW, PAK, BTEX, Alkylphenole gelangten in Größenordnung in den Boden. Nach Angaben im Havariekataster von 1982-95 sind insgesamt 2.550 m<sup>3</sup> verlustig gegangen [2].

---

<sup>1</sup> Ulrike Schöbel (Umweltplanungs- und Betriebsgesellschaft mbH Vogtland, u.schöbel@ubv.de)

<sup>2</sup> Dr.-Ing. Thomas Daffner (Umweltbüro GmbH Vogtland; th.daffner@ubv-vogtland.de)

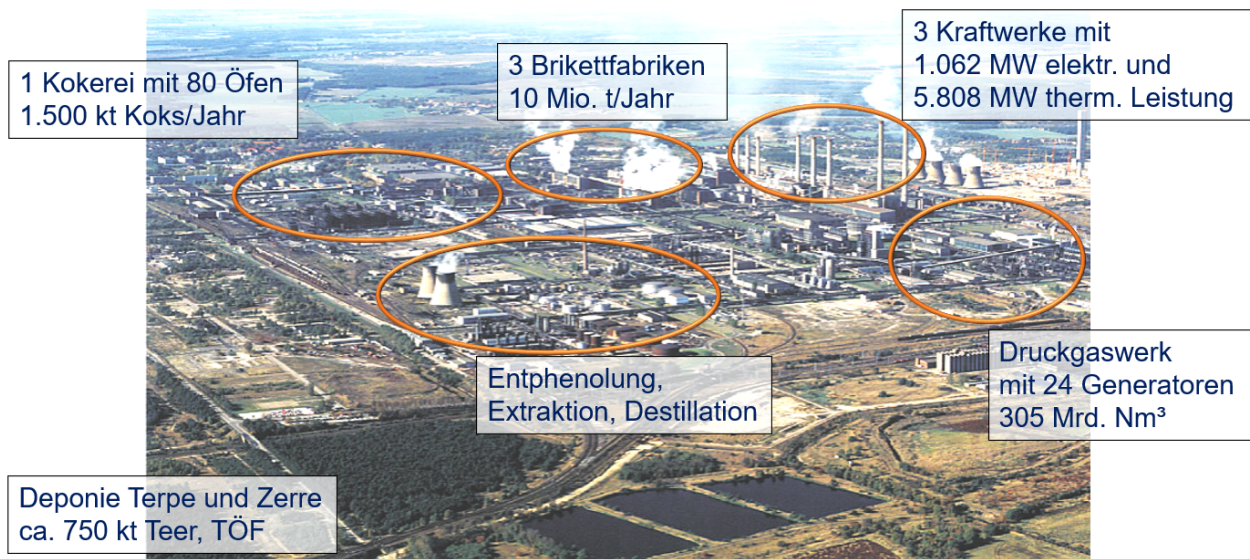


Abbildung 1: Übersicht zum VEB Gaskombinat Schwarze Pumpe um ca. 1990, nach [2]

Nach dem Zusammenbrechen der DDR wurden zahlreiche Kraftwerke und Tagebaue geschlossen. Die Wende bedeutete für viele Lausitzer den Verlust des Arbeitsplatzes, der Sicherheit und der Gewohnheit. Im Zeitraum 1995 – 2015 reduzierte sich die Bevölkerung um ca. 20 % [3]. Das ehemalige VEB Gaskombinat Schwarze Pumpe wurde nach 1990 größtenteils zurückgebaut. Einige Anlagen wurden in den 90er Jahren noch weiter genutzt.

Im Zuge der Abspaltung der SVZ Schwarze Pumpe GmbH von der LBV mbH (Vorgänger der LMBV mbH-Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH) per 01.01.1995 sind die zu diesem Zeitpunkt bereits stillgelegten und die für einen befristeten Weiterbetrieb vorgesehenen Anlagen des ehemaligen Gaswerkes sowie Flächen mit Kontaminationsherden bei der LMBV mbH verblieben. Die für einen dauerhaften Weiterbetrieb vorgesehenen Teilanlagen des ehemaligen Gaswerkes wurden ab 1995 durch die SVZ Schwarze Pumpe GmbH zur Abfallvergasung weiter betrieben und ab 2005 durch die Sustec Schwarze Pumpe GmbH übernommen [4]. In den Jahren 1993 bis 1998 wurde am Standort ein neues Braunkohle-Großkraftwerk mit einer Gesamtleistung von ca. 1600 MW errichtet.

Seit Anfang 2013 betreibt, entwickelt, vermarktet und organisiert der „Zweckverband Industriepark Schwarze Pumpe“ (ZV-ISP) den Industriepark. Für diese Aufgaben und das Industrieparkmanagement dient die ASG Spremberg GmbH als Konzessionärin und Dienstleisterin. Der Industriepark, ein modernes und leistungsfähiges Gewerbegebiet, war in vergangenen Jahren hauptsächlich durch die Papierfabrik und das Braunkohlenkraftwerk geprägt.

Das Entwicklungskonzept für den Industriepark Schwarze Pumpe verfolgt eine Folgenutzung des Geländes für industrielle und gewerbliche Zwecke. Mit der Strukturwandelförderung der Bundesrepublik zeigen sich Investoren und die Technische Universität Dresden an Flächen auf dem Industriepark vermehrt interessiert. Die Sanierung des Standortes, maßgeblich durch die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) betrieben, hat die Flächenvorbereitung zur Unterstützung des regionalen Strukturwandels zum Ziel. Die industriehistorischen Flächen werden nicht zum Selbstzweck saniert, sondern sind ein wesentliches und zielorientiertes Puzzleteil im großen Bild des Strukturwandels der Lausitz.



## **2. Kontaminationssituation**

Infolge staatlicher Verträge und behördlicher Auflagen (z.B. bergrechtliche Abschlussbetriebspläne, Sonderbetriebspläne etc.) war und ist die LMBV mbH verantwortlich für die Boden- und Grundwasseranierung im s.g. räumlichen und sachlichen Geltungsbereich. Die ersten orientierenden Erkundungen fanden bereits 1990 für den Boden statt und wurden ab 1992 mit einem Untersuchungsprogramm für das Grundwasser ergänzt.

Für das Industriegelände Schwarze Pumpe werden insgesamt 131 Altlastverdachtsflächen - ALVF (Teilflächen) in der Datenbank der LMBV mbH geführt. Mit umfangreichen Untersuchungskampagnen für den Boden wurden im Rahmen der Detailuntersuchung die Haupteintragsbereiche lokalisiert (vgl. Abbildung 3). Für die Beurteilung der Gefahrensituation und zur Abschätzung des Handlungserfordernis hinsichtlich der Sanierungsmaßnahmen wurde 2005/2006 eine Sickerwasserprognose durchgeführt. Die ermittelten Elutionszeiten für die prioritären Schadstoffgruppen liegen in der Größenordnung von 100-1.000 Jahren, sodass eine Quellstärkenreduzierung über die Bodensanierung für ausgewählte Bereiche favorisiert worden ist. Der Hauptquellbereich befindet sich auf der ehemaligen Entphenolung (Vorlagertanks, Destillation, Extraktion). [6]

Die Besonderheiten der hydrogeologischen und hydrodynamischen Randbedingungen am Standort Schwarze Pumpe fordern die Sanierung heraus. Aufgrund der großräumig eingestellten Wasserhaltungen nach Schließung und Flutung von Tagebauen Anfang der 90er Jahre kommt es zu einem Grundwasserwiederanstieg. Damit verbunden war die Drehung der Grundwasserfließrichtung von (Süd-) West auf Nordost innerhalb von 10 Jahren zu beachten. Die Wasserscheide befand bis zum Jahr 2000 im Osten des Werkgeländes und verlagerte sich bis 2013 in den Bereich der westlichen Werkgrenze. Die historische Strömung in Richtung der Vorflut (Spree) hat sich somit wieder ausgebildet. Die Gefährdungssituation hinsichtlich der abstromigen Schutzobjekte hat sich verstärkt, auch weil durch die Grundwasseranstieg ein größeres hydraulisches Gefälle zur Vorflut geschaffen wurde. Zusätzlich werden Schadstoffe aus der bisher ungesättigten Bodenzone mobilisiert und mit dem Grundwasser transportiert. Der mächtige und gut durchlässige Grundwasserleiter der Rinnenstruktur (Bahnsdorf-Blunoer Rinne) und der über Jahrzehnte erfolgte Schadstoffeintrag bedingen ein großes kontaminiertes Wasservolumen. Die Kontamination erstreckte sich im Mittel- und Westabstrom über das gesamte Werkgelände und in den Hauptquellen der Entphenolung und dessen Abstrom bis in eine Tiefe von 50-60 m. (vgl. Abbildung 2)

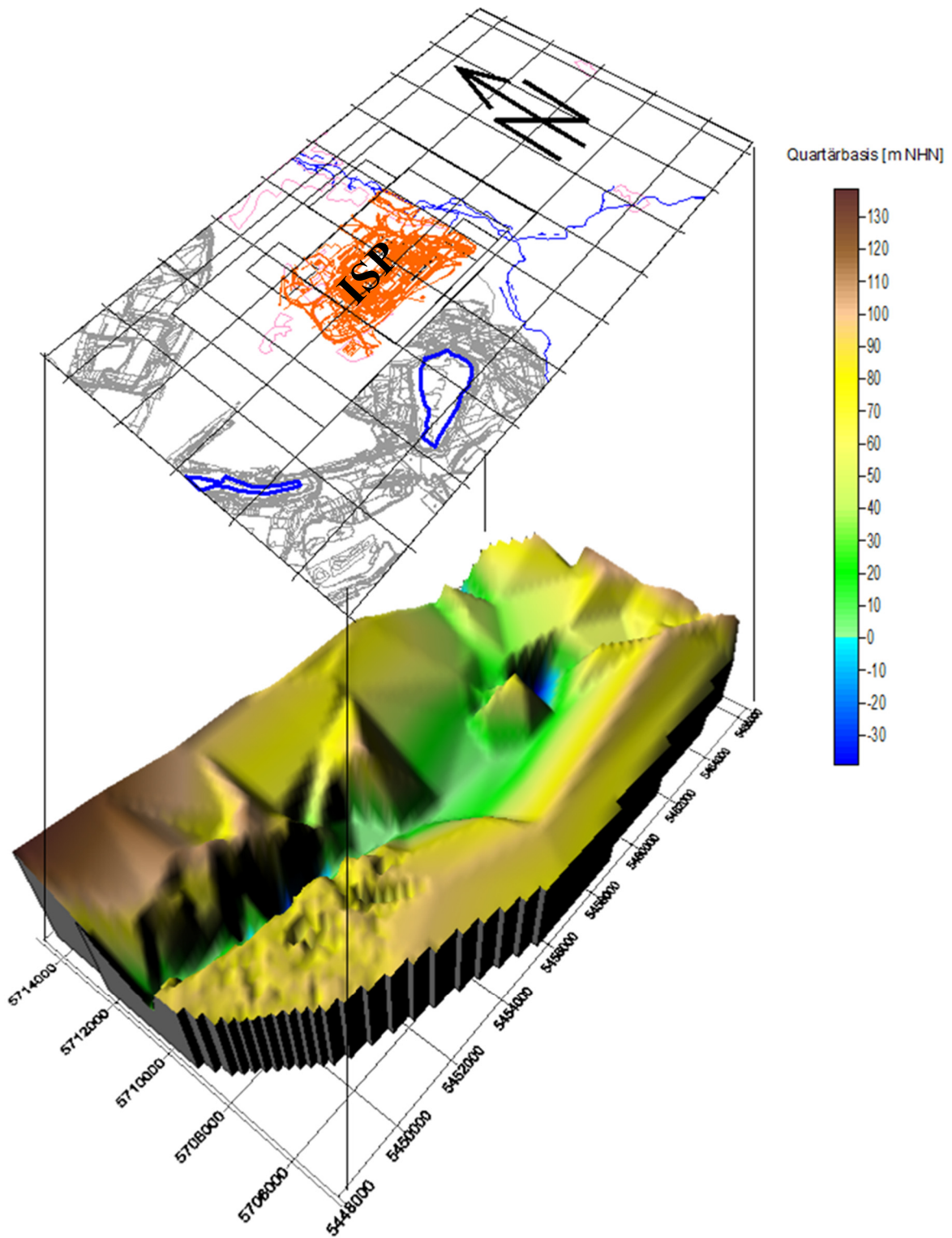


Abbildung 2: Strukturgeologie- Bahnsdorf-Blunoer Rinne unter dem Industriestandort Schwarze Pumpe [5]

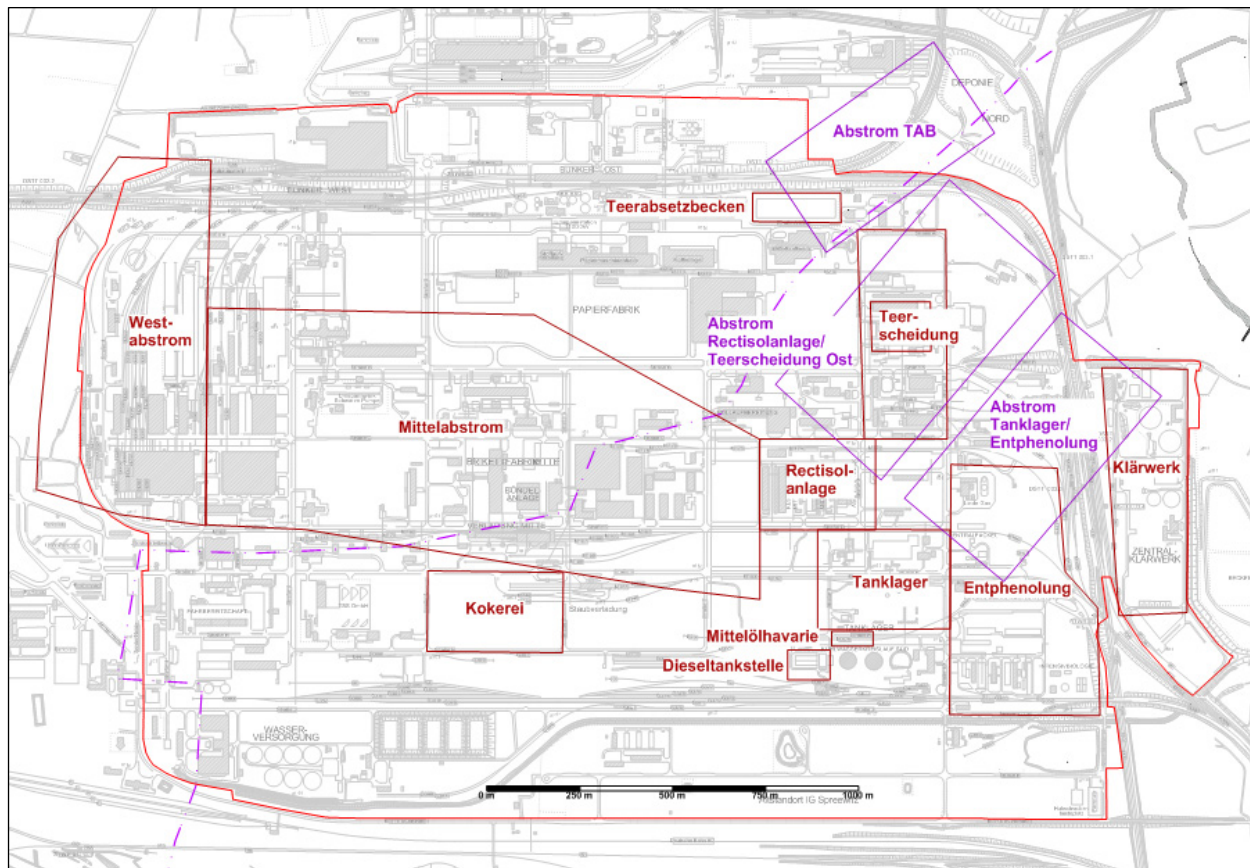


Abbildung 3: Kontaminationsbereiche auf dem Werkgelände Schwarze Pumpe für Boden und Grundwasser [7]

Die Grundwasserbelastungen im oberen Grundwasserleiter (bis ca. 20 m u. GOK) sind stark von den Bodenbelastungen und dessen Verteilung geprägt. In den tiefen Bereichen des mittleren (bis ca. 35 m u. GOK) sowie unteren Grundwasserleiter (40 bis 70 m u. GOK) findet hauptsächlich der advective Transport der gelösten Schadstoffe statt. Der Eintrag von Schadstoffen in die tieferen Grundwasserbereiche unterhalb des glS2-Geringleiters erfolgt über Fehlstellen im Bereich der Entphenolung und im Bereich der Teerscheidung Ost [5], [7].

### 3. Grundwasser- und Bodensanierung

In den vergangenen 30 Jahren haben auf dem Standort Schwarze Pumpe umfangreiche Sanierungsaktivitäten stattgefunden. Hier soll im Folgenden die jüngste und aufwändigste Bodensanierungsmaßnahme der LMBV mbH vorgestellt werden. Nach den Nachweisen der Effektivität [6] und der Verkürzung der Sanierungszeit mittels Pump&Treat wurde in 149 Spundwandkästen bis zum Grundwasserabschnitt in 14 m Tiefe der Boden ausgekoffert, on-site dekontaminiert und anschließend wieder eingebaut. Die Maßnahme „Quellstärkenreduzierung mittels Bodenaustausch“ (QMBA) begann nach der Sanierungsuntersuchung und Planungsphase im Jahr 2017 und konnte 2022 mit dem Ende des Tiefenaushubs und der vakuumthermischen Bodenbehandlung abgeschlossen werden. Insgesamt wurden in den Teilbereichen der Entphenolung (Vorlagertanks, Destillation, Extraktion) und der Teerscheidung Ost 311.000 m<sup>3</sup> Boden ausgetauscht und 285.584 t on-site in der Vakuumthermischen Reinigungsanlage (VTRA) dekontaminiert. Die behördlich vorgegebenen Abreinigungsgrade wurden dabei durchgehend eingehalten, teilweise deutlich übertroffen (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Durchschnittlicher Abreinigungsgrad für die Gesamtmenge der jeweiligen Schadstoffe die in der VTRA gereinigt wurden (links); Beispiel für die Reinigungsleistung der VTRA bei hohen Schadstoffkonzentrationen in mg/kg TS

Parameter [mg/kg]	Behördliche Vorgabe	Ergebnisse		$\Sigma$ BTEX [kg]	$\Sigma$ KW-Index C10-C40 [kg]	$\Sigma$ PAK [kg]	$\Sigma$ Alkylphenole [kg]
$\Sigma$ BTEX	99 %	99,93 %	VTRE-F-IN-50-260,5	2.000	9.500	690	500
KW C10-C40	95 %	97,80 %	VTRE-F-OUT-50-260,5	<0,70	150	9,3	3,8
			Reinigungsgrad	100 %	98,4%	98,7%	99,2%
$\Sigma$ PAK	90 %	96,65 %	VTRE-F-IN-52-275,3	2.900	7.200	860	1.700
$\Sigma$ Alkylphenole	90 %	98,50 %	VTRE-F-OUT-52-275,3	0,2	240	14	3,6
			Reinigungsgrad	99,99 %	96,7%	98,4%	99,8%

Der ausgekofferte und in die Vakuumthermische Reinigungseinheit (VTRE) transportierte Boden wurde chargenweise beprobt, sodass sich aus der Differenz der Input- und Output-Analysen die gereinigten Schadstoffmassen ergeben. Die Abbildung 4 zeigt den kumulierten Schadstoffaustrag der VTRE.

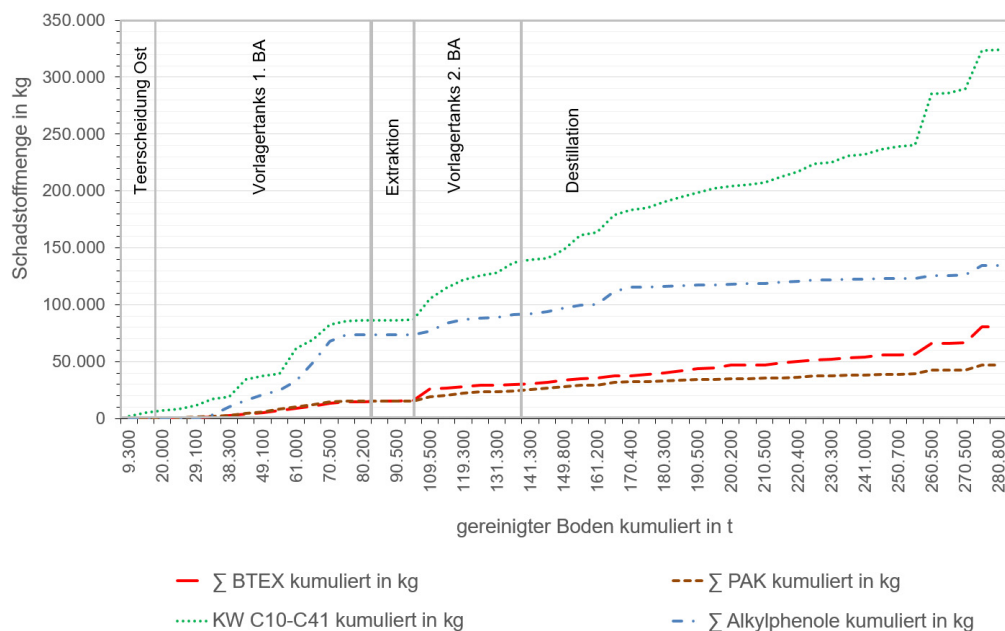


Abbildung 4: Kumulierter Schadstoffaustrag der Vakuumthermischen Reinigungseinheit für den Boden

Die Schadstoffreduzierung erfolgte nicht nur durch die VTRE, sondern ebenfalls durch eine der Maßnahme vorgelagerte Bodenluftabsaugung (als Arbeitsschutzmaßnahme), die statische Entwässerung des Bodens, die Absaugung der Hallenluft sowie innerhalb des Spundwandkastens (SWK). Zusätzlich wurde das Grundwasser in den Spundwandkästen abgepumpt und einer kontrollierten Abreinigung der am Standort etablierten Abwasserbehandlungsanlage zugeführt. Nachweislich wurden insgesamt 726.225 kg Schadstoff mit der QMBA Maßnahme entfernt.

Tabelle 2: Schadstoffaustrag der Gesamtmaßnahme (Quellstärkereduzierung mittels Bodenaustausch); \*gewichtetes arithmetisches Mittel; VTRE – Vakuumthermische Reinigungseinheit, GW – Grundwasser. SWK – Spundwandkasten, BOLA - Bodenluftabsaugung

	Benzol in Kg	Σ BTEX in Kg	Σ KW in Kg	Σ PAK in Kg	Σ Alkylphenole in Kg	Σ Leitschadstoffe in Kg
Boden VTRE *	1.430	80.635	324.209	46.975	134.230	586.049
GW (SWK) *	175	698	664	96	2.413	3.871
Stat. Entwässerung *	58	215	176	27	638	1.056
Hallenluft (Lagerhalle)		116.949				116.949
BOLA		18.300				18.300
<b>Gesamt</b>	<b>1.663</b>	<b>216.797</b>	<b>325.049</b>	<b>47.098</b>	<b>137.281</b>	<b>726.225</b>

Die wirtschaftliche und innerhalb der technischen Grenzen ausgelegte und erfolgreich durchgeführte Maßnahme ermöglichte eine umfassende Reduzierung der Quellstärke (vgl. Abbildung 5). Damit verbunden ist eine deutliche Verkürzung der nachlaufenden Sanierungsmaßnahmen und Unterstützung des mikrobiologischen Abbaus aufgrund der abnehmenden Schadstoffkonzentrationen. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Sickerwasserprognose 2018 [9] kann von einer Verkürzung der Elutionszeit für die Gruppen der BTEX und Alkylphenole von mindestens 60-80 Jahren für die Aerationzone der Aushubbereiche ausgegangen werden.

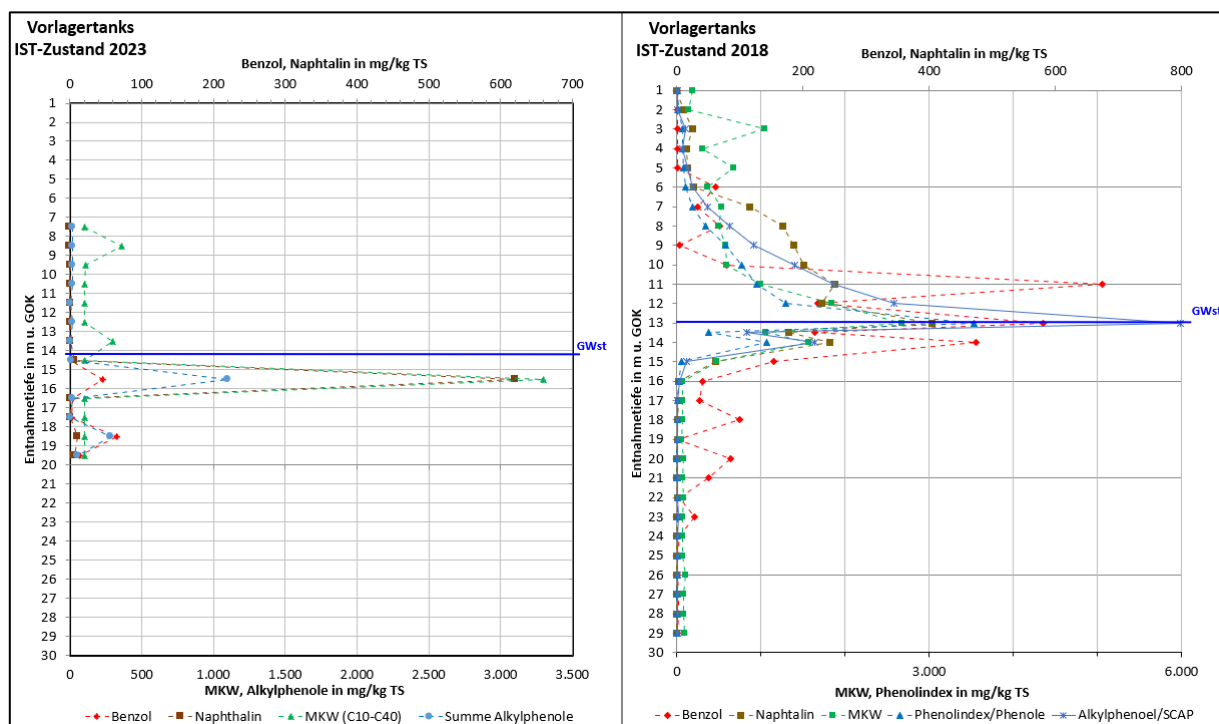


Abbildung 5: IST-Zustandsaufnahme vor der QMBA Maßnahme (rechts) und danach (links) am gleichen Ansatzpunkt im Sanierungsbereich Entphenolung – Vorlagertanks im Rahmen der Sickerwasserprognosen zur Erfolgskontrolle

Da die Randbereiche der Primärquellen weiterhin emittieren und eine Restkontamination auch unterhalb der Aushubbereiche mit hohen Schadstoffkonzentrationen verbleibt (vgl. Abbildung 5) ist eine fortlaufende Sanierung des Grundwassers im direkten Abstrom der Hauptquellen notwendig. Zusätzlich ist die aktuell laufende Abstomsicherung und Dekontamination des Grundwassers mittels Pump&Treat und Ableitung in die Abwasserbehandlungsanlage ABA 2 aufgrund der großflächigen Kontamination weiterhin zu betreiben. Mit den etablierten Haltungsbrunnen und Fördermessstellen (vgl. Abbildung 6) wurden dem Grundwasser in den vergangenen Jahren 2017-2023 jährlich durchschnittlich ca. 3,9 t BTEX und ca. 15,3 t Alkylphenole dauerhaft entzogen.

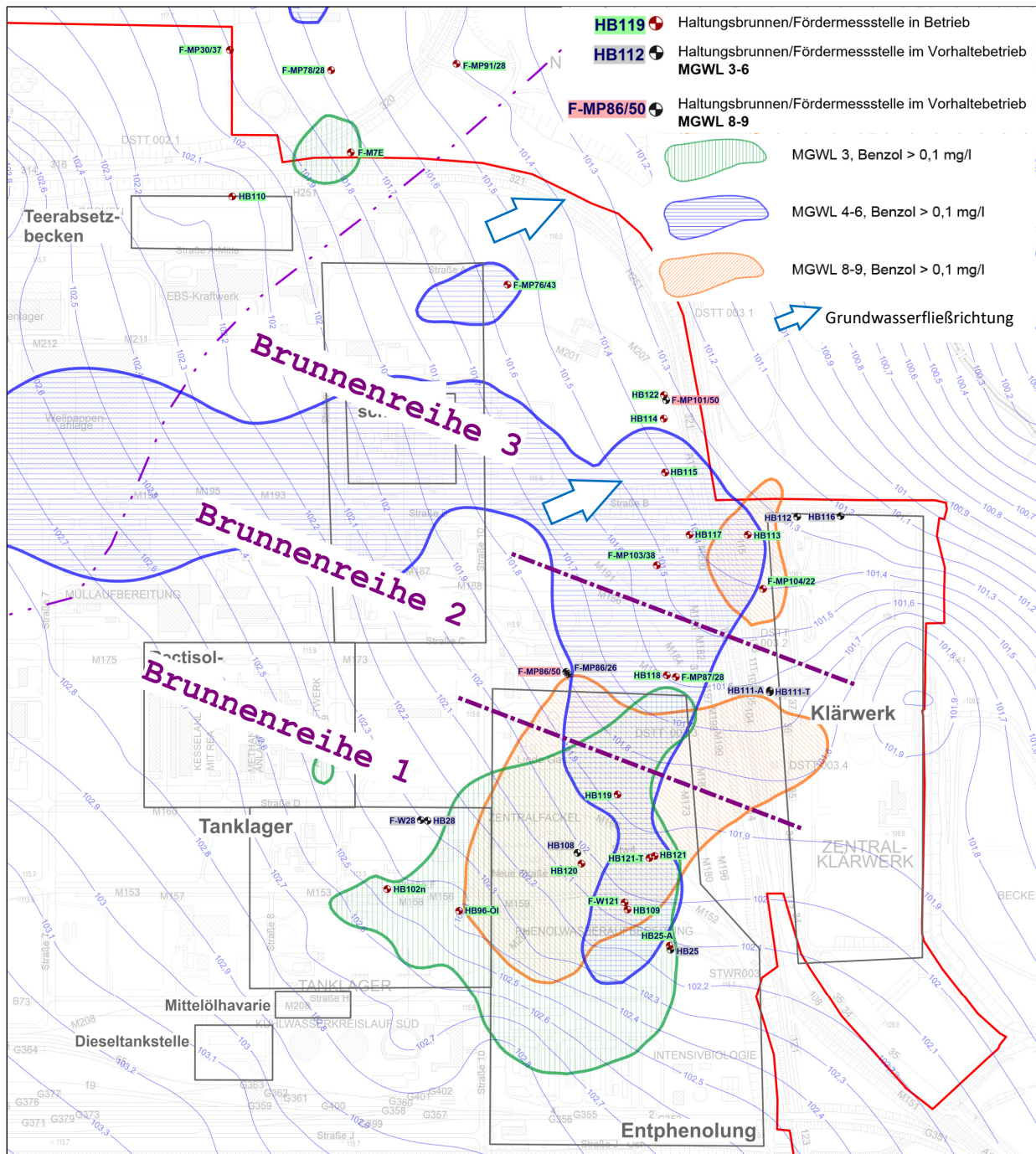


Abbildung 6: Aktuelle Brunnenkonfiguration der Grundwassersanierung/-sicherung auf dem Werkgelände Schwarze Pumpe mit Darstellung der teufenzonierten Grundwasserbelastung durch Benzol > 0,1 mg/l [11]

## 4. Neuordnung der Sanierung

Die langfristige und bereits zurückliegende Sanierung über bisher ein bis zwei Generationen hat zwar zu einer deutlichen Verbesserung der Kontaminationssituation geführt, jedoch ist für die zukünftige effektive und effiziente Sanierung eine Übersichtlichkeit und Transparenz in den Planungs- und Genehmigungsunterlagen geboten. Alle Arbeiten zur Boden- und Grundwasseranierung waren unter strikter Berücksichtigung des BBodSchG im Rahmen der bergrechtlichen Genehmigung neu zu ordnen, mittel- und langfristig neu zu planen inkl. Aufarbeitung des Kenntnisstands zur Vielzahl der Altlastenverdachtsflächen und Primärquellen auf dem Werkgelände.

Um die für beide Bundesländer (Brandenburg und Sachsen) vorliegenden Abschlussbetriebspläne, Sonderbetriebspläne inkl. Ergänzungen und die bergrechtlichen Vorgaben der Sanierungszielwerte zu vereinheitlichen, wurde ein länderübergreifender Abschlussbetriebsplan für die Grundwasser- und Bodensanierung am Standort Schwarze Pumpe erstellt. Mit den Zulassungen vom 23.02.2024 ist dieser verbindlich und der inkludierte Sanierungsplan umzusetzen. [4]

Im Zuge der Vereinheitlichung und fachlichen Herleitung von Sanierungszielwerten (SZW) für das Grundwasser unter Einhaltung der behördlich vorgegebenen Zielwerte an den abstromigen Schutzobjekten, wurden verschiedene fachspezifische Untersuchungen im Sinne des Mehrmethodenansatzes durchgeführt:

Dazu gehörten u.a.:

- Isotopenuntersuchungen zur Genese der Grundwasseranteile,
- Untersuchungen zu Druckpotentialen in Grundwasserleitern,
- Feststellung aufsteigender und absteigender Gradienten,
- Mehrjährige Messung der Interaktion von Grundwasser/Oberflächenwasser,
- Geophysikalische Untersuchungen zu Verbreitungsgrenzen von Geringleitern,
- mehrere Sickerwasserprognose im Hauptquellbereich vor und nach der QMBA-Maßnahme,
- Laborative Untersuchungen zur Ermittlung von nativen konzentrationsabhängigen Migrationsparametern für die NA-Potenzialermittlung.

Über eine alternative Herangehensweise zu dem am Standort etablierten komplexen 3D-Grundwasserströmungs- und Schadstofftransportmodell SCHWAP (u.a [5]) wurden die konzeptionelle Modellvorstellung, sowie die ablaufenden Prozesse und Wechselwirkungen sehr transparent gemacht. Dies erfolgte durch die fachgerechte Verknüpfung frei programmierter analytischer Lösungen mit offenen, transparenten Microsofttools. Durch diese Bearbeitungsmethode und mit diesem Ansatz war es möglich die in Abbildung 7 dargestellten Sanierungszielwerte für Benzol und Summe Alkylphenole (18 Einzelverbindungen) länderübergreifend, behördlich verbindlich, zu harmonisieren.

Auf Basis der Sanierungszielwerte erfolgt eine laufende Optimierung der Pump&Treat Maßnahme. Hierfür werden quartalsweise die Monitoringergebnisse in Bezug auf die Kontrollprofile und Haltungsbrunnen sowie Fördermessstellen anhand des statischen, dynamischen und hydraulischen Kriteriums bewertet.

Dynamisches Kriterium: Im Brunnen: Verlauf der Schadstoffkonzentration in den letzten 2 Jahren, der Entnahmemenge und der Fracht; Beurteilung der Trendentwicklung und der Ursachen

Statisches Kriterium: Der Wert (0,75\*SZW) ist im Brunnen dauerhaft – auch bei geringen Förderraten – zu erreichen

Hydraulisches Kriterium:

- die gegenseitige Beeinflussung der umliegenden Haltungsbrunnen,
- die Prüfung der Fassungsgebiete bei unterschiedlichen Fördermengen und Kombinationen der Haltungsbrunnen,
- die Auswirkungen des angepassten Förderregimes (auch Vorhaltebetrieb) auf die Strombahnen und Fließgeschwindigkeiten im Umfeld der Brunnen.

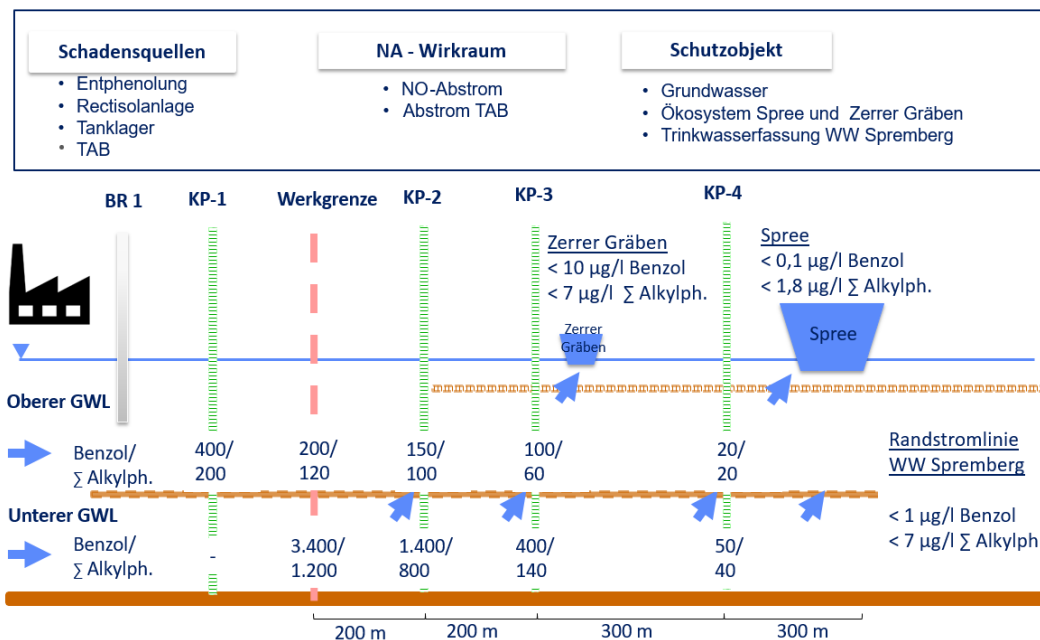


Abbildung 7: Sanierungszielwerte im Grundwasser und Zielwerte an den jeweiligen Schutzobjekten für Benzol und Summe Alkylphenole in µg/l an den etablierten Kontrollprofilen (KP) auf dem Werkgelände und abstromig bis zur Spree [12]

Die Aufarbeitung und Neukonzipierung der Genehmigungs- und Planungsunterlagen hatten u.a. eine Gefährdungsabschätzung und die Ableitung des aktuellen Handlungsbedarfs zum Inhalt. Der Umfang der Kontamination und die Vielzahl an ALVF haben dazu geführt, dass es am Standort Schwarze Pumpe für die jeweiligen industriehistorischen Altlasten unterschiedliche Bearbeitungstiefen gemäß BBodSchG gibt. Um diesem Sachverhalt zu begegnen wurden s.g. Arbeitspläne für Boden und Grundwasser eingeführt. [4]

Der Arbeitsplan beinhaltet die durchgeführten bzw. durchzuführenden Untersuchungen und Maßnahmen, welche sich am BBodSchG sowie der zugehörigen Verordnung orientieren. Er dient als Grundlage für die Beantragung der Beendigung der Bergaufsicht und enthält u.a. die folgenden Punkte (vgl. Abbildung 8):

- Zuordnung der ALVF zu einem industriehistorischen Bereich (z.B. Entphenolung) sowie Darstellung der aktuellen Grundwasserkontamination und Gefährdungsabschätzung;
- Zusammenstellung der historischen Gegebenheiten (Bauwerk, Leitung, Havarie, Lager etc.);
- Zusammenstellung der bisherigen Untersuchungen und deren Ergebnisse (OU, DU, SU);
- Zusammenstellung der bisherigen/laufenden Sanierung;
- Darstellung der aktuellen Grundwasserkontamination und Gefährdungsabschätzung unter Berücksichtigung der laufenden Sanierungsmaßnahmen;
- Beschreibung der notwendigen Untersuchungen (Art, Anzahl, Lage, Zielstellung) als funktionale Aufgabenstellung;
- Erweiterte Gefährdungsabschätzung und Ableitung der weiteren Maßnahmen entsprechend den zusammengestellten Dokumenten und Ergebnisse der Untersuchungen;



- Je nach Einschätzung der Gefährdung erfolgt eine Sanierungsuntersuchung mit ggf. anschließender Sanierung, falls eine Sanierungsvariante als verhältnismäßig herausgearbeitet wird.

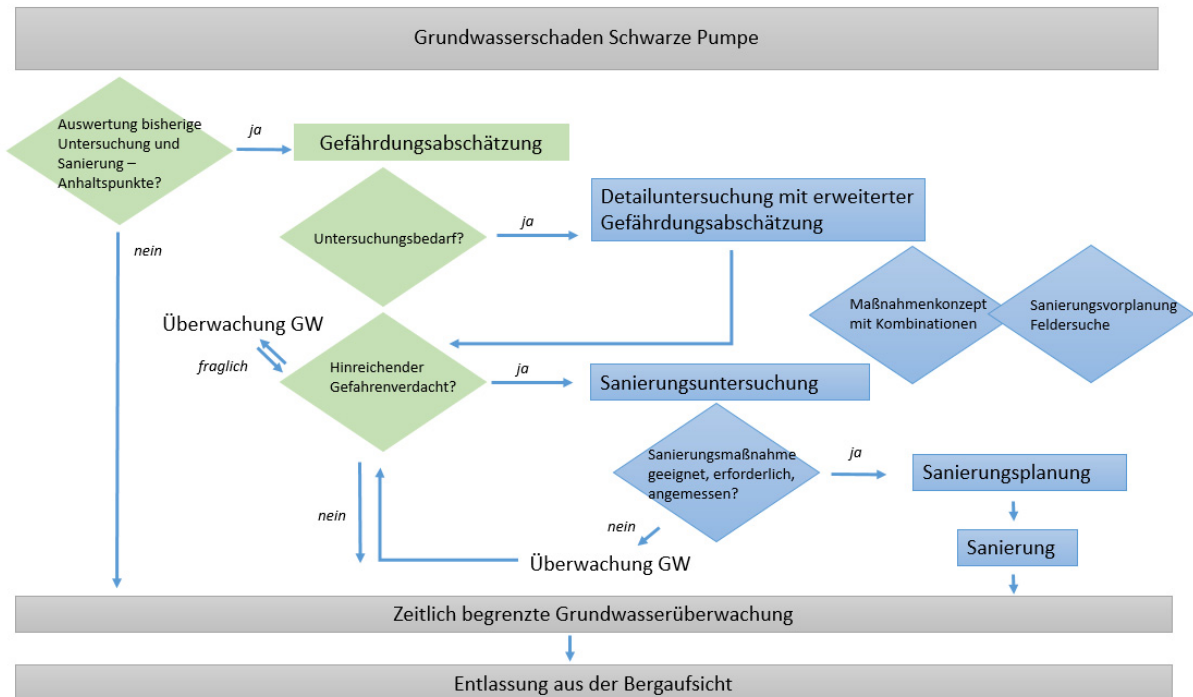


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Arbeitsplans für den Grundwasserschaden am Standort Schwarze Pumpe, bereits im Rahmen des ABP erfolgt für gesamten Grundwasserschaden (links) nach SCHÖEBEL, U. in [4]

In den letzten Jahren konnten auf dem Industriestandort zahlreiche infrastrukturelle Entwicklungen fertig gestellt werden. Dazu zählen u.a.:

- Errichtung der Abwasserbehandlungsanlage 2 (vgl. Abbildung 9)
- Errichtung eines Wasserwerkes (vgl. Abbildung 9)
- Zahlreiche wichtige Medien (Telekommunikation, ONTRAS-Leitung, 30-KV-Leitung, Wasser-, Prozesswasser und Abwasserringleitungen)

Im gleichen Zuge dieser Entwicklungen entstand u.a. ein EBS-Kraftwerk, die neue Papiermaschine, das Innovationszentrum Wasser.

Die derzeit hohe Nachfrage für die Nachnutzung von Flächen im Industriepark Schwarze Pumpe führt dazu, dass die Beendigung der Bergaufsicht für derartige Teilflächen teilweise sehr rasch erfolgen muss. Dieses Vorgehen konnte bereits für die Fläche der VTRE gemeinsam mit dem sächsischen Oberbergamt (OBA) erfolgreich unter Anwendung des Abschlussbetriebsplans und der darin enthaltenen Vorgehensweise nachgewiesen werden. Somit steht der Nachnutzung dieser Fläche und auf ihr der hoch modernen Sanierungsanlage aus bergrechtlicher Sicht nichts entgegen.

Dieser Zeitdruck für die bergrechtliche Freigabe besteht rezent weiter, weshalb die Bergämter, die LMBV mit ihren Gutachtern ganz eng mit den Standortverantwortlichen zusammen agiert.



Abbildung 9: Abwasserbehandlungsanlage mit ZV ISP

Abwasserbehandlungsanlage 2 mit Wasserwerk [13]

## 5. Literatur

- [1] Wolle, Stefan (31.01.2020): Energie für die Zukunft Das Kombinat „Schwarze Pumpe“ und die sozialistische Wohnstadt Hoyerswerda
- [2] LMBV mbH Länderbereich Ostsachsen (06.06.2000): Abschlussbetriebsplan „Boden und Grundwasser Werkgelände Schwarze Pumpe“, Az.: 2588/00, Ho-yerswerda, zugelassen am 28.03.2002
- [3] Gunther Markwardt/Stefan Zundel, Strukturwandel in der Lausitz. Eine wissenschaftliche Zwischenbilanz, in: Ifo Institut, Ifo Dresden berichtet 3/2017, S. 17 – 22; Julian Schwartzkopff/Sabrina Schulz, Zukunftsperspektiven für die Lausitz. Was kommt nach der Kohle?, 2015, [www.e3g.org/library\\_asset/zukunftsperspektiven-fur-die-lausitz](http://www.e3g.org/library_asset/zukunftsperspektiven-fur-die-lausitz)
- [4] 4. Änderung/Ergänzung zum Abschlussbetriebsplan „Boden und Grundwasser Werkgelände Schwarze Pumpe, Teil Sachsen und Änderung/Ergänzung zum Abschlussbetriebsplan „Grundwasser Werkgelände Schwarze Pumpe Teil Brandenburg“, Zulassung vom 23.02.2024
- [5] UBV GmbH (30.11.2006.): Applikation des Strömungs- und Schadstofftransportmodells SCHWAP06 zur Optimierung des Sanierungskonzeptes Schwarze Pumpe, UBV
- [6] Beerbalk, H.-D.: Präzisierung des Sanierungskonzeptes 2006 - Bodensanierung Quellbereiche Büro Dr. Beerbalk, Berlin, 25.07.2006
- [7] CDM Smith Consult GmbH (23.10.2014.): Zwischenbericht zur Erkundung hydrogeologisch relevanter Strukturen im Osten des Werkgeländes, Berlin
- [8] GEOS Freiberg (10.01.2006): Grundwasser Schwarze Pumpe „Sickerwasserprognose“
- [9] BGD ECOSAX GmbH (04.03.2020): Bericht für Wiederholung der Sickerwasser-prognose im Bereich der Entphenolung – Vorlagertanks am Ansatzpunkt P4/04S
- [10] BGD Ecosax (30.01.2024): Durchführung von Erfolgskontroll-Linerbohrungen im Bereich der QMBA der Entphenolung mit Analytik und Sickerwasserprognose
- [11] CDM Smith SE (2024): Jahresbericht 2023 Monitoring Grundwassersanierung Schwarze Pumpe
- [12] Umweltbüro GmbH Vogtland (25.01.2021): Gutachten Ableitung vorläufiger Sanierungszielwerte Schwarze Pumpe
- [13] Schöbel,U., Peine, R. Daffner, Th.: Schwarze Pumpe – Ein Industriestandort mit Vergangenheit und Zukunft, Fachkonferenz „Gesellschaft im Wandel mit Wasser und Klima“ 22.09.2022 Bad Elster, ISSN 1611-5627

# Umgang mit Asbest im Stoffkreislauf – die neue LAGA M23 – Fluch oder Segen?

Dipl.-Ing. Falk Fabian<sup>1</sup>

## Inhalt

1. Hintergrund .....	149
2. Überarbeitung der LAGA Mitteilung 23.....	150
3. Fazit.....	157
4. Literaturangaben .....	159

## 1. Hintergrund

Der hochwertigen Bewirtschaftung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen als einem der größten Abfallströme kommt eine tragende Rolle zu, insbesondere im Rahmen der Circular Economy. Mit einer jährlichen Menge von ca. 222 Mio. t/a macht dieser Abfallstrom weiterhin über 50 % am gesamten jährlichen Abfallaufkommen auf [16]. Die Beseitigungsquote von knapp 11 % sowie die Verwertungsquote von 89 % im Jahr 2021 bieten noch keine Benchmarks dafür, ob qualitativ oder quantitativ alle Potentiale einer hochwertigen Verwertung ausgeschöpft wurden. Das Zirkuläre Bauen muss durch den Einsatz Sekundärer Rohstoffe, insbesondere innerhalb der mineralischen Bereiche, weitere Potentiale erschließen. Neben dem Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im R-Beton [20] sind auch weitere mineralische Sekundärstoffpotentiale, z. B. wiedergewonnene Gesteinskörnungen aus der Behandlung teerhaltigen Straßenaufbruchs oder der Gewinnung von Kies, Schotter und Sanden aus Bodenwaschanlagen, denkbar.

Hierfür besitzt auch die zum 01.08.2023 nach über 17 Jahren aufreibender Diskussionen und fachlichen Entwicklungen in Kraft getretene Ersatzbaustoffverordnung [6] eine wichtige Schlüsselfunktion, die zentral für eine wirksame und verlässliche Bewirtschaftung von mineralischen Abfällen als Sekundärrohstoffe ist. Das darin integrierte Baustoffrecycling als einem für das Bauwesen dominierenden Stoffstrom soll im besten Fall dazu führen, die wiedergewonnene und aufbereitete Baustoff(grund)substanz direkt wieder in den Wertstoffkreislauf, und dies in mehrfachen Nutzungszyklen, gelangen zu lassen. Daneben bleiben die bei Baumaßnahmen anfallende Bodenmaterialien eines der mengenmäßig größten Posten, die soweit eine wirksame Vermeidung nicht erfolgen kann, einer möglichst hochwertigen Verwertung, d.h. einer bautechnischen Verwertung zuzuführen.

Eine systembedingte Grenze besitzt das System jedoch. Sowohl beim Baustoffrecycling als auch bei der die Verwertung von Bodenmaterialien muss die Anreicherung von Schadstoffen im Wertstoffkreislauf wirksam verhindert und im idealen Fall bei der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder im Recyclingprozess Schadstoffe ausschleusen bzw. aushalten oder unschädlich machen. Bei einem historisch

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing. Falk Fabian, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Referat 26 - Kreislaufwirtschaft: Infrastruktur, biogene Wertstoffe, Baustoff-Recycling, +49(0)711 926-2673, falk.fabian@um.bwl.de

bekanntem Schadstoff im Bausektor namens Asbest führt dieses unweigerlich zu erheblichen Herausforderungen.

Das Potential der zurückliegenden Anwendungen und Verwendungen von asbesthaltigen Baustoffen wurde auch im Rahmen des geführten Nationalen Asbestdialoges [11] nochmal deutlich. Erschwerend hinzu kommt, dass Asbest durch seine materialtechnischen Eigenschaften bisher keine in der Praxis am Markt verfügbaren Techniken und Möglichkeiten bietet, es innerhalb eines Recyclingprozesses nachweislich zu zerstören bzw. durch Separation in einem Recyclingprozess auszuhalten. Somit wird deutlich, dass die wirksame Ausschleusung von Asbest aus den zurückliegenden Anwendungen im Bauwerks- und Gebäudebereich eine zentrale Bedeutung für die Nutzbarmachung von mineralischen Sekundärrohstoffen besitzt.

## 2. Überarbeitung der LAGA Mitteilung 23

Die Schlüsselfrage wie es gelingen kann, dass die Asbestthematik nicht zu einem Baustoffrecyclinggrab wird, beschäftigte auch die politischen und technischen Gremien seit geraumer Zeit. In diesem Kontext wurde durch die Umweltminister\*innen und Umweltsenator\*innen der Länder im Beschluss zur 92. Sitzung der Umweltministerkonferenz (UMK) im Mai 2019 [21] unter TOP 48 mit Sorge festgestellt, dass bei pauschalierendem Herangehen an das Problem das Ziel der Kreislaufwirtschaft beim Bauschuttrecycling in Frage gestellt wird. Hierbei wurden Lösungen gefordert, die eine Kreislaufwirtschaft und den dazu notwendigen Fortbestand des Bauschuttrecyclings ermöglichen, mit denen jedoch gleichzeitig die Ausschleusung von Asbest sichergestellt wird.

Dahingehend wurde die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) in 2019 beauftragt einen länderübergreifenden Erfahrungsaustausch durchzuführen und zum Abschluss der Arbeiten zu berichten. Die LAGA hat hierzu in 2020 einen Bericht zum Erfahrungsaustausch von asbesthaltigen Bau- und Abbruchabfällen [13] veröffentlicht und im Kontext dieser Ergebnisse unter Maßgabe des vorgenannten UMK-Beschlusses einen LAGA Ad-hoc Ausschuss zur Überarbeitung der LAGA Mitteilung 23 „Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle“ eingerichtet. Der Ad-hoc Ausschuss hat diesbezüglich im Zeitraum Mai 2020 bis zum November 2022 eine Überarbeitung der LAGA M 23 abschließen können, die eine Verbändeanhörung im April bis Juni 2022 beinhaltete.

Diese Überarbeitung der LAGA M 23 konnte nach den zugehörigen Gremienzustimmungen über den Abfalltechnikausschuss (ATA) und Abfallrechausschuss (ARA) sowie der Vollversammlung der LAGA mit UMK-Beschluss Nr. 19/2023 vom 5.5.2023 [22] mit Datum am 8.5.2023 auf der LAGA Seite veröffentlicht werden.

Der Lösungsansatz, der der LAGA M 23 aus dem bestehenden Rechtsrahmen zu Grunde liegt, ist das integrierte Säulenkonzept, das über die Säule „Erkundung vor Abbruch – Selektiver Rückbau“, der Säule „Abfalleinstufung – Asbestfreiheit“ bis hin zur Säule „Inputbasierter Ansatz der Recyclinganlage“ systematisch, anhand der gesamten Systemkette des Bauschuttrecyclings dazu führt, dass nur asbestfreie Baustoffrecyclingmaterialien in Verkehr gebracht werden. Die Systemskizze in Abb. 1 soll die grundsätzliche Vorgehensweise mit den wichtigsten Rahmenbedingungen anschaulich darstellen.

Die LAGA M 23 enthält neben den grundsätzlichen Rahmenbedingungen konkretisierte Fallgestaltungen und Maßgaben, die die vorgenannten Säulen definieren und das Vorgehen im Umgang und der Entsorgung von asbesthaltigen Abfällen ausführlich für die am Entsorgungsvorgang Beteiligten, einschließlich des Abfallanfalls, beschreiben.

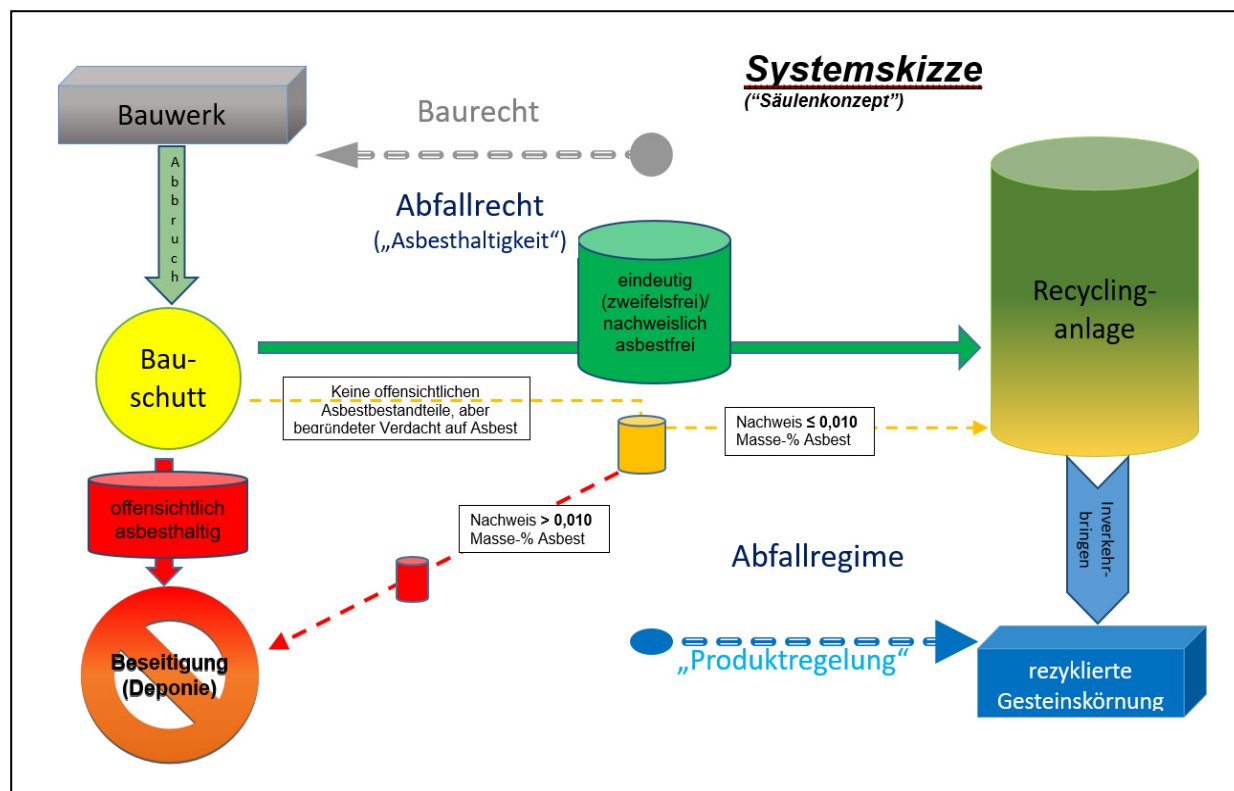


Abb. 1: Systemskizze zur Darstellung der Systemschnittstellen als Lösungsansatz für die wirksame Ausschleusung von asbesthaltigen Baustoffen im Bauschuttrecycling

## 2.1 Säule „Erkundung vor Abbruch – Selektiver Rückbau“

Die erste Säule in dem System findet ihr Fundament faktisch vor der Entstehung der Abfälle, nicht zuletzt im Kontext des nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) [4] vorgegebenen Rahmen nach § 1 Abs. 1 i.V.m. § 3 KrWG, das den Zweck hat, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen.

Da die Vorrangigkeit von Maßnahmen zur Kreislaufwirtschaft bzw. die Hochwertigkeit der jeweiligen Hierarchiestufe von unvermeidbar entstehenden Abfällen nach § 6 Abs. 2 KrWG erfordert, bei der Auswahl diejenigen Maßnahmen zu wählen, die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet, kann abgeleitet werden, dass das Recycling bereits in der Vorbereitung zum Abbruch eines Bauwerkes oder Gebäudes maßgeblich beginnt.

Um ein hochwertige Verwertung von Bau – und Abbruchabfällen unter den o.g. Gesichtspunkten zu erzielen, muss somit vor der faktischen Entstehung der Abfälle klar sein, was für Abfälle entstehen können und wie diese in Folge ordnungs- bzw. bestimmungsgemäß zu bewirtschaften sind, im Hinblick auf Abfälle, die potentiell Asbest enthalten können, ohnehin durch die allein beim Abbruch erforderlichen arbeitsschutztechnischen Erfordernisse.

Auch wenn die ausdrückliche Pflicht zur Erkundung erst mit der Novelle der Gefahrstoffverordnung justiziabel geschaltet wird, ist die Systematik einer hinreichenden Planung der Entstehung der Abfälle und der sich daraus ergebenden Auswahl der Verwertungsmaßnahme, die eklatant durch den

Entstehungsprozess der Abfälle mitbestimmt wird, integrierter Bestandteil des o.g. Kreislaufwirtschaftsgebotes.

Baden-Württemberg hat dieser Maßgabe innerhalb seines Landeskreislaufwirtschaftsgesetzes (LKreiWiG) [1] seit 31.12.2020 durch das darin in § 3 Abs. 4 LKreiWiG geforderte Abfallverwertungskonzept bei baurechtlich verfahrenspflichtigen Bauvorhaben Ausdruck verliehen. Hierbei wurden zur Sicherstellung der Anforderungen des übergeordneten Zieles der Vermeidung und der hochwertigen Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen nach §§ 6,7 KrWG, insbesondere zum Thema Asbest die Schadstofferkundung (Rückbaukonzept), die getrennte Erfassung, insbesondere schadstoffhaltiger Bauteile, von Bau- und Abbruchabfällen sowie dem damit gebotenen selektiven/ geordneter Rückbau als nach dem Stand der Technik vorhandene Maßnahmen vorausgesetzt. Diese Maßnahmen sind somit nicht nur als geeignet, sondern als geboten verankert, soweit Bau- und Abbruchabfälle zur Bewirtschaftung anfallen können.

Hierzu wurden Formblätter zur Erfüllung der Anforderungen an das Abfallverwertungskonzept entwickelt und bereitgestellt [19], die insbesondere den Asbestfokus bei der Schadstoffbetrachtung explizit mit aufführen. So ist zum Beispiel beim Abbruch von Gebäuden oder Gebäudeteilen anzugeben, ob mit der Errichtung des Bauwerks bereits vor dem 31.10.1993 begonnen wurde, da somit nicht ausgeschlossen werden kann, dass Asbest zum Einsatz gekommen ist. Dieses Datum entspricht auch genau den Maßgaben, den die novellierte EU-Asbestrichtlinie [17] im Artikel 1 Nr. 9 adressiert hat. Dieser beinhaltet eine ausdrückliche Ermittlungspflicht für das potentielle Vorhandensein von Asbest vor Beginn von Abbruch-, Instandhaltungs- oder Renovierungsarbeiten in Betriebsräumen, die vor dem Inkrafttreten des Asbestverwendungsverbotes des jeweiligen Mitgliedstaates gebaut wurden. Diese Richtlinie ist durch die Mitgliedstaaten bis 21.12.2025 in nationales Recht umzusetzen.

Die Umsetzung des Abfallverwertungskonzeptes in Baden-Württemberg hat sich trotz anfänglicher Skepsis etabliert. Selbst der Verband der Bauwirtschaft BW hat sich geäußert, dass es Sinn macht, sich frühzeitig mit einem Abfallkonzept zu beschäftigen. „Das kostet Geld, aber rentiert sich in aller Regel“. Man gebe das Geld nur früher aus – und somit besser und kalkulierbarer als bei einer teureren Entsorgung der Abfälle, insbesondere, wenn diese beseitigt werden müssen.

Aus diesen Erwägungen heraus ist es aus Sicht des Autors nur bedingt erforderlich, im Baurecht substantielle Verpflichtungen zur Schadstofferkundung an Gebäuden oder Bauwerken einzufordern, wenn doch der anlassbedingte Zusammenhang mit der unvermeidbaren Entstehung der Abfälle und der zugehörigen Planungen der technisch-organisatorischen Maßnahmen im Vorfeld der Entstehung zur Gewährleistung einer möglichst hochwertigen Verwertung von Abfällen besteht. Die Form der Abfallentstehung ist dabei substantiell („selektiver Rückbau“).

Die Anforderung eines Abfallverwertungs- bzw. Entsorgungskonzeptes ist jedoch anlassbedingt mit bzw. vor der Entstehung von Abfällen abfallrechtlich als geboten zu sehen. Insofern bedarf es nur in diesem Zusammenhang einer Schadstofferkundung vor dem Abbruch des Gebäudes oder des Bauwerkes.

Der bisherige Referentenentwurf der Novelle zur Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) vom 3.3.2023 [12] enthält nach wie vor eine neue Regelung in § 5a, die anlassbedingte Informations- und Mitwirkungspflichten von gewerblichen wie privaten Bauherren im Hinblick auf Asbestbelastungen vorsieht, insbesondere bei Tätigkeiten an baulichen oder technischen Anlagen, durch die Gefahrstoffe freigesetzt werden können.

Hiermit ist aus Sicht des Autors eine geeignete rechtliche Schnittstelle aufgegriffen worden, die den Grundsatz einer hochwertigen, ressourcenschonenden und vor allem umweltverträglichen Bewirtschaftung

von Bau- und Abbruchabfällen im Kontext von Asbestbelastungen sicherstellt und somit eine wesentliche Leitplanke für den abfallrechtlichen Umgang mit entsprechenden Abfällen, so wie es in der LAGA M 23 konkretisiert wurde, bildet.

Die vorgesehene Regelung ist nicht nur konsequent, sondern notwendig, da mögliche Gefährdungen nicht nur denjenigen treffen, der die Abfälle faktisch erzeugt, sondern auch alle diejenigen danach, die den Umgang und die Entsorgungskette der Bau- und Abbruchabfälle realisieren. Aus diesseitiger Sicht ist die bereits in der LAGA M 23 verankerte Dokumentationspflicht der Asbesthaltigkeit bzw. der Asbestfreiheit für die Entsorgungswege ein folgerichtiges Instrument zur Sicherstellung, dass keine nachteiligen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt hervorgerufen werden können. Dies steht auch im Einklang mit den Vorgaben der novellierten Asbestrichtlinie der EU [17].

Im Hinblick auf die praxisnahe Umsetzung sowohl für die Schadstofferkundung von asbesthaltigen Materialien und Baustoffen als auch zu entsprechenden Maßnahmen der Getrennthaltung einschließlich des selektiven Rückbaus bieten einschlägige Regelwerke, wie z. B. VDI-Richtlinien ([23], [24], [25], [26], [27]) sowie verschiedene Verfahrensanleitungen und Arbeitshilfen aus technischen Bereichen etablierte Hilfestellungen. Aus diesem Aspekt heraus bedarf es hier einfach einer konsequenten Umsetzung bei der Abbruchplanung und allen darauf ausgerichteten Maßnahmen. Strategisch gerichtete Maßnahmen wie verpflichtende Abfallverwertungs- bzw. Entsorgungskonzepte können diese Aspekte weiter unterstützen.

## 2.2 Säule „Abfalleinstufung – Asbestfreiheit“

Die zweite Säule als zentrale Bedingung im Gesamtsystem ergibt sich in der Bewertung der Asbesthaltigkeit bei der Abfalleinstufung und somit auch im Zusammenhang mit dem Ausschleusungsgebot von asbesthaltigen Bau- und Abbruchabfällen aus dem Wertstoffkreislauf bzw. dem Verwertungsverbot asbesthaltiger Abfälle. Eine zentrale Fragestellung ergibt sich hierbei aus der Abgrenzung asbestfreier Bau- und Abbruchabfälle.

Zunächst ist durch die etablierte Harmonisierung der chemikalien- und der abfallrechtlichen Anforderungen die Einstufung der Gefährlichkeit von asbesthaltigen Bau- und Abbruchabfällen ab 0,1 Masse-% Asbestgehalt unstrittig.

Nach dem Bericht des Erfahrungsaustausches „Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen mit geringen Asbestgehalten“ der LAGA [13] wird empfohlen, Bau- u. Abbruchabfälle mit geringen, d.h. deutlich weniger als 0,1 Masse-% Asbestgehalt als „nicht gefährlicher“ Abfall mit dem Zusatz „enthält geringfügig Asbestbestandteile“ zu kennzeichnen. Davon unbenommen gilt für diese Abfälle ein Verwertungsverbot und somit die Pflicht derartige Abfälle mangels derzeitiger verfügbarer Behandlungs- oder Entfrachtungstechniken einer Beseitigung, respektive einer Deponierung, zuzuführen.

Damit kommt der Bewertung der Asbestfreiheit eines Bau- und Abbruchabfalles als Voraussetzung einer sekundärrohstofflichen Verwertung dieser Abfälle, insbesondere einer Zuführung ins Recycling, die entscheidende Bedeutung zum Fortbestand des Bauschuttrecyclings zu.

Hierzu muss der im Nationalen Asbestdialog geführten Ideologie einer faserfreien Bedingung, nicht zuletzt aus dem Rechtsstattprinzip des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes eine klare Absage erteilt werden. Der Beitrag soll nicht umfassend den Zusammenhang aufzeigen, jedoch auf den Bewertungsansatz der Gefahrstoffmerkmale von Asbest verweisen, der grundsätzlich einen risikobasierten Ansatz verfolgt.

Dieser risikobasierte Ansatz spiegelt sich innerhalb der LAGA M 23 wieder, auch wenn hier die Festlegung eines Beurteilungswertes als Konvention auf der Grundlage des UMK-Beschluss 55/2021 [22] erfolgte, bei

dem die Umweltministerkonferenz die LAGA im Rahmen der laufenden Arbeiten zur Überarbeitung der LAGA M 23 das Mandat erteilt hat, einen geeigneten Beurteilungswert für den Nachweis der Asbestfreiheit festzulegen. Der Beurteilungswert soll sicherstellen, dass bei Umsetzung einer konsequenten Vorerkundung und gezielten Schadstoffentfrachtung nach dem Stand der Technik bei Abbruch und Sanierung asbestverdächtiger baulicher Anlagen mineralische Bau- und Abbruchabfälle unter Wahrung des Verhältnismäßigkeitsprinzips dem Bauschuttrecycling zugeführt werden können, sodass so hergestellte Recyclingbaustoffe im Hinblick auf die Asbestthematik unbedenklich verwendet werden können.

Dabei wurde analog der Gefahrstoffmerkmale von Asbest ein risikobasierter Bewertungsansatz verfolgt, der in den Vorgaben der Gefahrstoffverordnung und ihrer Novelle sowie der diesbezüglichen Technischen Regelwerke, z. B. TRGS 519 [9] zum Ausdruck kommt. Unter den nachfolgend genannten allgemeinen Rahmenbedingungen:

- der natürlichen Hintergrundbelastung, außerhalb des Einwirkungsbereichs von Emissionen aus Anlagen oder Ablagerungen in Höhe von 100 - 150 Fasern pro m<sup>3</sup> [2],
- der Reproduzierbarkeit von Untersuchungen im Hinblick auf Unsicherheiten Probenahme (Heterogenität) und den methodenspezifischen Bestimmungs-/Nachweisgrenzen [25] sowie
- der Zulässigkeit des Inverkehrbringens von potenziell asbesthaltigen Gesteinsvorkommen (< 0,1 Masse-% Asbest kein Inverkehrbringungsverbot) gemäß TRGS 517 [10]

erscheint es auch unter Berücksichtigung chemikalienrechtlicher Maßgaben geeignet und verhältnismäßig einen Ansatz zur Beurteilung zur Asbestfreiheit in Form eines „Abschneidekriteriums“ zu finden, dass dem gebotenen risikobasierten Ansatz hinreichend Rechnung tragen kann. Hieraus wurde in der LAGA M 23 ein Beurteilungswert von 0,010 Masse-% Asbestgehalt zur „Asbestfreiheit“ abgeleitet.

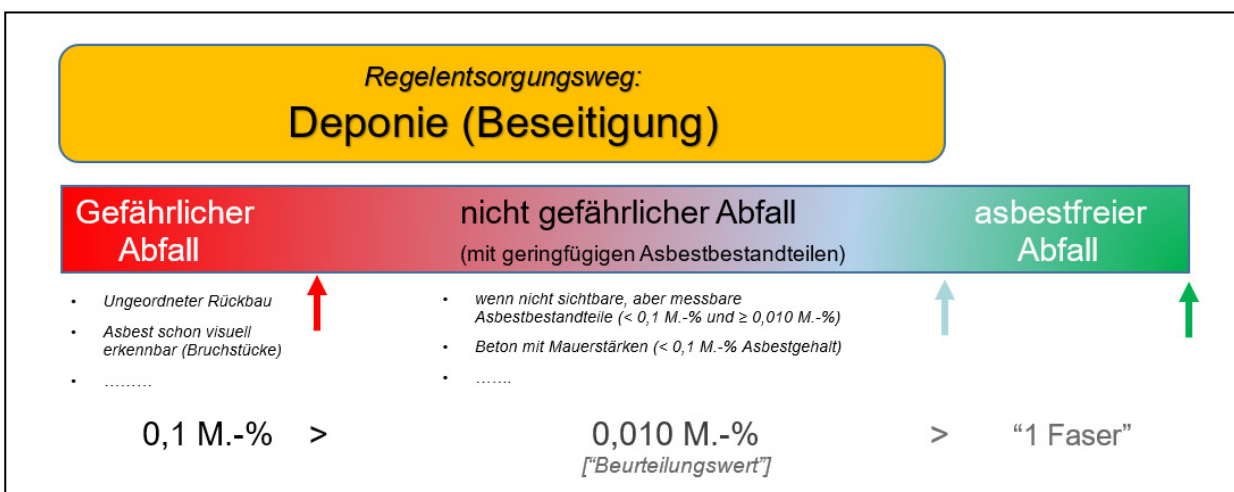


Abb. 2: Schematische Darstellung der Einstufungskriterien von Abfällen unter dem Aspekt einer Asbesthaltigkeit sowie des Regelentsorgungsweges von nicht asbestfreien Abfällen

Die Anwendung dieses Beurteilungswertes ist aber nur in spezifischen Fällen erlaubt, sodass insbesondere Bau- und Abbruchabfälle, die im Rahmen der Säule „Vorerkundung und selektiver Rückbau“ sowie den damit im Zusammenhang stehenden Maßnahmen nicht entsprechend Rechnung tragen, nicht in den



Anwendungsbereich des Beurteilungswertes fallen. Dies beinhaltet unter anderem offensichtlich asbesthaltige Abfälle, bei denen z. B. ein ungeordneter Rückbau bei potenziellem Asbestverdacht erfolgte oder Asbest schon visuell durch Bruchstücke im Abfall erkennbar sind. Für diese grundsätzlich vermeidbar asbesthaltigen (Misch)Abfälle scheidet damit im Regelfall auch eine Einstufung als nicht gefährlicher Abfall nach den Bewertungsgrundsätzen der LAGA M 23, u.a. mangels zuverlässiger Reproduzierbarkeit aus.

Der Beurteilungswert besitzt somit enge Anwendungsgrenzen und kann damit nur für nicht offensichtlich asbesthaltige Bau- und Abbruchabfälle, bei denen gleichwohl eine grundsätzliche Asbestfreiheit, insbesondere durch Vorerkundung, Baujahr und Beschaffenheit nicht zweifelsfrei belegt werden kann, und somit nur im Bedarfsfall Anwendung finden. Nur in diesen Fällen ist eine analytische Bestimmung des Asbestgehaltes zur Beurteilung erforderlich.

Aber auch nicht gefährliche, geringfügig asbesthaltige Abfälle, die durch nicht abtrennbare asbesthaltige Kleinteile, wie z.B. Betonbruch mit Abstandhaltern, so wie auch im Bericht zum Erfahrungsaustausch „Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen mit geringen Asbestgehalten“ der LAGA [13] identifiziert, gekennzeichnet sind, werden somit bestimmungsgemäß als Abfall zur Beseitigung aus dem Wertstoffkreislauf ausgeschleust und gelangen somit nicht in die Anwendung des Beurteilungswertes zur Asbestfreiheit und somit nicht in den Recyclingprozess von Bau- und Abbruchabfällen.

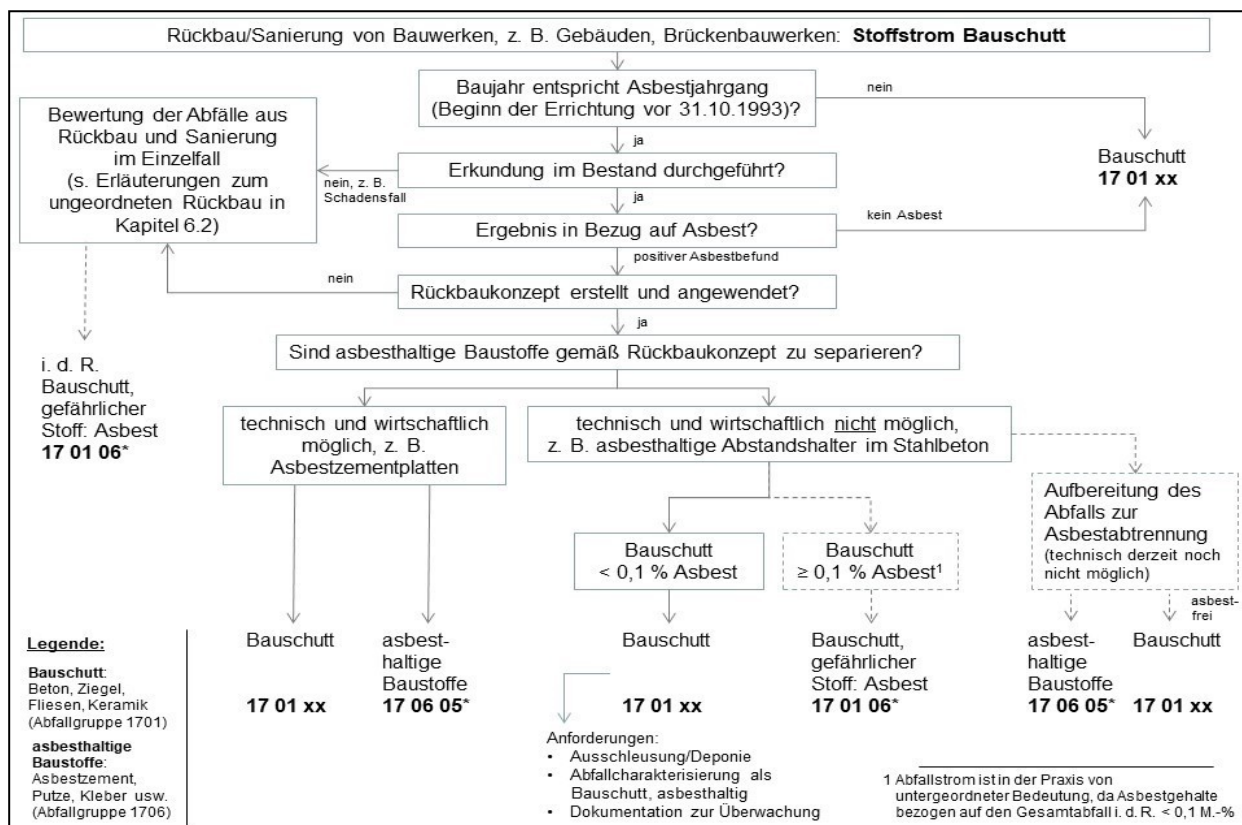


Abb. 3: Einstufungsschema für potenziell asbesthaltigen Bauschutt (Abfallschlüssel nach AVV) gemäß Abbildung 1 aus LAGA Mitteilung 23 [14]

Diese Bedingung gilt insoweit, dass bisher keine Verfahren verfügbar sind, die eine wirksame und restlose Entfrachtung der asbesthaltigen Bestandteile ermöglichen. Mögliche Perspektiven können aus Sicht des Autors innovative Detektionsverfahren bieten, mit denen es gelingt asbesthaltige Bestandteile aus einem Stoffstrom zuverlässig zu identifizieren und in der Folgestufe aus diesem Stoffstrom auszuwählen.

Die LAGA M 23 enthält hierzu ein praxisorientiertes Einstufungsschema für potenziell asbesthaltigen Bauschutt (siehe Abb. 3), das als Voraussetzung der möglichen Entsorgungswege angewendet werden kann.

Darüber hinaus sind im Anhang 2 der LAGA M 23 zahlreiche Fallkonstellationen zur Bewertung der „Asbesthaltigkeit“ dargelegt, die ebenso die fachliche Grundlage zur Einstufung und zur Entscheidung der grundsätzlichen Verwertungsmöglichkeiten der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle darstellen.

### 2.3 Säule „Inputbasierter Ansatz der Recyclinganlage“

Die dritte Säule im Gesamtsystem, die die anderen zwei aufgeführten Säulen voraussetzt, umschreibt den inputbasierten Ansatz der Abfälle in eine Recyclinganlage. Dies umfasst die Anforderung, dass nur nachgewiesene „asbestfreie“ Bau- und Abbruchabfälle in den Recyclingprozess und somit in die Recyclinganlage (siehe Abb. 1) gelangen dürfen. Die Nachweisführung kann gemäß den vorgenannten Ausführungen zur Säule „Abfalleinstufung – Asbestfreiheit“ durch Messungen oder entsprechende Fallkonstellationen erfolgen.

Die Säule ist auch nicht neu, sie wird im „Analogon“ bereits als Vorsorgemaßstab im Bereich der Deponieanforderungen - hier Annahmeverfahren nach § 8 Deponieverordnung (DepV) [7] verwirklicht. Die Anforderung geht auf die EU-Deponierichtlinie (Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien) zurück, die durch die entsprechende Umsetzung in die DepV fachlich vor der Anlieferung der Abfälle an die Entsorgungsanlage den Abfallerzeuger verpflichtet, eine grundlegende Charakterisierung (gC) der zur Anlieferung angedachten Abfälle mit verantwortlicher Erklärung des Abfallerzeugers/Beauftragten zur Beschaffenheit der Abfälle vorzulegen, wodurch dem Betreiber eine Zuordnung einschließlich zugehöriger Kontrollmechanismen gegeben ist.

Innerhalb der LAGA M 23 wurde dieses Vorsorgeprinzip auf das Recycling im Hinblick auf die Asbestthematik übertragen, sodass eine Dokumentation der Asbestfreiheit zur Anlieferung von Abfällen an der Recyclinganlage durch Erklärung des Abfallerzeugers als Eingangstestat erforderlich ist. Die hierzu im Anhang 6 der LAGA M 23 entwickelten Formblätter können somit auch den Anforderungen zur Annahmекontrolle unter Beachtung der Vorgaben nach § 3 Absatz 1 Satz 5 ErsatzbaustoffV [6] („... Für die Ermittlung der Schadstoffgehalte in mineralischen Abfällen wesentliche, vorliegende Untersuchungsergebnisse oder aus der Vorerkundung von Bauwerken oder Böden vorliegende Hinweise auf Schadstoffe sind vom Abfallerzeuger oder -besitzer dem Betreiber der Anlage bei der Anlieferung vorzulegen...“) Rechnung tragen.

Dabei können auch bei der Annahme Kontrollmöglichkeiten analog § 8 DepV beim Annahmeverfahren (Kontrollen durch Betreiber) obligatorisch zur Anwendung kommen. Dies beinhaltet insbesondere auch die Option einer Zurückweisung durch den Anlagenbetreiber bei unzureichender Dokumentation bzw. in Zweifelsfällen oder bei auffälligen Kontrollen im angelieferten Abfall für die Recyclinganlage.

Die Umsetzung in der Praxis durch diese Formblätter wurde daher auch schon Angriff genommen. Seitens der Mitgliedsunternehmen im Qualitätssicherungssystem Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg e.V. (QRB) ist dieses Formblatt als Standardvorlage bei der Annahmeerklärung enthalten. Im Zeitalter der „Kreislaufwirtschaft 4.0“ ist eine noch praktikablere Umsetzung denkbar, sodass die Angaben auch digital verarbeitet werden können.

Mit dieser inputbasierten Qualitätsüberwachung bzw. den hierzu erforderlichen Nachweisbedingungen kann mit äußerst hoher Wahrscheinlichkeit dem Output der Recyclinganlage grundsätzlich ein asbestfreies

Baustoffrecyclingmaterial ohne ein systematisches „Freimessen“ attestiert werden. Bei dieser Vorgehensweise kann im Umkehrschluss zweifelsfrei belegt werden, dass das Recyclingoutput als Gemisch anzusehen ist, dem somit keine Asbestfasern absichtlich hinzugesetzt wurden oder werden.

Die für den Eingang an der Recyclinganlage erforderliche Dokumentation der Asbestfreiheit angelieferter Abfallchargen bzw. deren Inhalte lassen sich direkt auf Basis der in den vorgenannten Säulen „Erkundung vor Abbruch – Selektiver Rückbau“ und „Abfalleinstufung – Asbestfreiheit“ gewonnenen Informationen ableiten. Sie stehen somit im Ablauf der Abfallentstehung vor einer weiteren Bewirtschaftung im abfallrechtlichen Kontext zur Verfügung. Insofern können die notwendigen Informationen und Angaben bei der systematischen Herangehensweise (siehe Systemskizze in Abb. 1) zur Manifestierung dieser aus Sicht des Autors maßgeblichen Säule systembedingt als gegeben vorausgesetzt werden.

Die effektivste Systemschnittstelle ein asbestfreies Recyclingmaterial als Sekundärrohstoff zu gewährleisten, bildet somit aus Sicht des Autors der inputbasierte Ansatz, der damit insbesondere der speziellen Asbestthematik angemessen im Vorsorgemaßstab Rechnung trägt.

## 2.4 Umsetzung der LAGA M 23

Seit der Veröffentlichung der novellierten LAGA Mitteilung M 23 im Mai 2023 haben bekanntlich bereits 4 Länder (Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Schleswig-Holstein) diese Vollzugshilfe in ihren Ländern und damit auch die damit verbundenen Maßgaben zur Umsetzung im Vollzug eingeführt.

Sicherlich zeigen sich bei einer konsequenten Handhabung an der ein oder auch anderen Schnittstelle zur Entsorgung von Bau- und Abbruchabfällen, insbesondere in der Rubrik des unaufbereiteten Bauschuttes, noch einige Fragen zum entsprechende Umgang mit diesen Abfällen. Beispielhaft sei hier das Thema der Wertstoffe genannt, an denen auch private Anlieferer und Kleinhandwerker ihre ggf. potenziell asbesthaltigen Abfälle unwissentlich an den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger abgeben. Auch hier ist die Asbestproblematik durchaus gegeben, sodass sich damit die Fallkonstellation Nr. 2.3 a im Anhang 2 der LAGA M 23 („Keine Informationen über Asbesterkundung bei Kleinmengen aus dem privaten Bereich (soweit keine Monocharge nach Nr. 1b)“) und somit die Einstufung der Kategorie: *Mineralische Bau- und Abbruchabfälle „allgemeiner Asbestverdacht“* und somit die Beseitigung als nicht gefährlicher, „geringfügig asbesthaltiger“ Abfall auf der Deponie ergibt.

Im Ergebnis muss jedoch konstatiert werden, dass die novellierte LAGA M 23 schlicht weg den bestehenden Rechtsrahmen auslegt und insofern weder neue gesetzliche Rahmenbedingungen oder Anforderungen schafft. Vielmehr wird der bestehende rechtliche Rahmen strukturiert dargestellt, sodass der ordnungsgemäße Umgang mit derartigen Abfällen praxisorientiert klargestellt bzw. aufgezeigt wird.

## 3. Fazit

Die Umsetzung der in der LAGA M 23 geforderten Vollzugsmaßgaben fügen sich nicht nur im abfallrechtlichen Kontext des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, sondern auch in die Rahmenbedingungen der Gefahrstoffrechts sowie des aus abfallwirtschaftlicher Sicht geforderten Abfallverwertungskonzeptes ein. Dadurch kann ein optimiertes Bauschuttrecycling im Hinblick auf eine noch effizientere Ausschleusung asbesthaltiger Baustoffe erreicht und somit auch eine unnötige Deponierung vermieden werden.

Im Hinblick auf die praxisnahe Umsetzung sowohl für die Schadstofferkundung von asbesthaltigen Materialien und Baustoffen als auch zu entsprechenden Maßnahmen der Getrennthaltung einschließlich des

selektiven Rückbaus bieten die bereits in der LAGA M 23 ausgewiesenen einschlägigen Regelwerke, wie z. B. VDI-Richtlinien ([23], [24], [25], [26], [27]) sowie verschiedene Verfahrensanleitungen und Arbeitshilfen aus technischen Bereichen etablierte Hilfestellungen.

In dieser Hinsicht bedarf es somit nur einer konsequenten Umsetzung bei der Abbruchplanung und allen darauf ausgerichteten Maßnahmen sowie auch der Vorbereitung entsprechender Maßnahmen, einschließlich der notwendigen Standardvorgaben bei den zugehörigen Ausschreibungen. Dies umfasst die gefahrstoffrechtlichen Aspekte als auch eine strategische Abfallplanung vor dem unmittelbaren Anfall der Abfälle.

Rechtlich verpflichtende Abfallverwertungs- bzw. Entsorgungskonzepte können diese notwendigen Aspekte weiterentwickeln und somit qualifiziert die rechtlichen Vorgaben aus dem Kreislaufwirtschaftsrecht untermauern. Baden-Württemberg hat auf der Grundlage seines Landes-Kreislaufwirtschaftsgesetzes diese Initiative bereits erfolgreich umgesetzt, sodass damit substantielle Verpflichtungen zur Erstellung eines Abfallverwertungskonzeptes und damit inbegriffen auch zur Schadstoff(vor)erkundung an Gebäuden oder Bauwerken abgefordert werden. Offensichtlich ist die Welt in Baden-Württemberg nicht zusammengebrochen.

Wenn es der Abbruch- und Recyclingwirtschaft nicht ausreichend gelingt, asbesthaltige Baustoffe durch geeignete strategische Maßnahmen aus dem Massenstrom der Bauschuttabfälle auszuhalten, laufen wir gegebenenfalls nach über 30 Jahren erneut einem möglichen Deponierungsnotstand entgegen.

Dadurch wird auch der Anreiz zur frühzeitigen Ausschleusung schadstoffhaltiger Bauteile und somit zur Steigerung der Nutzbarmachung von Sekundärrohstoffressourcen gefördert. Dies ist aus Sicht des Autors eine der zentralsten Grundsätze, die das Kreislaufwirtschaftsgesetz verankert.

Die Ausschleusung von Schadstoffen, insbesondere Asbest ist somit nicht nur eine große Herausforderung für das Bauschuttrecycling und die Aufbereitung anderer mineralischer Ersatzbaustoffe, sondern auch eine Chance Stoffkreisläufe wieder schließen zu können und fügt sich in die Europäische Strategie, Maßnahmen für eine asbestfreie Zukunft zu forcieren [18], optimal ein.

Derzeit gibt es keine etablierten Behandlungs- oder Entfrachtungstechniken, die eine Separierung der asbesthaltigen Bauteile oder Fraktionen ermöglichen. Damit bringen die mit Asbest verunreinigten mineralischen Materialien bei der „Beurteilung einer Asbesthaltigkeit“ eine erhebliches Potential zur Beseitigung dieser Abfälle mit sich.

Insofern bleibt den Deponien letzten Endes keine Wahl als letztes Glied in der Abfallhierarchie, sich um diese Abfälle, soweit eine Verwertung wie in diesen Fällen technisch nicht möglich ist, in der Daseinsvorsorge zu kümmern und somit eine umweltverträgliche Entsorgung im Kontext der Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen. Daher muss es geboten sein, vermeidbare asbesthaltige (Misch)Abfälle durch frühzeitige Selektion der asbesthaltigen Baustoffe und Bestandteile als langfristige Lösungen zu forcieren und somit die Mengen zur Deponierung auf das unvermeidbare Maß zu reduzieren. Damit einhergehend wird aber die Bedeutung des unverzichtbaren Elementes von Deponien innerhalb einer umweltgerechten und funktionsfähigen Kreislaufwirtschaft wieder einmal deutlich, in diesem Fall um asbesthaltigen Abfällen eine umweltverträgliche Schadstoffsene zu bieten.

#### 4. Literaturangaben

- [1] Baden-Württemberg: Gesetz des Landes Baden-Württemberg zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Gewährleistung der umweltverträglichen Abfallbewirtschaftung (Landes-Kreislaufwirtschaftsgesetz – LKreiWiG) vom 17. Dezember 2020 (GBl. Nr. 46, S. 1233), zuletzt geändert durch Artikel 10 des Gesetzes vom 7. Februar 2023 (GBl. Nr. 2, S. 26), in Kraft getreten am 11. Februar 2023
- [2] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU): UmweltWissen – Abfall Asbest ([https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw\\_9\\_asbest.pdf](https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_9_asbest.pdf)), Stand: April 2018
- [3] Bund: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 9. Juli 2021 (BGBl. I Nr. 43, S. 2598), in Kraft getreten am 1. August 2023
- [4] Bund: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) vom 24. Februar 2012, zuletzt geändert durch Artikel 20 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I Nr. 53, S. 3436), in Kraft getreten am 1. Januar 2024
- [5] Bund: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S.502), zuletzt geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I Nr. 9, S. 306), in Kraft getreten am 4. März 2021
- [6] Bund: Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (ErsatzbaustoffV) vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Juli 2023 (BGBl. I Nr. 186, S. 1), in Kraft getreten am 1. August 2023
- [7] Bund: Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27. April 2009 (BGBl. I Nr. 22, S. 900), zuletzt geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I Nr. 43, S. 2598), in Kraft getreten am 1. August 2023
- [8] Bund: Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV) vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I, S. 3379), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 30. Juni 2020 (BGBl. I Nr. 32, S. 1533), in Kraft getreten am 4. Juli 2020
- [9] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) – Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 519. Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten (TRGS 519), Ausgabe: Januar 2014, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2022 S. 269-272 vom 31.3.2022
- [10] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) – Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 517. Tätigkeiten mit potenziell asbesthaltigen mineralischen Rohstoffen und daraus hergestellten Gemischen und Erzeugnissen (TRGS 517), Ausgabe: Februar 2013, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2015 S. 137-138 [Nr. 7] vom 02.03.2015
- [11] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS): Nationaler Asbestdialog (Stand: 11.Mai 2020) <https://www.bmas.de/DE/Arbeit/Arbeitsschutz/Gesundheit-am-Arbeitsplatz/Nationaler-Asbestdialog/2020-05-11-sachstand-nationaler-asbestdialog.html>, abgerufen am 27.05.2024
- [12] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS): Verordnung zur Änderung der Gefahrstoffverordnung und anderer Arbeitsschutzverordnungen (Stand: 03.03.2023)

- <https://www.bmas.de/DE/Service/Gesetze-und-Gesetzesvorhaben/verordnung-zur-aenderung-der-gefahrstoffverordnung-und-anderer.html>, abgerufen am 27.05.2024
- [13] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft-Abfall (LAGA) - Ausschuss für Abfalltechnik: Bericht des Erfahrungsaustausches „Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen mit geringen Asbestgehalten“ ([www.laga-online.de](http://www.laga-online.de)), April 2020
- [14] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft-Abfall (LAGA) - Ausschuss für Abfalltechnik: LAGA Mitteilung 23 „Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle“ ([www.laga-online.de](http://www.laga-online.de)), Stand: 29.11.2022, veröffentlicht am 08.05.2023
- [15] BG Bau – Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft: „Aktuelle Entwicklungen im Gefahrstoffrecht zu Asbest und krebserzeugenden Stoffen“, Vortrag im Rahmen des 11. DCONex Kongress - Messe Münster, 23./24. Januar 2024
- [16] Destatis: Abfallwirtschaft Kurzübersicht – Abfallreihe - Abfallbilanz 2021 ([https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html)), abgerufen: 27.05.2024
- [17] EU: Richtlinie 2023/2668 des EUROPÄISCHEN PARLAMENTS und RATES vom 22. November 2023 zur Änderung der Richtlinie 2009/148/EG über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Asbest am Arbeitsplatz ([https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202302668](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302668))
- [18] EU-Parlament: 2019/2182(INL) – Arbeitnehmer vor Asbest schützen - Entschließung des Europäischen Parlaments vom 20. Oktober 2021 mit Empfehlungen an die Kommission zum Schutz an Arbeiter aus Asbest und Forderung einer Europäische Strategie zur Entfernung von Asbest (ESRAA) – EU-Kommission stärkt Schutz vor Asbest ([https://germany.representation.ec.europa.eu/news/eu-kommission-starkt-schutz-vor-asbest-2022-09-28\\_de](https://germany.representation.ec.europa.eu/news/eu-kommission-starkt-schutz-vor-asbest-2022-09-28_de)), abgerufen am 27.05.2024
- [19] Gewerbeaufsicht Baden-Württemberg: Abfallverwertungskonzept nach LKreiWiG (<https://gewerbeaufsicht.baden-wuerttemberg.de/abfallrecht-formulare>), abgerufen am 27.05.2024
- [20] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Ressourcenschonender Beton (R-Beton) (<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/abfall-und-kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaft/wertstoffe-aus-abfaellen/r-beton>), abgerufen am 27.05.2024
- [21] Umweltministerkonferenz: Protokoll zur 92. UMK Sitzung in Hamburg am 10.5.2019 ([https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/protokoll-92-umk\\_1560263808.pdf](https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/protokoll-92-umk_1560263808.pdf)), abgerufen am 27.05.2024
- [22] Umweltministerkonferenz: Umlaufbeschluss Nr. 55/2021 vom 09.11.2021 ([https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlauf2021\\_55.pdf](https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlauf2021_55.pdf)), abgerufen am 27.05.2024
- [23] Verein Deutscher Ingenieure ([www.vdi.de](http://www.vdi.de)): VDI 3876: 2018-11
- [24] Verein Deutscher Ingenieure ([www.vdi.de](http://www.vdi.de)): VDI 3866 – Blatt 1: 2021-11
- [25] Verein Deutscher Ingenieure ([www.vdi.de](http://www.vdi.de)): VDI 3866 – Blatt 5: 2017-06
- [26] Verein Deutscher Ingenieure ([www.vdi.de](http://www.vdi.de)): VDI 6202 – Blatt 3: 2021-09
- [27] Verein Deutscher Ingenieure ([www.vdi.de](http://www.vdi.de)): VDI 6202 – Blatt 20: 2017-11

# PFAS-Bodenwäsche – Möglichkeiten und Grenzen

Dr. Benjamin Faigle<sup>1</sup>, Bernhard Volz<sup>2</sup>

## Inhalt

1. Einleitung .....	161
2. Grundlagen und Rahmenbedingungen zur PFAS Bodenwäsche .....	162
3. Waschversuche.....	163
4. Genehmigung einer on-site PFAS-Bodenwäsche .....	164
5. Vorteile gegenüber anderen Verfahren .....	165
6. Entwicklungspotential und Ausblick .....	165
7. Zusammenfassung und Ausblick .....	166
8. Literatur.....	166

## 1. Einleitung

Die Bodenwäsche wird im großen Maßstab erfolgreich zur Abreinigung PFAS-kontaminierter Böden eingesetzt: Seit 2022 betreibt die Züblin Umwelttechnik GmbH in Norddeutschland eine Bodenwaschanlage, die speziell für die Behandlung von PFAS-belasteten Sandböden konzipiert wurde. Im ersten Betriebsjahr wurden mehr als 180.000 t PFAS-belasteter Boden gereinigt. Dabei wurden für einen Großteil des behandelten Bodenmaterials die strengen Anforderungen für eine uneingeschränkte Wiedereinbringung (z.B. PFOS <0,1 µg/l im Eluat, entspricht VK1) in der sandigen Hauptfraktion unterschritten. Unter günstigen Bedingungen kann die Anlage so betrieben werden, dass auch die als Filterkuchen abgetrennte Feinfraktion für einen eingeschränkten Einbau vor Ort geeignet ist (Summe PFAS <1µg/l im Eluat, entspricht VK3) und somit alle Kornfraktionen verwertet werden können.

---

<sup>1</sup> Dr. Benjamin Faigle, Züblin Umwelttechnik GmbH, Maulbronner Weg 32, D-71706 Markgröningen, Tel. +49 7145 9324-251, benjamin.faigle@zueblin.de

<sup>2</sup> Bernhard Volz, Züblin Umwelttechnik GmbH, Maulbronner Weg 32, D-71706 Markgröningen, Mobil +49(0)160 361 50 29, bernhard.volz@zueblin.de



Abbildung 1: Luftaufnahme der PFAS-Bodenreinigungsanlage in Norddeutschland.

Grundsätzlich ist die Bodenwäsche ein geeigneter Ansatz für viele PFAS-Schadensfälle. In Grenzfällen jedoch ist die Bodenwäsche nicht wirtschaftlich umzusetzen, oder bei den gegebenen Projektrahmenbedingungen sind alternative Verwertungs- oder Entsorgungsmaßnahmen sinnvoller. In der Planungsphase können Waschversuche wertvolle Erkenntnisse über die grundsätzliche Eignung und Anwendbarkeit des Verfahrens liefern.

## 2. Grundlagen und Rahmenbedingungen zur PFAS Bodenwäsche

### 2.1 Basics Bodenwäsche

Im Allgemeinen werden bei der Bodenwäsche zwei Ziele verfolgt:

1. Auftrennung in einzelne Fraktionen

Aufgrund der großen Oberfläche der feinen Bestandteile im Verhältnis zu ihrem Volumen ist die Klassierung in zwei oder mehr Fraktionen unterschiedlicher Partikelgröße ein Schlüsselement der Bodenwäsche. Nach der Klassierung wird jede Fraktion einer spezifischen, weiteren Behandlung zur Reinigung oder zur Entsorgung unterzogen.

2. Abwaschen der Schadstoffe vom Feststoff

Physikalische und chemische Behandlung des Bodens mit den Waschsubstanzen, in der Regel hauptsächlich Wasser, so dass die Schadstoffe vom Feststoff entfernt werden. Die Feinfraktion muss in einem weiteren Schritt vom Prozesswasser getrennt werden.

Es stehen eine Vielzahl von Technologien und Maschinen für die Feststoffbearbeitung und Klassierung (z. B. Siebdecks, Hydrozyklone, Attrition oder Schwertwäscher, Aufstromklassierer, ...), sowie für die Schlammbehandlung und der Reinigung des Prozesswassers zur Verfügung. Für viele Schadstoffe ist die Behandlung durch Bodenwäsche seit langer Zeit bekannt, für Böden mit PFAS-Belastung wurde das Verfahren jedoch nur in wenigen Projekten tatsächlich großtechnisch angewendet.



## 2.2 Ziel des Verfahrens und Grenzwerte

Mit dem Bodenwaschverfahren wird das Ziel verfolgt, möglichst alle Bodenfraktionen so weit abzureinigen, dass der Wiedereinbau zulässig ist und möglichst nur geringe Restmengen an hochkontaminiertem Material aufwändig entsorgt oder weiterbehandelt werden muss. Dazu müssen die gereinigten Fraktionen analysiert, und bei Unterschreiten der vorher vereinbarten Grenzwerte nach Freigabe wieder einem Einbau zugeführt werden. Die Orientierungswerte für den uneingeschränkten Einbau (VK1) sind für die Sand- und Kiesfraktion in der Regel erreichbar. Je nach Beschaffenheit der Bodencharge können diese hohen Anforderungen ggfs. nur unter sehr hohem Aufwand eingehalten werden. Es ist daher ratsam, auch die höherbelasteten Verwertungsklassen bis VK 3 zuzulassen, um Bodenwäsche auch für schwierige Bodenchargen zu ermöglichen.

## 3. Waschversuche

### 3.1 Vorabbemerkung – Versuche im Labormaßstab

Die Verfahrenstechnik bei der Bodenwäsche ist üblicherweise auf große Materialmengen angelegt. Versuche können vorab oder Projektbegleitend auf unterschiedlichen Skalen durchgeführt werden.

Im Labormaßstab können vor allem Detailfragen im Zuge der Projektdurchführung geklärt werden. Beispielsweise kann der Wascherfolg an einer in Betrieb befindlichen Anlage optimiert werden, indem der Einsatz verschiedener Chemikalien (Flockungs- und Flockungshilfsmittel) im Labormaßstab verglichen wird. Auch innovative Ansätze wie der Einsatz von waschaktiven Substanzen können auf ihre Eignung untersucht werden. Die Probenmenge im Labormaßstab beträgt in der Regel mehrere Kilogramm, die Kosten sind vergleichsweise gering und fallen hauptsächlich für die laboranalytische Begleitung an, um die Schadstoffgehalte zu bestimmen. Häufig schwanken die Ergebnisse bei Fragestellungen zur PFAS-Wäsche in diesem Maßstab so stark, dass wir Ansätze in Dupletten / Tripletten empfehlen.

Für den Nachweis der grundsätzlichen „Waschbarkeit“ von Rohböden sind Versuche im Labormaßstab aus unserer Sicht nicht geeignet.

### 3.2 Technikumsversuche - Beispiele

Im Technikum kann die grundsätzliche Eignung von Böden für das Bodenwaschverfahren untersucht und ggfs. hemmende Randbedingungen erkannt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Verfahrensstufen auch im Technikumsmaßstab noch mit Betriebsparametern (z.B. Wasser-Feststoff-Verhältnis) betrieben werden müssen, die sich von den Parametern im Projektmaßstab unterscheiden. Entsprechend sind die Ergebnisse aus dem Waschversuch nicht ohne Interpretation auf die Projektskala zu transferieren.

Die erforderliche Probenmenge liegt zwischen 3-10 t, was bereits erhebliche Kosten für die Durchführung der Versuche im Bereich von 30-50.000 € verursacht. Auf der Basis von Technikumsversuchen kann ein projektbezogenes verfahrenstechnisches Konzept erstellt werden und daraus Behandlungskosten abgeleitet werden. Je nach Projektrahmenbedingungen kann die Bodenwäsche daraus folgernd auch für anspruchsvolle Böden, beispielsweise mit hohem Feinanteil, in Frage kommen. Andererseits kann im Technikumsversuch auch erkannt werden, wenn der zu erwartende verfahrenstechnische Aufwand zur Reinigung zu hoch und damit nicht mehr wirtschaftlich werden sollte. Damit eignen sich Waschversuche im Technikum insbesondere für Chargen, bei denen die Eignung des Bodenwaschverfahrens aufgrund der Korngrößenzusammensetzung und Kornbeschaffenheit schwierig zu prognostizieren ist.



Abbildung 2: Technikumsanlage für Bodenwaschversuche.

### 3.3 Waschversuch im großtechnischen Maßstab

Erst im großtechnischen Maßstab kann die Behandlung von Bodenmaterial unter weitgehend maßstabsgetreuen Bedingungen untersucht werden. Allerdings ist bis zum Erreichen stabiler Prozessbedingungen eine gewisse Zeit und damit eine Aufgabemenge von > 100 t erforderlich, bis in allen Prozessstufen eine repräsentative Probe entnommen werden kann. Eine eindeutige, geschlossene Massenbilanz ist jedoch aufgrund der Aggregategröße nicht zu erwarten.

Die großen Probenmengen und der hohe technische Aufwand führen zu hohen Kosten für die Durchführung eines großtechnischen Versuchs. Auch der administrative Aufwand ist deutlich höher als bei kleinmaßstäblichen Versuchen.

## 4. Genehmigung einer on-site PFAS-Bodenwäsche

Für die Genehmigung einer PFAS-Bodenwaschanlage sind je nach Rahmenbedingungen unterschiedliche Verfahren und Wege möglich. Grundsätzlich ist es von Vorteil, möglichst frühzeitig mit den beteiligten Behörden in einen offenen Dialog zu treten, um ein rechtssicheres Genehmigungsverfahren zu definieren und alle Belange zu erörtern: die PFAS-Bodenwäsche ist genehmigungsrechtlich noch kein Standardverfahren und die Stoffgruppe PFAS grundsätzlich mit Vorbehalten belastet.

Im Vergleich zu einer externen stationären Bodenbehandlungsanlage (off-site) bietet die Bodenwäsche am Ort des Schadensfalls (on-site) den Vorteil, dass die Bodenwaschanlage selbst sowie die Verwendung des gereinigten Materials im Rahmen des Sanierungsplans unter BBodSchV genehmigt werden kann, und danach keine weitere Genehmigung nach BImSchG erforderlich ist.

Auch die Verwertung des abgereinigten Materials ist im Zuge der on-site Reinigung einfacher zu regeln, da Verbleib bzw. Wiedereinbau geringkontaminierter Bodenmaterials im Bereich eines PFAS-kontaminierter Standortes ohnehin zu adressieren ist.

## 5. Vorteile gegenüber anderen Verfahren

Neben den finanziellen Vorteilen der Bodenwäsche im Vergleich zu einer externen Verwertung auf Deponien ist die Vermeidung der Transporte für große Kubaturen ein starkes Argument für Anrainer und Behörden. Damit ist die Bodenwäsche auch aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten eindeutig die bessere Verfahrensalternative zur Entsorgung & Deponierung und weist einen deutlich geringeren CO<sub>2</sub> Footprint auf.

Da die PFAS in der Hauptsache über die beladene Aktivkohle aus der Kreislaufwasseraufbereitung anfallen und schlussendlich im Zuge der Reaktivierung oder Entsorgung thermisch zerstört werden, wird der Hauptanteil der PFAS somit auch nachhaltig der Umwelt entzogen.

Dennoch ist die Erstellung einer geschlossenen Schadstoff-Massenbilanz schwierig und mit großen Ungenauigkeiten behaftet. Die Heterogenität des Eingangsmaterials zur Waschanlage in Kombination mit den niedrigen Konzentrationsniveaus lassen bei jeder Frachtberechnung große Interpretationsspielräume. Anstelle die ausgetragene Menge an Schadstoff durch die Maßnahme bewerten zu wollen, lässt sich beispielsweise im Monitoring der Sanierung IN-Campus zeigen, dass durch die Behandlung der belasteten Böden mittels Bodenwäsche die Belastung im Grundwasser eindeutig reduzieren lässt und damit die Gefährdung für Mensch und Umwelt verringert werden kann.

## 6. Entwicklungspotential und Ausblick

### 6.1 Optimierung des Waschverfahrens für PFAS

Bei einer Durchsatzleistung von knapp 200t pro Stunde lassen sich Tests und Probeläufe aufgrund der eingesetzten Aggregatsgrößen nur unter großem Aufwand auf der Anlage in Norddeutschland realisieren. Daher ist am Standort ein kleines Labor eingerichtet, um begleitende Untersuchungen zur Optimierung des Waschprozesses mit Standortmaterial durchführen zu können. Im Labormaßstab wurden Optimierungspotentiale ermittelt oder standortspezifische Anpassungen vorbereitet. Im komplexen Zusammenspiel der unterschiedlichen Anlagenteile Feststoffwäsche, Schlammbehandlung und Waschwasserreinigung kann jede Optimierung in einem Bereich wesentliche Verfahrensanpassungen an anderer Stelle erfordern. Die Vielzahl an einzelnen Freiheitsgraden bei stark heterogenem Eingangsmaterial macht es im Betrieb außerdem schwierig, klare Ursache-Wirkungszusammenhänge zu ermitteln. Ein stabiler Wascherfolg stellt sich damit erst bei der Kombination aus passender Anlagentechnik und ausreichender Betriebserfahrung ein.

### 6.2 Forschungsbedarf

Das Bodenwaschverfahren von PFAS-Belastungen ist herausfordernd und wird mit hohem technischem und finanziellem Einsatz betrieben. Es ist davon auszugehen, dass weitere Verbesserungen entlang der gesamten Behandlungskette (Bodenwäsche/Feststoffbehandlung, Schlammbehandlung und Waschwasseraufbereitung) vorgenommen werden können, um die Effizienz weiter zu verbessern und die Kosten zu senken, sowie um stabile verbesserte Waschergebnisse für die Feinfraktionen zu erzielen. Dabei sind nicht alle Grundlagen, wie beispielsweise die dominierenden Effekte der Bindung zwischen Korn, Schadstoff und Waschwasser eindeutig bekannt.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Unsere Projekterfahrungen und die Durchführung zahlreicher Waschversuche zeigen, dass PFAS-kontaminierte Böden mit wenigen Einschränkungen waschbar sind. Dabei gilt es, die jeweiligen projektspezifischen Herausforderungen stufenweise in ein schlüssiges Gesamtkonzept zu überführen und umzusetzen. Zu beachten ist dabei insbesondere:

- Erfahrungen aus einem Projekt sind nicht uneingeschränkt auf andere Projekte übertragbar, da Bodeneigenschaften und Schadstoffzusammensetzung stark variieren können.
- Die Verwertung der gewaschenen Böden vor Ort ist wesentlicher Bestandteil für ein erfolgreiches Gesamtkonzept

Die Wäsche PFAS-kontaminierter Böden stellt - bei geeigneten Randbedingungen - aktuell das leistungsfähigste und wirtschaftlich sowie ökologisch sinnvollste Verfahren gegenüber alternativen Verwertungs- und Entsorgungsverfahren dar.

Durch weitere Entwicklungsarbeit an Detailfragestellungen wird das Verfahren wohl künftig auch für schwierigere Böden interessant werden.

## 8. Literatur

Faigle, B; Volz, B (2024): PFAS-Bodenwäsche – von der Planung zur Realisierung, ITVA-Konferenz 2024, Kassel, 20.-23.03.2024

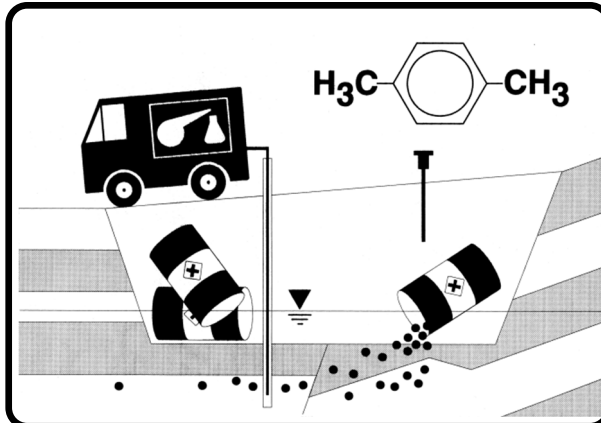
Faigle, B.; Edel, H.-G.; Volz, B. (2023): Verbesserte Bodenwäsche für PFAS-kontaminierte Böden - Erfahrungen aus der Praxis. DECHEMA-Konferenz 2023, Frankfurt, 27–28.11 2023,

Faigle, B.; Edel, H.-G.; Volz, B. (2023): Aktuelle Waschverfahren zur erfolgreichen Reinigung von Böden mit PFAS-Belastung. Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Band 10, TK-Verlag, 978-3-944310-71-8, 978-3-944310-72-5

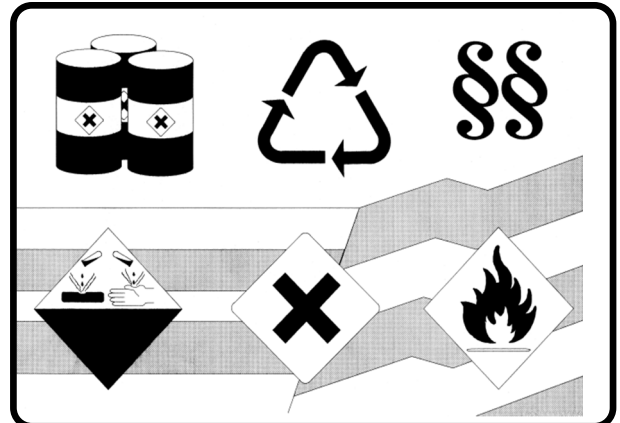
Volz, B.; Baur, J.; Grabmann, F.; Faigle, B (2019): Bodenwäsche neu entdeckt, altlasten spektrum 6-2019, Erich Schmidt Verlag, <https://doi.org/10.37307/j.1864-8371.2019.06>

Begutachtung • Erkundung • Planung • Überwachung

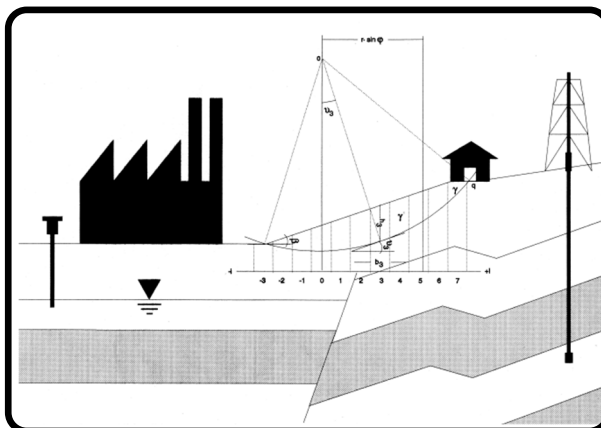
## Altlasten



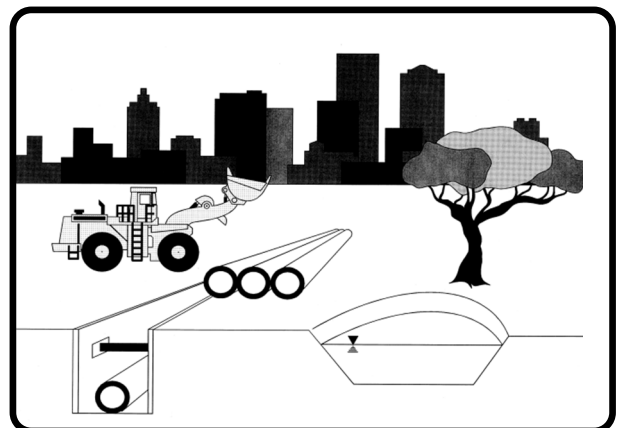
## Abfallwirtschaft / Umwelttechnik



## Geotechnik



## Kommunaler Tiefbau / Infrastruk- turplanung / Bauen im Bestand







[www.akgws.de](http://www.akgws.de)

## AK GWS ARBEITSKREIS GRUNDWASSERSCHUTZ

*Fordern Sie den hohen Standard  
des AK GWS für Ihre Bauwerke!*

Der AK GWS unterstützt im Bereich des Umwelt- und Grundwasserschutzes die Realisierung von sicheren Bauweisen unter Verwendung von Geokunststoffen sowie von Rohren, Schächten und Bauteilen aus Kunststoffen.







## Initiative

Auf Initiative des Hauptverbandes der Deutschen Bauindustrie wurde bereits **1989** für die Bereiche

- Bau von Abfallentsorgungsanlagen,
- Sicherung und Sanierung von Altlasten

zur Sicherstellung einer qualifizierten Ausführung die Überwachungsgemeinschaft „Bauen für den Umweltschutz“ e.V. gegründet.

## Aufgabe

Der Schutz der Umwelt unter Einbeziehung qualifizierter Bau- und Dienstleistungen ist in einer Zeit sich verschärfender Haftungsrisiken für Auftraggeber und Auftragnehmer eine zwingende Notwendigkeit. Mehr als in anderen Bereichen sind beim Bauen für den Umweltschutz vor- und nachsorgend qualifizierte Leistungen erforderlich. Auch im WHG und KrWG („Entsorgungsfachbetriebe“) sind Fachbetriebskonzeptionen installiert.

## Qualifizierte Umsetzung

Zentrale Grundforderungen beim Bauen für den Umweltschutz und beim Einsatz der Umwelttechnik sind die Umweltverträglichkeit und die Einhaltung von Sicherheitsstandards. Dies erfordert schlüssige Konzepte, fachkundige Planungen und qualifizierte Ausführungen. Eingangsvoraussetzung ist die betriebliche Eignung und damit die Qualitätsbefähigung des Auftragnehmers. Diese Voraussetzung erfüllen anerkannte Fachbetriebe der Überwachungsgemeinschaft BU.

## Überwachungszeichen

Nur der anerkannte Fachbetrieb ist berechtigt, das vom Verein verliehene Betriebsstätten-bezogene Überwachungszeichen zu führen. Dem Auftraggeber wird so die Fachkunde, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Auftragnehmers transparent gemacht. Die in der Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB), Teil A, vom Auftraggeber bei Ausschreibungen und Vergabe geforderte Prüfung der Eignung der Bewerber kann damit wesentlich vereinfacht werden, wie aktuelle Ausschreibungen belegen.

## Fachbetriebsüberwachung

Anerkannte Fachbetriebe unterliegen der Eigen- und Fremdüberwachung durch unabhängige Sachverständige. Gewerk- und leistungsunabhängig muss jeder Fachbetrieb die betriebliche Grundqualifikation nachweisen. Diese sieht vor, dass Fachbetriebe über

- qualifiziertes Personal,
- geeignete Organisationsstrukturen,
- notwendige Vorschriften, Normen und Gesetze und
- die für die Tätigkeiten notwendige Ausstattung an Werkzeugen und Gerätschaften verfügen.

## Kontakt: Prof. Dr.-Ing. Horst Görg

Göttelmannstraße 13 A, 55130 Mainz, Tel.: 06131/22 86 01  
www.bu-umwelt.de; E-Mail: zentrale@bu-umwelt.de



## Neues Leistungsspektrum

Die Überwachungsgemeinschaft BU gilt als der führende Fachverband für Deponiebauunternehmen. Die dort zertifizierten Betriebe haben sehr viel Know-how und tolle Referenzen vorzuweisen, sind geschult im Umgang mit den passenden Baugeräten für mineralische und bituminös gebundene Abdichtungsmaterialien und die Vielzahl von sonstigen Materialien wie Kunststoffe und Geotextilien. Doch die Deponiebaumaßnahmen werden immer seltener. Nicht, dass keine Deponien mehr gebraucht würden, ganz im Gegenteil. Der Deponiebedarf ist hoch und die Anfahrtswege werden immer länger, auch ohne Massenverschiebungen von der Verwertung in die Beseitigung durch die Mantelverordnung. Doch der vermeintliche Widerstand in der Bevölkerung lässt Vorhabensträger zurückschrecken.

Außerhalb des Deponiebaus gibt es aber eine Nachfrage nach „ähnlichen“ Gewerken. Daher haben wir Bereiche identifiziert, bei denen die qualifizierte Herstellung von Dichtflächen und Abdichtungen im Erd- und Wasserbau - z.B. Straßenbaumaßnahmen in Wasserschutzzonen - mit Materialien aus Kunststoffen, Betonschutzplatten, Geotextilien und mineralischen Produkten oder in Asphaltbauweisen gehören, wie beispielsweise für Haldenabdeckungen, Böschungssicherungen, aber auch solche für Kläranlagen und Tunnelbauwerke. Die Sanierung und der Neubau von Dämmen und Deichen, der Bau von Rückhalte- und von Versickerungseinrichtungen, wie Becken, Rigolen und Schächte sind weitere Bereiche, die nun von BU im neuen Leistungsbereich „D - Bauausführungen zum Gewässerschutz“ zertifiziert werden.

## Leistungsspektrum der BU-Fachbetriebe:

### A Betriebliche Grundqualifikation

### B Deponiebau und -sanierung

- B 1 Bau von Oberflächen- und Basisabdichtungen
- B 2 Bau vertikaler Deponieabdichtungen
- B 3 Bau von Deponiegasfassungen
- B 4 Bau von Sickerwasserfassungen
- B 5 Rückbau, Stilllegung und Sanierung von Deponien
- B 6 Sonstige Bauweisen und -verfahren

### C Flächenrecycling und Altlastensanierung

- C 1 Erdbau und Landschaftsgestaltung
- C 2 Selektiver Rückbau
- C 3 Herstellung von Ersatzbaustoffen und Konditionierung von Abfallstoffen
- C 4 Bau von Einkapselungen
- C 5 Hydraulische Maßnahmen
- C 6 Baugrund- und Bodensanierung (in-situ, on-site)
- C 7 Stationäre Anlagen (off-site: chemisch-physikalische, thermische, mikrobiologische Verfahren)

### D Bauausführung zum Gewässerschutz

- D 1 Dämme und Deiche
- D 2 Rückhalteeinrichtungen
- D 3 Abdichtungen im Erd- und Wasserbau
- D 4 Versickerungseinrichtungen

### E Sonderleistungen

- E 1 Projektierung
- E 2 Analytische Untersuchungen
- E 3 Stoffstrommanagement



## Bücher im ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt

- Band 1** **Abfallverwertung** oder Abfallbeseitigung?  
ISBN 3-9806840-0-8.
- Band 2** **Altlasten 2000**: ISBN 3-9806840-1-8.
- Band 3** **Egloffstein, Th.** (2000): Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien, Oktober 2000, ISBN 3-9806840-1-6.
- Band 4** **Altlasten2001**: ISBN 3-9806840-3-2.
- Band 5** **Altlasten 2002**: ISBN 3-9806840-4-0.
- Band 6** **Altlasten 2003**: ISBN 3-9806840-5-9.
- Band 7** **Altlasten 2004**: ISBN 3-9806840-6-7.
- Band 8** **Erneuerbare Energien**. Februar 2004, 225 Seiten.
- Band 9** **New advances on contaminated sites and waste disposal**. China. Oktober 2004, 206 Seiten, ISBN 3-9806840-8-3.
- Band 10** **Altlasten 2005**: ISBN 3-9806840-7-5.
- Band 11** **Altlasten 2006**: ISBN 3-9806840-9-1.
- Band 12** **Altlasten 2007**: ISBN 978-3-939662-00-6.
- Band 13** **Deponien und Altlasten 2007**: ISBN 978-3-939662-01-3.
- Band 14** **Altlasten 2008**: ISBN 978-3-939662-03-7.
- Band 15** **Deponien und Altlasten 2008**: ISBN 978-3-939662-04-4.
- Band 16** **Altlasten 2009**: ISBN 978-3-939662-05-1.
- Band 17** **Deponie- und Altlasten 2009**: ISBN 978-3-939662-06-8.
- Band 18** **Altlasten 2010**: Aktive und passive Grundwassersanierung - innovative Verfahren/MNA|Grundwasser -/Ersatzbaustoffverordnung (aktuelle Entwürfe) Vorsorgender Grundwasserschutz versus Recycling & Verwertung? ISBN 978-3-939662-07-5.
- Band 19** **Deponie- und Altlasten 2010**: Die Umsetzung der neuen Deponieverordnung, ISBN 978-3-939662-08-2.
- Band 20**: **Altlasten 2011**: Boden- und Grundwasserschutz im Zeichen der Kreislaufwirtschaft – die umweltverträgliche Verwertung von Abfällen. ISBN 978-3-939662-09-9.
- Band 21** **Deponie- und Altlasten 2011**: Praktische Erfahrungen im Vollzug der neuen Deponieverordnung. ISBN 978-3-939662-10-5.
- Band 22** **Altlasten 2012**: Aus Altlasten lernen, Präventivkonzepte zur Vermeidung von Neulasten – Von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz, ISBN 978-3-939662-11-2.
- Band 23** **Deponie- und Altlasten 2012**: Erstes dt. AbfG Abfallbeseitigungsgesetz. 1972 – Neues Kreislaufwirtschaftsgesetz 2012, ISBN 978-3-939662-12-9
- Band 24** **Deponie und Altlasten 2013**: Das Ziel hoher Verwertungsquoten um jeden Preis? ISBN 978-3-939662-13-6.
- Band 25** **Altlasten 2014**: Alte und neue Gefahren in der Altlastenbearbeitung - Von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-14-3.
- Band 26** **Deponie und Altlasten 2014 - Planung und Bau neuer Deponien**: Drohen Entsorgungseingpässe auf Deponien in Deutschland? ISBN 978-3-939662-15-0.
- Band 27** **Altlasten 2015** - Aus Altlasten lernen - von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-16-7.
- Band 28** **Deponie und Altlasten 2015 - Planung und Bau neuer Deponien**: Von Klimaschutzmaßnahmen für Altdeponien bis zum Bedarf an neuen Deponien für gering belastete mineralische Abfälle, ISBN 978-3-939662-17-4.
- Band 29** **Altlasten 2016** - Aus Altlasten lernen – von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-18-1.
- Band 30** **Deponie und Altlasten 2016 - Planung und Bau neuer Deponien**: Zukünftige Deponiekapazitäten / mögliche Auswirkungen der Mantelverordnung - praktischer Umgang mit bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS). ISBN 978-3-939662-19-8.
- Band 31** **Altlasten 2017** - Aus Altlasten lernen – von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-20-4
- Band 32** **Deponie- und Altlasten 2017 - Planung und Bau neuer Deponien**: Schaffung neuen Deponieraums, Deponie auf Deponie, Deponierückbau, Umgang mit Natur- und Artenschutz. ISBN 978-3-939662-21-1.
- Band 33** **Altlasten 2018** - Aus Altlasten und Schadensfällen lernen – von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-22-8.
- Band 34** **Deponie- und Altlasten 2018 - Planung und Bau neuer Deponien**: Schaffung von neuem Deponieraum, Genehmigungsprozesse, Nachnutzung von Deponien, frei gemessene nicht-radioaktive Abfälle, Entlassung aus der Nachsorge. ISBN 978-3-939662-23-5.
- Band 35** **Altlasten 2019** - Aus Altlasten und Schadensfällen lernen – von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-24-2.
- Band 36** **Deponie- und Altlasten 2019 - Planung und Bau neuer Deponien**: Aktuelles aus Politik und Praxis, Deponie auf Deponie, Schaffung von neuem Deponieraum, Genehmigungsprozesse, Deponierückbau. ISBN 978-3-939662-25-9.
- Band 37** **Altlasten 2020** - Aus Altlasten und Schadensfällen lernen – von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-26-6.
- Band 38** **Deponie- und Altlasten 2020 - Planung und Bau neuer Deponien**. ISBN 978-3-939662-27-3.
- Band 39** **Altlasten 2021** - Aus Altlasten und Schadensfällen lernen – von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-28-0.
- Band 40** **Deponie- und Altlasten 2021 - Planung und Bau neuer Deponien**: Landschaftsbauwerke statt Deponien - Freimesung mineralischer Kernkraftwerksabfälle - Entsorgung asbesthaltiger Bauschutt - Klimaschutzmaßnahmen auf Deponien - Untertagedeponien. ISBN 978-3-939662-29-7.
- Band 41** **Altlasten 2022** - Aus Altlasten und Schadensfällen lernen – von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-30-3.
- Band 42** **Deponie- und Altlasten 2022 - Planung und Bau neuer Deponien**: Marktsituation und Marktmechanismen bei Deponien, Bemessung von Rekultivierungsschichten, Umgang mit PFC-verunreinigten Böden, Deponiekonzepte weltweit – Systemvergleiche, Stand der Technik bei der Untertageentsorgung. ISBN 978-3-939662-31-0.

- Band 43** **Altlasten 2023** - Aus Altlasten und Schadensfällen lernen  
– von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden-  
und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-32-7.
- Band 44** **Deponie- und Altlasten 2023 - Planung und Bau neuer  
Deponien:** Entwicklungen im Deponierecht, Genehmigungsprozesse, PFAS in der Umwelt, vom Deponie- zum Solarstandort, Illegale Abfallentsorgung im Ausland. ISBN 978-3-939662-33-4.
- Band 45** **Altlasten 2024** - Aus Altlasten und Schadensfällen lernen  
– von der Altlastensanierung zum vorsorgenden Boden-  
und Grundwasserschutz. ISBN 978-3-939662-34-1.

Erhältlich beim

ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt  
Auf der Breit 11, D-76227 Karlsruhe  
Tel: +49(0)721 / 94477-0  
E-Mail: [eigenverlag@icp-ing.de](mailto:eigenverlag@icp-ing.de)  
<https://icp-ing.de> oder im Buchhandel