



# In-situ-Immobilisierung mittels Kompost und Alkalische Hydrolyse bei Rüstungsallasten

Ergänzende Untersuchungen und Empfehlungen zur  
verfahrenstechnischen Umsetzung



# altlasten





# **In-situ-Immobilisierung mittels Kompost und Alkalische Hydrolyse bei Rüstungsaltslasten**

**Ergänzende Untersuchungen und Empfehlungen zur  
verfahrenstechnischen Umsetzung**



## Impressum

In-situ-Immobilisierung mittels Kompost und Alkalische Hydrolyse bei Rüstungsaltslasten – Ergänzende Untersuchungen und Empfehlungen zur verfahrenstechnischen Umsetzung

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg  
Tel.: 0821 9071-0  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: [www.lfu.bayern.de/](http://www.lfu.bayern.de/)

### Konzept/Text:

Carlo Schillinger, Martin Kahnt  
LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH  
Christian-Hessel-Str. 1  
90427 Nürnberg

### Redaktion:

LfU: Dr. Martin Biersack und Mira Reller

### Bildnachweis:

Alle Abbildungen: LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH, Christian-Hessel-Str. 1, 90427 Nürnberg

### Stand:

April 2024

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>8</b>
1.1	Veranlassung	8
1.2	Auftrag	8
1.3	Beteiligte Stellen	9
1.4	Verwendete Unterlagen	9
<b>2</b>	<b>Zusammenstellung der Gesamtproblematik</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Rechtlicher Rahmen</b>	<b>13</b>
4.1	Bodenschutzrecht	13
4.2	Wasserrecht	14
<b>5</b>	<b>Verfahrenstechnische Grundlagen</b>	<b>15</b>
5.1	Grundlagen und Wirksamkeit der Alkalischen Hydrolyse (AH)	15
5.2	Grundlagen und Wirkungsweise der In-situ-Immobilisierung mittels Kompost (IM)	17
<b>6</b>	<b>Untersuchung der Sanierungsstandorte Marktbergel und Boxbrunn</b>	<b>18</b>
6.1	Ehemaliger Sprengplatz Marktbergel	18
6.1.1	Standortbeschreibung und Historie des Sprengplatzes Marktbergel	18
6.1.2	Vorversuche und Sanierung des Sprengplatzes Marktbergel	19
6.1.3	Aktuelle technische Erkundungen in Marktbergel	21
6.1.3.1	Grund-, Sicker- und Oberflächenwasser	21
6.1.3.2	Rammkernbohrungen in Trichter T27 und T30	23
6.1.4	Chemische Untersuchung von Proben aus Marktbergel	24
6.1.4.1	Untersuchungsstellen und Untersuchungsumfang	24
6.1.4.2	Grund-, Sicker- und Oberflächenwasserproben	26
6.1.5	Folgerungen aus den Ergebnissen in Marktbergel	28
6.2	Ehem. Sprengplatz Boxbrunn	29
6.2.1	Standortbeschreibung Boxbrunn	29
6.2.2	Vorversuche und Sanierung des Sprengplatzes Boxbrunn	29
6.2.3	Aktuelle technische Erkundungen in Boxbrunn	30
6.2.4	Chemische Untersuchungen der Proben aus Boxbrunn	31
6.2.5	Folgerungen aus den Ergebnissen in Boxbrunn	33

---

6.3	Toxizitätsuntersuchungen Marktbergel und Boxbrunn	33
<b>7</b>	<b>Laborversuche zur In-situ Immobilisierung mittels Kompost</b>	<b>34</b>
7.1	Anforderungen an die Versuchsdurchführung	34
7.2	Versuchskonzept und -design	34
7.3	Auswahl des Kompostes	38
7.4	Versuchsablauf und Kompostspezifikation	39
7.5	Chemische Untersuchungen der Säuleneluat	45
7.5.1	Vorgehensweise	45
7.5.2	Ergebnisse der chemischen Untersuchungen	45
7.5.3	Wertediagramme der Versuchsreihe Immobilisierung mittels Komposts	50
7.5.4	Mischung der dotierten Lösungen mit Kompost-Eluat	56
7.6	Ergebnisse der Toxizitätsuntersuchungen	56
7.7	Folgerungen zu den Laborversuchen zur In-situ Immobilisierung	58
7.7.1	Minderungserfolg und Eignung des Kompostes	58
7.7.2	Chemisch-mikrobielle Prozesse in den Säulen	59
7.7.3	Toxizität der Versuchseluat	59
<b>8</b>	<b>Versuchsreihe mit Aktivkohle-Vlies „Tektoseal“</b>	<b>60</b>
8.1	Versuchskonzept	60
8.2	Versuchsdurchführung	62
8.3	Analytische Befunde aus der Versuchsreihe Aktivkohlevlies „Tektoseal“	62
8.4	Folgerungen	63
<b>9</b>	<b>Laborversuche zur ETV-Mobilisierung durch Kompost-Eluat</b>	<b>63</b>
9.1	Versuchskonzept	63
9.2	Untersuchung der Realproben aus Marktbergel	64
9.3	Versuchsdurchführung	64
9.4	Analytische Befunde aus der ETV-Mobilisierung	65
9.5	Folgerungen	66
<b>10</b>	<b>Folgerungen aus Grundlagenforschung und Laborversuchen</b>	<b>66</b>
<b>11</b>	<b>Faktoren zur Eignungsprüfung</b>	<b>67</b>
11.1	Alkalische Hydrolyse	67
11.2	In-situ Immobilisierung mittels Kompost	69

---

11.3	Auswahl des geeigneten Sanierungsverfahrens	70
<b>12</b>	<b>Handlungsanleitung Alkalische Hydrolyse</b>	<b>71</b>
12.1	Standortbezogene Eignungsprüfung	71
12.2	Vorversuche	71
12.3	Anforderungen an die Sanierungsdurchführung	73
12.4	Bauablauf	74
12.5	Erfolgskontrolle und Überwachung	77
<b>13</b>	<b>Handlungsanleitung In-situ-Immobilisierung mittels Kompost</b>	<b>77</b>
13.1	Standortbezogene Eignungsprüfung	77
13.2	Vorversuche	78
13.3	Anforderungen an die Sanierungsdurchführung	80
13.4	Bauablauf	81
13.5	Erfolgskontrolle und Überwachung	83
<b>14</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>84</b>
<b>15</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>86</b>

**Anhang 1: Checklisten für die Anwendbarkeit**

**Anhang 2: Flussdiagramm zur Anwendung der Alkalischen Hydrolyse auf einem ETV-belasteten Standort**

**Anhang 3: Flussdiagramm zur Anwendung der Immobilisierung mittels Kompost auf einem ETV-belasteten Standort**

## Abkürzungen

Tab. 1: Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen.

Abkürzung	Begriff
2-A-4,6-DNT	2-Amino-4,6-Dinitrotoluol
4-A-2,6-DNT	4-Amino-2,6-Dinitrotoluol
ADNT	Aminodinitrotoluol(e)
AH	Alkalische Hydrolyse
AK	Absorptionskoeffizient
BG	Bestimmungsgrenze
C1	N,N'-Diethyl- N,N'-Diphenylharnstoff (Centralit I)
DNP	Dinitrophenol
DNT	Dinitrotoluol
DOC	Dissolved organic carbon
DPA	Diphenylamin
DPU	Diphenylurethan
DU	Detailuntersuchung
GFS	Geringfügigkeitsschwellenwert
EPA	N-Ethyl-N-Phenylamin
EPU	N-Ethyl-N-Phenylurethan
ETV	Explosivstofftypische Verbindungen (Gesamtheit der Sprengstoff- und Pulvertypischen Verbindungen)
HMX	1,3,5,7-Tetranitro-2,4,6,8-Tetraazacyclohexan (Oktogen)
IM	Immobilisierung, hier Immobilisierung mittels Kompost
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
MHN	Meter über Normalhöhennull
MNX	Mononitroso-Hexogen
MP	Mischprobe
NDAB	4-Nitro-2,4-Diazabutanal
OU	Orientierende Untersuchung
PETN	Pentaerythrittetranitrat (Nitropenta)
PRB	Permeable reactive barrier
PTV	Pulvertypische Verbindungen
RDX	Hexahydro-1,3,5-Trinitro-1,3,5-Triazin (Hexogen)
STV	Sprengstofftypische Verbindungen
TNP	Trinitrophenol
TNT	2,4,6-Trinitrotoluol

## Vorwort

Nach wie vor existieren in Deutschland zahlreiche Nachkriegssprengplätze und Rüstungsalblaststandorte, für die aufgrund von erheblichen Mengen an Kampfmitteln und Explosivstofftypischen Verbindungen (ETV) im Boden ein Gefährdungspotenzial im Sinne des Bodenschutzrechts gegeben ist.

Die Sanierung der Sprengplätze mit herkömmlichen Sanierungsmethoden (Deponierung, thermische Behandlung) ist technisch anspruchsvoll und kostenintensiv. Auf der Suche nach alternativen, kostengünstigeren und wirksamen Verfahren für die Behandlung von ETV-belasteten Böden haben sich seit den 1990er Jahren zwei Varianten herauskristallisiert, die bereits an mehreren Standorten erfolgreich angewendet wurden: die Alkalische Hydrolyse (AH) und die In-situ-Immobilisierung mittels Kompost (IM).

Bei Anwendung der AH werden durch den Einsatz starker Laugen die ETV abgebaut und verlieren dabei ihre Schadwirkung. Die Behandlung erfolgt durch das Vermischen des belasteten Bodenmaterials mit geeigneten Alkalien in einem Behandlungsbecken. Die IM nutzt die Neigung vieler ETV, an organische Substanz (Huminstoffe) zu binden. Der Kompost wird durchmischt oder lagenweise zusammen mit dem belasteten Bodenmaterial wieder im Sanierungsbereich eingebaut. Die ETV werden mit der Zeit beim biologischen Abbau dieser Huminstoffe mineralisiert.

Die grundlegende Wirksamkeit beider Verfahren wurde bereits an Beispielstandorten gezeigt und mit begleitenden Untersuchungen bestätigt. So wurden ETV-Belastungen erfolgreich auf ehemaligen Sprengplätzen mittels AH und IM saniert.

Forschungsergebnisse liegen unter anderem zu Feld-, Minderungs- und Dauerbeladungsversuchen vor. Eine Empfehlung zur Anwendung der Verfahren ist bisher am Fehlen konkreter Handlungsempfehlungen zur Prüfung der Anwendbarkeit im Einzelfall und zur Qualitätssicherung bei der Durchführung gescheitert. Darüber hinaus sind Einschränkungen bei der Anwendung zu beachten.

Auf Grundlage der bisherigen Forschungsergebnisse und Erfahrungen aus den durchgeführten Sanierungen werden mit diesem Bericht die Rahmenbedingungen und Kriterien für eine erfolgreiche und effektive Anwendung definiert und die verfahrenstechnischen Kenngrößen ermittelt. Die hierzu erforderlichen Auswertungen und Untersuchungen wurden von der LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH, Nürnberg im Auftrag des LfU durchgeführt.

Die Bewertungsmatrix und die Flussdiagramme in den Anhängen dieses Berichts sind als „Leitplanken“ für Sanierungsmaßnahmen mittels AH bzw. IM zu verstehen. Die Auswahl des geeigneten Sanierungsverfahrens sowie zielführende, einzelfallspezifische Anpassungen der beschriebenen Vorgehensweisen sind im Rahmen der Sanierungsplanung mit den zuständigen Behörden abzustimmen.

# 1 Einführung

## 1.1 Veranlassung

Nach wie vor existieren in Deutschland zahlreiche Nachkriegssprengplätze und Rüstungsallastver-dachtsstandorte, die mit Explosivstofftypischen Verbindungen (ETV) belastet sind. Die Standorte sind teils mit erheblichen Mengen an Kampfmitteln und Rückständen aus deren Vernichtung (Sprengen, Verbrennen) belastet. Die Rückstände der Sprengstoffe, Treibmittel und Zusatzstoffe, die nach der Vernichtung im Boden verblieben sind, liegen partikulär und gelöst vor und haben durch die Mobilität und Toxizität vieler ETV ein hohes Gefährdungspotenzial.

Die Sanierung der Sprengplätze ist im Allgemeinen technisch anspruchsvoll und kostenintensiv. Herkömmliche Sanierungsmethoden sind Aushubmaßnahmen mit thermischer Behandlung des Bodens oder mit Verbringung auf eine geeignete Deponie. Alternativ werden Sprengtrichter mit Oberflächenabdichtungen oder kompletter Einkapselung gegen „Auslaugung“ gesichert. Die thermische Bodenbehandlung und Deponierung sind mit hohen Kosten verbunden, die aufgrund steigender Energiekosten und des Mangels an Deponiekapazität weiter steigen werden.

Auf der Suche nach alternativen kostengünstigeren und wirksamen Verfahren für die Behandlung von ETV-belasteten Böden haben sich seit den 1990er Jahren insbesondere zwei Varianten herauskristallisiert, die bereits an mehreren Standorten mit Erfolg Anwendung fanden: die Alkalische Hydrolyse und das Immobilisieren mit Kompost.

Bei Anwendung der Alkalischen Hydrolyse (AH) werden die ETV durch den Einsatz starker Laugen abgebaut und verlieren hierbei ihre Schädwirkung. Die AH läuft bis zu den chemischen Grundbausteinen und kommt damit einer Mineralisierung gleich. Die Immobilisierung mittels Komposts (IM) nutzt die Neigung vieler ETV, an organische Substanz (Huminstoffe) zu sorbieren bzw. über reduzierte Derivate (z. B. Aminonitrotoluole) an die Huminstoffe zu binden. Die durch diese Sorptionsprozesse immobilisierten Verbindungen werden beim biologischen Abbau der Huminstoffe (langfristig) ebenfalls mineralisiert und damit zerstört.

Die grundlegende Wirksamkeit beider Verfahren konnte bereits an einigen Standorten gezeigt und mit begleitenden Feld- und Laborversuchen bestätigt werden. Eine Empfehlung zur Anwendung der Verfahren ist aber bisher am Fehlen konkreter Handlungsempfehlungen zur Prüfung der Anwendbarkeit im Einzelfall und zur Qualitätssicherung bei der Durchführung gescheitert.

In dem Interesse, die Verfahren im Falle ihrer Eignung zur Sanierung von Sprengplätzen zu etablieren, sollten auf der Grundlage der bisherigen Forschungsergebnisse und der Erfahrungen aus den durchgeführten Sanierungen die Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche und effektive Anwendung definiert werden.

## 1.2 Auftrag

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU), Hauptstelle Augsburg (Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg), beauftragte die LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH am 01.07.2021 schriftlich mit der Durchführung der Grundlagenforschung zur Alkalischen Hydrolyse (AH) und Immobilisierung mittels Komposts (IM) für Explosivstofftypische Verbindungen. Ein Ergänzungsangebot der LGA für weiterführende Laborversuche wurde am 29.11.2021 beauftragt.

Die fachliche Leitung des Projekts erfolgte durch das Referat 96 (Altlasten, schädliche Bodenveränderungen, Sachverständige) des LfU Hof (Hans-Högn-Straße 12, 95030 Hof).

### 1.3 Beteiligte Stellen

Zur Erleichterung der Korrespondenz sind in der nachfolgenden Tab. 2 die beteiligten Stellen des Projekts aufgeführt.

Tab. 2: Projektbeteiligte

Funktion	Adresse
<b>Auftraggeber</b>	Bayerisches Landesamt für Umwelt Bürgermeister-Ulrich-Straße 160 86179 Augsburg
<b>Auftragnehmer</b> - Grundlagenforschung - Versuchsdurchführung mit Dokumentation und Bewertung - Abschlussbericht	LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH Christian-Hessel-Straße 1 90427 Nürnberg
Chemisches Labor - Analytik der chemisch-physikalischen Parameter - Versuchsdurchführung und -dokumentation	Chemisches Labor Dr. Graser Goldellern 5 97453 Schonungen
Speziallabor - Analytik der explosivstofftypischen Verbindungen und Metaboliten	Envilytix GmbH Rheingaustraße 190-196 65203 Wiesbaden
Referat 77: Biologische Analytik, ökotoxikologische Stoffbewertung - Durchführung der Biotests	Bayerisches Landesamt für Umwelt Bürgermeister-Ulrich-Straße 160 86179 Augsburg

### 1.4 Verwendete Unterlagen

Das Bayerische Landesamt für Umwelt stellte der LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH eine Zusammenstellung von Informationen und Berichten zu Sanierungsfällen und Forschungsprojekten zur Verfügung, hiervon genannt:

- Abschlussbericht IBH Weimar zur Forschungsarbeit „Immobilisierung und Alkalische Hydrolyse – Überprüfung der Langfristwirksamkeit von zwei alternativen Verfahren zur Behandlung ETV-belasteter Böden“, IBH Weimar, Freystadt, 19.03.2018 (IBH (2018))
- Kurzbericht des LfU mit Zusammenfassung der Projektergebnisse und Bewertung des Abschlussberichts der IBH Weimar vom 19.03.2018 zur Forschungsarbeit „Immobilisierung und Alkalische Hydrolyse“, September 2019 (LfU (2019))
- Fallbeispiele, Sanierungskonzepte, Ausführungsbeschreibungen und Abschlussberichte sowie zusammengestellte Informationen zu Sanierungen in Rattelsdorf, Boxbrunn, Marktbergel, Sinsbucher Forst, Mühldorfer Hart und Thansau
- Rechtliche Informationen zu den beiden Sanierungsverfahren AH und IM, zusammengestellt vom Bayerischen Landesamt für Umwelt, Referat 96, Juli 2021.

Des Weiteren wurden Unterlagen der LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH zu Vorversuchen, Sanierungs-, Abschlussberichten und Ausführungsbeschreibungen zu den Sanierungsstandorten Marktbergel und Boxbrunn herangezogen.

## 2 Zusammenstellung der Gesamtproblematik

In Deutschland existieren nach wie vor eine Vielzahl von Rüstungsalllastverdachtsstandorten, für die bodenschutzrechtlicher Sanierungsbedarf besteht. Hinsichtlich von Bodenkontaminationen mit Explosivstofftypischen Verbindungen (ETV) kommt die maßgebliche Bedeutung den Nachkriegssprengplätzen zu. Sie sind in der Regel mit den Sprengstofftypischen Verbindungen Trinitrotoluol (TNT) und seinen Hauptmetaboliten, den Aminodinitrotoluolen (ADNT), mit Hexogen (RDX) sowie mit Pulvertypischen Verbindungen (PTV) und Zusatzstoffen belastet. Fast immer handelt es sich damit um Kontaminationen mit einem vielfältigen Schadstoffspektrum.

Bei der Vernichtung von Kampfmitteln wie Panzergranaten, Infanteriemunition etc. werden die enthaltenen Sprengstoffe, Treibmittel und Zusatzstoffe niemals vollständig umgesetzt. Je nach Wirksamkeit der Umsetzung bleiben zwischen 0,01 % bis 1 % der ursprünglichen Sprengstoff- und Pulvermenge als Rückstand in Form von Sprengstoffbrocken und Pulverpartikeln sowie fein verteilt im Bodensubstrat zurück (LfU (2009)). Die Vernichtung großer Mengen an Munition auf solchen Sprengplätzen führte somit im Einzelfall zu hunderten Kilogramm ETV-Rückständen mit einem hohen Emissionspotenzial für die teilweise erheblich mit Wasser mobilisierbaren Verbindungen.

Eine Sonderrolle bei den mit ETV belasteten Flächen nehmen Standorte der Sprengstoffherstellung ein. Sie zeichnen sich oft durch ein wesentlich schmäleres Spektrum an Verbindungen aus als es auf Sprengplätzen vorliegt. Beispielhaft wurde dies an einem Standort der TNT-Herstellung im ersten Weltkrieg nachvollzogen (Thansau).

Für alle betroffenen Standorte ist von einer bodenschutzrechtlichen Gefährdung in den Wirkungspfaden Boden-Grundwasser, aber auch Boden-Mensch und (noch weitgehend unerforscht) Boden-Nutzpflanze auszugehen. Für Sprengplätze sind darüber hinaus die grundsätzlich von Kampfmitteln ausgehenden Gefahren zu beachten (siehe auch [StMI: Kampfmittelbeseitigung - Abwehr vor Gefahren durch Kampfmittel](#), Aufruf am 18.03.2024).

Eine Sanierung erfolgt in der Regel mit begleitender Entmunitionierung mittels Bodenaushub und Deponierung des ETV-belasteten Bodenmaterials oder mit einer thermischen Bodenbehandlung. Bei beiden Verfahren wird das Gefahrenpotenzial am Standort beseitigt. Allerdings ist dies mit hohen Kosten verbunden. Für eine thermische Behandlung sind Kosten von ca. 200 €/Tonne (steigend) anzunehmen. Eine Deponierung (Beseitigung) ist ebenfalls sehr kostenintensiv.

Seit 2012 wurden daher mit der Alkalischen Hydrolyse (AH) und der Immobilisierung mittels Kompost (IM) zwei alternative Behandlungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung getestet und exemplarisch mit Erfolg angewandt. Beide Verfahren stellen kostengünstigere Sanierungsmethoden gegenüber der thermischen Behandlung und Deponierung dar, womit sich Maßnahmen zur Gefahrenabwehr oft auch mit geringeren Gesamtkosten umsetzen lassen.

Bei der AH werden die meisten ETV durch eine starke Anhebung des pH-Werts auf mindestens pH 11 zerstört. Die pH-Wert-Erhöhung wird durch die Zugabe starker Laugen erreicht. Das Verfahren führt zu einer weitestgehenden Zerstörung der Verbindungen. Es ist vor allem für aromatische und heterocyclische Ringstrukturen von STV anwendbar, es ist jedoch nicht geeignet für Nitropenta sowie PTV (z. B. Centralit, EPU, DPU).

Bei der IM wird ausgenutzt, dass viele ETV an organischer Substanz in Form von Huminstoffen sorbieren bzw. über reduzierte ETV-Abbauprodukte (z. B. Aminonitrotoluole) irreversibel chemische Bindungen eingehen. Sie werden damit immobilisiert. Bei der Zersetzung des Komposts ist dann von einer vollständigen Mineralisierung (Abbau der organischen Verbindungen zu niedermolekularen organischen Bestandteilen und anorganischen Verbindungen) auszugehen. Der huminstoffreiche Kompost



dient bei der Sanierung als Adsorbens und wird in der Regel lagenweise mit dem ausgekofferten und entmunitionierten Bodenmaterial im Sanierungsbereich wiederverfüllt.

Nachfolgend werden exemplarisch einige der in Deutschland durchgeführten Forschungsarbeiten und Sanierungen genannt:

### Alkalische Hydrolyse

- Marktbergel, Sanierung eines temporären Sprengplatzes, der primär durch die Sprengung von 8,8-cm Panzergranaten mit Hexogen belastet war. Der pH-Wert des Bodens wurde in einem vor Ort angelegten, temporären Behandlungsbecken mittels Natriumhydroxid auf etwa 13 angehoben. Die Behandlung führte zu einer vollständigen Eliminierung der Ausgangskontaminanten. Der pH-Wert des behandelten Materials wurde im Nachgang wieder abgesenkt (zum Standort Marktbergel siehe auch Kapitel 6.1 und (LGA (2014))).
- Thansau, Sanierung einer ehemaligen TNT-Produktionsstätte. Der mit TNT und dessen Abbauprodukten ADNT, aber auch Trinitrophenol (TNP) und Dinitrophenol (DNP) belastete Boden wurde in temporären Behandlungsbecken mittels Alkalischer Hydrolyse behandelt. Die Maßnahme führte zu einer nahezu vollständigen Zerstörung der Nitroaromaten. Eine Nachbehandlung des Bodenmaterials erfolgte mittels Schwefelsäure zur pH-Wert-Absenkung und Kompost zur Bindung der Residuen. (LGA (2012c))

### In-situ Immobilisierung mittels Kompost

- Marktbergel, Sanierung von ETV-belastetem Bodenmaterial von einem Sprengfeld mit 40 Trichtern. Nach Vorversuchen zur grundlegenden Eignungsprüfung von Kompost für die vorgeschlagene Maßnahme wurde das Bodenmaterial nach Aushub und Entmunitionierung mit Zwischenlagen aus Kompost wieder eingebaut. Die Trichtersohle und -wände wurden ebenfalls mit Kompost ausgekleidet. Ein Monitoring belegt seitdem den weitgehenden Erfolg der Maßnahme. Einige Pulvertypischen Verbindungen (C1, DPU und EPU) werden jedoch nicht vollständig zurückgehalten. (LGA (2012a))
- Boxbrunn, Sanierung des ehem. Sprengplatzes Gönz. Der vorrangig mit TNT/ADTN und C1, DPU und EPU belastete Boden des Standorts wurde analog der Sanierung in Marktbergel mittels lagenweisem Einbau von Kompost behandelt. Die ETV wurden in hohem Maße gemindert, aber auch hier sind die oben genannten Pulverzusatzstoffe nach wie vor im Sicker- und Oberflächenwasser nachweisbar.

Vorbereitend zu den oben genannten Sanierungen wurden jeweils Vorversuche zur Eignung des Verfahrens durchgeführt (LGA (2012b)). Darüber hinaus liegen Daten aus einem Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben des LfU aus dem Jahr 2018 vor. Hier wurden unter anderem Beregnungsversuche, Minderungsratenversuche und Lysimeterversuche durchgeführt (IBH (2018)).

Es zeigte sich, dass beide Verfahren (IM und AH) für spezifische Bedingungen und Stoffspektren anwendbar sind, es aber einer detaillierten standortbezogenen Eignungs- und Machbarkeitsprüfung bedarf.

### 3 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens

Die Verfahren Alkalische Hydrolyse und Immobilisierung mittels Kompost haben bereits ihr Potenzial bewiesen, eine kosteneffiziente und wirksame Alternative zur Deponierung oder thermischen Behandlung ETV-belasteter Böden darzustellen. Es existieren jedoch bislang keine einheitlichen Vorschriften, Handlungsanleitungen oder Empfehlungen für die Anwendung der Verfahren im Vollzug des Bodenschutzrechts.

Ziel der vorliegenden Grundlagenforschung sollte es sein, die verfahrenstechnischen Kenngrößen für die Anwendung der beiden Verfahren zu definieren und eine Handlungsanleitung zu erstellen, die mit den geltenden Regelungen des Bodenschutzrechts konform ist. Auf dieser Grundlage kann ein Leitfaden für die Anwendung der Verfahren entstehen, der die Kenngrößen, Eignungskriterien und notwendigen Vorversuche für den jeweiligen Sanierungsstandort vorgibt. Dafür waren die bisher vorliegenden Forschungsergebnisse und Literaturdaten zu den beiden Verfahren aufzuarbeiten.

Darüber hinaus waren weitere Aspekte zu klären, die für eine einheitliche und reproduzierbare Anwendung notwendig sind. Die grundlegende Eignung der Verfahren ist belegt, allerdings sind sie je nach Stoffspektrum, Bodenbeschaffenheit, Grundwassersituation nicht gleichwertig wirksam und anwendbar.

So müssen unter anderem folgende Aspekte für die Eignung der Verfahren betrachtet werden:

- Bodenschutzrechtliche Auswirkungen der Sanierungen, da zwar bei erfolgreicher Anwendung der Maßnahmen die Explosivstofftypischen Verbindungen zerstört werden oder ihre Schadwirkung verlieren, aber gleichzeitig zum Teil massive physikalisch-chemische Eingriffe in den Boden und das Grundwasser stattfinden.
- Eignung der Verfahren auch bei den schlechter minderbaren Stoffen C1, EPU und DPU sowie Bewertungsgrundlagen für Metaboliten.
- Übertragbarkeit der Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Standorte und Rahmenbedingungen, z. B. welche Vorversuche sind notwendig, um die Eignung für den jeweiligen Standort festzustellen.

Ein Schwerpunkt der Forschung sollte darauf liegen, für die verfahrenstechnische Umsetzung der Immobilisierung mittels Kompost die maßgeblichen Grundlagen mit Laborversuchen zu ermitteln. Mit Säulenversuchen sollte spezifisch die Minderungsleistung eines geeigneten Komposts für Hexogen (RDX) und einige Pulvertypische Verbindungen (C1, DPU und EPU) untersucht werden. Die Ergebnisse sollten mit den spezifischen Eigenschaften des ausgewählten Kompostes in Bezug gesetzt werden.

Mit ergänzenden Versuchen war die optionale Fragestellung zu klären, ob das stark mit DOC angereicherte Sickerwasser aus einem mit Kompost sanierten Trichter ETV mobilisieren kann, die seit den zurückliegenden Sprengungen durch Sickerwasser in den Trichterboden und unterhalb des Trichters im Boden verlagert wurden. Hierzu sollte in Elutionssäulen ein Kompost-Eluat auf ETV-belastete Böden einwirken, wofür geeignete Realproben zu gewinnen waren.

Ergänzend waren die beiden Sanierungsstandorte Marktbergel und Boxbrunn zu untersuchen. Beide Nachkriegssprengplätze sind unter Anwendung des Verfahrens Immobilisierung mittels Kompost saniert worden. Eine Überwachung findet mittels Grundwassermessstellen und in Beweissicherungstrichtern statt. Ein aktueller Stand der ETV-Ergebnisse aus dem Grund-, Sicker- und Oberflächenwas-

ser der beiden Sprengplätze sollte weitere Aufschlüsse über den Langzeiterfolg der Maßnahmen liefern und klären, ob von den verbleibenden Stoffen und potenziellen Abbauprodukten Gefahren für das Grund- und Oberflächenwasser an den Standorten ausgehen.

Mittels Biotests an ausgewählten Grund-, Sicker- und Oberflächenwasserproben sowie Versuchseluaten sollten zusätzliche Erkenntnisse über die Toxizität der ETV-belasteten Wässer gewonnen werden.

Im vorliegenden Bericht ist die Bearbeitung der Aufgabenstellungen wie folgt strukturiert:

1. Verfahrensbeschreibung von AH und IM
2. Beschreibung der Sanierungsstandorte (Sprengplätze) Marktbergel und Boxbrunn, technische und chemische Untersuchungen von Grund-, Sicker- und Oberflächenwasser der beiden Standorte sowie Folgerungen aus den Ergebnissen
3. Darstellung und Beschreibung der durchgeführten Laborversuche:
  - Säulenversuche mit **kompostgefüllten Elutionssäulen** und ETV-dotierten Wässern (Untersuchung der Minderungsleistung),
  - Säulenversuche mit einem **Aktivkohle-Vlies** und ETV-dotierten Wässern (Untersuchung der Minderungsleistung),
  - Säulenversuche mit **ETV-belasteten Realproben und Kompost-Eluat** (Untersuchung einer potenziellen Mobilisation von ETV durch hohe Konzentration an gelösten organischen Verbindungen im Sickerwasser),
  - Biotests zur Untersuchung der Schadwirkung der Grund-, Sicker- und Oberflächenwasserproben sowie der Versuchseluate.
4. Folgerungen aus der Grundlagenforschung, Erfahrungen aus bereits durchgeführten Sanierungen, Forschungsarbeiten und Laborversuchen
5. Handlungsempfehlungen für die Anwendung im Vollzug des Bodenschutzrechts.

Für die Durchführung der standortbezogenen Eignungsprüfung wird eine Bewertungsmatrix bereitgestellt. Diese ist in Anhang 1 dargestellt.

## 4 Rechtlicher Rahmen

### 4.1 Bodenschutzrecht

Für die Erstellung des Grundlagenberichts wurden der LGA vom LfU bodenschutzrechtlichen Informationen zur AH und IM zur Verfügung gestellt.

Aus bodenschutzrechtlicher Sicht handelt es sich bei den angesprochenen Maßnahmen „Immobilisierung mittels Kompost“ und „Alkalische Hydrolyse“ um Sanierungsverfahren, also Gefahrenabwehrmaßnahmen nach dem BBodSchG, auf die die Regelungen des BBodSchG zur Gefahrenabwehr/Nachsorge anwendbar sind. Regelungen des Vorsorgebereichs, insbesondere zur Verwertung von Bodenmaterial bzw. dem Auf- und Einbringen von Materialien, finden hierauf grundsätzlich keine Anwendung. Daher kann die Zulässigkeit dieser Verfahren auch nicht an §§ 6-8 BBodSchV gemessen werden.

Die Anforderungen an Sanierungsmaßnahmen ergeben sich vielmehr bereits aus § 4 Absatz 3 BBodSchG, wonach Boden und Altlasten so zu sanieren sind, dass dauerhaft keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen.

Weitere Vorgaben für einzelne Sanierungsmaßnahmen macht das BBodSchG nicht; es unterteilt lediglich in Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen (§ 2 Absatz 7 BBodSchG).

Ergänzend zu den Regelungen des BBodSchG sieht § 17 BBodSchV vor, dass Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen gewährleisten oder wesentlich dazu beitragen müssen, dass durch die im Boden oder in Altlasten verbleibenden Schadstoffe und deren Umwandlungsprodukte dauerhaft keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit bestehen.

Auch für die Umlagerung von Bodenmaterial im Rahmen der Sanierung im Bereich derselben schädlichen Bodenveränderung oder Altlast verweist § 16 Absatz 5 BBodSchV lediglich auf § 4 Absatz 3 BBodSchG und damit auf die Maßstäbe der Gefahrenabwehr (dauerhaft keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit). Weitere Regelungen für den Einbau von Kompost im Rahmen von Sanierungsverfahren enthält das Bodenschutzrecht nicht.

## 4.2 Wasserrecht

### Immobilisierung mittels Kompost

Das Einbringen des Kompostes in die wassergesättigte Zone bzw. den Grundwasserschwankungsbereich ist gemäß § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG ein wasserrechtlich erlaubnispflichtiger Tatbestand, der nur dann im Einzelfall genehmigungsfähig wäre, wenn hierdurch eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit nicht zu besorgen ist (vgl. § 12 Abs. 1 Nr. 1 WHG i. V. m. § 3 Nr. 10, § 48 WHG).

Das Einbringen des Komposts in die ungesättigte Bodenzone kann ebenfalls einen wasserrechtlich erlaubnispflichtigen Tatbestand nach § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG darstellen. Die Genehmigungsfähigkeit ist im Einzelfall zu prüfen. Fertigkompost<sup>1</sup> ist gemäß der "(Bekanntmachung der bereits durch die oder auf Grund der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe eingestuftene Stoffe, Stoffgruppen und Gemische gemäß § 66 Satz 1 der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vom 1. August 2017)" nicht wassergefährdend (Kenn-Nummer in genannter Bekanntmachung: 7654). Es ist zu prüfen, ob der hier in Rede stehende Kompost der Beschreibung gemäß Kenn-Nummer 7654 entspricht. Bei Abweichung und entsprechendem Aggregatzustand ist davon auszugehen, dass es sich bei dem Kompost um ein allgemein wassergefährdendes festes Gemisch handelt.

### Alkalische Hydrolyse

Bei der AH handelt es sich um Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Entsprechend den bisherigen Vorgehensweisen wird bei der Behandlung des belasteten Bodenmaterials ein Erdbecken ausgehoben, gegen das Eindringen von Stoffen in den Bodenkörper bzw. das Grundwasser abgedichtet und mit einer Kontrolleinrichtung (Drainage unter der Abdichtung mit Kontrollschacht) versehen. Neben den verwendeten Alkalien ist vermutlich auch der nach der Behandlung zu neutralisierende Boden wassergefährdend.

Das Erdbecken ist eine ortsfeste und selbständig genutzte Einheit zur Behandlung eines wassergefährdenden Stoffs (verunreinigter Boden), ersatzweise zur Verwendung eines wassergefährdenden Stoffs (Lauge). Die AwSV gilt bei „ortsfesten Anlagen“ (Erdbecken) unmittelbar, da es sich gemäß § 2

---

<sup>1</sup> Fertigkompost: Hygienisierter und weitgehend ausgereifter Kompost (Rottegrad IV und V). Gemäß § 2 Nr. 4 Bioabfallverordnung BioAbfV (1998) handelt es sich somit um „Behandelten Bioabfall“.

Absatz 9 AwSV um eine Anlage zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen handelt. Weiterhin gelten die Anforderungen der AwSV an wassergefährdende Stoffe nur, wenn sie in einer Anlage zur Anwendung kommen.

Einwandige unterirdische Behälter für flüssige wassergefährdende Stoffe sind unzulässig (§ 17 Absatz 2 und Absatz 3 AwSV).

Grundsätzlich ist somit für beide Verfahren (AH und IM) immer eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und ein Wasserrechtsantrag zu stellen (siehe hierzu auch die entsprechenden Handlungsanleitungen in Kapitel 12 und Kapitel 13). Zu prüfen ist hierbei das Emissionspotenzial des sanierten Bodenmaterials und der eingebrachten Stoffe (hier z. B. Kompost), Auswirkungen der Eingriffe in den Bodenkörper oder die wassergesättigte Bodenzone sowie Auswirkungen einer potenziell erforderlichen Wasserhaltung (Tatbestand: Entnahme von Grundwasser).

## 5 Verfahrenstechnische Grundlagen

Seit den 1990er Jahren wird mit den Verfahren AH und IM als alternative Sanierungsmethoden experimentiert. Anstelle von Kompost wurden auch mit anderen organischen Substraten Versuche durchgeführt. Seit 2012 wird die Eignung der beiden Verfahren im Rahmen von Forschungs- und Pilotprojekten mit einer konkreten Anwendung auf Sanierungsstandorten genauer untersucht. Für eine Anwendung auf ehemaligen Sprengplätzen haben beide Verfahren gemein, dass sie im Rahmen einer Entmunitionierung der Sprengtrichter erfolgen können. Der mit ETV und Kampfmitteln belastete Boden wird ausgekoffert und – sofern möglich – mechanisch in einer Siebanlage oder auch händisch von Kampfmitteln und Sprengstoffresten befreit. Anschließend wird das Bodenmaterial wieder verfüllt oder gesichert eingebaut.

Aufgrund der verschiedenen Wirkungsweisen (Ringspaltung, Mineralisierung, Denitrierung, Metabolisierung, Physisorption und Chemisorption) wird im Zusammenhang mit dem Erfolg der Maßnahmen von ihrer Minderungsleistung gesprochen.

Im Forschungsbericht der IBH Weimar GmbH aus dem Jahr 2018 sind die Wirkungsweisen der Alkalischen Hydrolyse und der Immobilisierung mittels Kompost im Detail beschrieben (Sorptionsprozesse, chemische Bindungsformen, mikrobielle Abbauege). Im Folgenden werden die grundlegenden Wirkungsweisen zusammengefasst dargestellt.

### 5.1 Grundlagen und Wirksamkeit der Alkalischen Hydrolyse (AH)

Im Labormaßstab sowie bei Sanierungen konnte nachgewiesen werden, dass es bei einer starken Anhebung des pH-Werts zur Zerstörung von aromatischen (Nitroaromaten, TNT, ADNT, DNT) und heterocyclischen (RDX, MNX, HMX) Sprengstoffverbindungen kommt.

Die Anhebung des pH-Werts wird durch die Zugabe einer starken Lauge (z. B. Natriumhydroxid oder Calciumhydroxid) erreicht. Das Behandlungsmittel wird dem ausgehobenen, belasteten Boden trocken (z. B. in Form von Granulat) zugegeben und mit diesem vermischt. Nach dem Einmischen von Wasser, Auflösen des Granulats und Homogenisierung treten der gewünschte massive Anstieg des pH-Werts und eine exotherme Reaktion ein. Hierbei kann es zu einer Erwärmung des Materials um 5 bis 10 Grad Celsius kommen.

Die Behandlung des Bodens muss in einem dichten Behandlungsbecken erfolgen, um Gefahren für Personen und die Umwelt durch die Alkalien auszuschließen. Je nach Menge des anfallenden Bodenmaterials können Stahlmulden oder ein mit Kunststoffdichtungsbahn abgedichtetes Becken verwendet werden.

TNT wird bei der Reaktion auf direktem Wege vollständig zerstört. Es kommt zu einer Mineralisierung. Der Wirkungsmechanismus ist hierbei im Gegensatz zum Abbau von RDX, bei dem es zu einer Metabolitenbildung kommt, durch welche Nitrodiazabutanal (NDAB) entsteht, bekannt. Nach der Entfernung der Nitrogruppen findet eine Ringspaltung statt. Der pH-Wert muss dauerhaft über 10,5 eingestellt werden, da TNT sonst zur einer Polymerbildung neigt.

Die notwendige Reaktionszeit bis zur vollständigen Zerstörung der Moleküle von TNT und RDX sind Stunden bis Wochen, je nach Anfangskonzentration. Es zeigte sich, dass das Verfahren selbst bei hohen Konzentrationen von 10.000 µg/l (Summe STV) wirksam sein kann. Bei sprengplatzüblichen Konzentrationen von einigen Hundert Mikrogramm pro Liter werden lediglich einige Tage benötigt.

Prinzipiell steigt die Effektivität und sinkt die notwendige Behandlungsdauer,

- je niedriger die Ausgangskonzentration ist (eine Wirksamkeit ist aber bei jedem Kontaminationsgrad gegeben)
- je höher der pH-Wert eingestellt wird
- je höher die Umgebungstemperatur ist
- je besser das Material homogenisiert bzw. mit der Lauge durchmischt ist.

PETN (Nitropenta) und die pulvertypischen Verbindungen C1, EPU und DPU sind mittels AH nicht behandelbar.

Bei den vorgenannten Beispielen für die erfolgreiche Anwendung der AH kam es zu einer Minde-  
rungsleistung von 100 % für RDX (in Marktbergel) und TNT (in Thansau) und somit zu einer vollständigen Eliminierung des Emissionspotentials.

Die Behandlung stellt jedoch einen massiven Eingriff in die Bodenstruktur bzw. die Bodenfunktionen dar. Das Bodengefüge erhält durch die Vermischung mit der Lauge eine breiartige Konsistenz und wird vollständig zerstört. Durch die starke Verschiebung des pH-Werts erliegt ein Großteil der mikrobiellen Aktivität des Bodens. Hierdurch wird auch die Puffer- und Ausgleichsfunktion des Bodens beeinträchtigt.

Vor dem Wiedereinbau des entgifteten Bodens muss der pH-Wert deshalb mittels geeigneter Säuren wieder auf ein Niveau abgesenkt werden, das für Bodenorganismen nicht mehr schädlich ist (unter 10). Vor dem Wiedereinbau muss das Material dann im Sinne einer Bodenverbesserung mit organischem Material (Kompost, Torf) vermischt werden.

Die Eigenschaft des Bodens, mittels Sorption, mikrobiellem Abbau und Mineralisierung Restbelastungen zu immobilisieren und zu mindern, ist nach der Behandlung nicht mehr vorhanden bzw. tritt erst nach einem längeren Zeitraum (Monate bis Jahre) wieder ein. Durch den Eingriff kann es zu einer Mobilisierung von anderen Stoffen, wie z. B. Polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) oder Schwermetallen kommen. Vor dem Wiedereinbau sollte das behandelte Bodenmaterial im Sinne einer Emissionsabschätzung untersucht werden.

Das Verfahren ist technisch und hinsichtlich des Arbeitsschutzes aufwändig. Für den Standort muss eine Eignungsprüfung durchgeführt werden, wie sie in Kapitel 12.1 und im Anhang 1 beschrieben ist.

## 5.2 Grundlagen und Wirkungsweise der In-situ-Immobilisierung mittels Kompost (IM)

Schon seit dem Jahr 2008 ist bekannt, dass ein Zusammenhang zwischen dem Organikgehalt des Bodens und dem Rückhaltevermögen von sprengstofftypischen Verbindungen (STV) besteht. Seit 2012 wurden hierzu konkrete Forschungsanstrengungen zur Ausnutzung des Phänomens mit dem Einsatz von Kompost als Medium für Adsorptions- und Abbauprozesse unternommen.

STV, insbesondere TNT/ADNT binden an Huminstoffe (Humin- und Fulvosäuren) im Boden. Es kommt zu einer Immobilisierung der Verbindungen. Nach der Physisorption, welche bereits eine Minderung der STV-Konzentrationen im Sickerwasser bewirkt, führen insbesondere reduktive Prozesse zu einer Metabolisierung und Fixierung der Nitroaromaten. Sie unterliegen nachfolgend einem langsamen mikrobiellen Abbau und werden mit der Zeit bei der Zersetzung der Huminstoffe im Boden zusammen mit diesen mineralisiert, also vollständig in die Bestandteile  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{NO}_3^-$  zerlegt.

Für TNT/ADNT ist eine hohe Wirksamkeit belegt. RDX und vermutlich auch polare Nitroaromaten sind ebenfalls gut mittels IM behandelbar. Bei RDX findet vermutlich zumindest teilweise, wie bei der AH, eine biotische oder abiotische Metabolisierung zum dead-end-Produkt NDAB statt.

Für die pulvertypische Verbindungen C1 und DPU ist die Anwendung der IM ebenfalls hoch wirksam, für EPU dagegen nur eingeschränkt.

Die Wirksamkeit der Behandlung mittels IM hängt von den Kontaminanten, der Art des verwendeten Komposts und der Struktur des Bodengefüges ab. Der Boden muss eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit besitzen, gleichzeitig muss eine gewisse Kontaktzeit der ETV-Verbindungen im Sickerwasser mit dem Kompost gewährleistet sein. Für den weiteren mikrobiellen Abbau der Schadstoffe sind ebenfalls geeignete Bodeneigenschaften erforderlich.

Kompostart	Rottegrad
Kompostrohstoff	I
Frischkompost 1	II
Frischkompost 2	III
Fertigkompost 1	IV
Fertigkompost 2	V

Tab. 3:  
Rottegrade und Kompostarten

Je nach verwendetem Kompost liegen unterschiedliche Reinigungsleistungen vor. Frischkompost (siehe Tab. 3) weist eine höhere mikrobielle Aktivität auf und hat einen höheren Anteil an nicht umgesetztem Lignin und Lignocellulose. Er ist damit eher vergleichbar mit Rindenmulch bzw. Holz-Hackschnitzeln, wie sie in den USA im Rahmen von PRB-Verfahren (permeable reactive barrier) als Füllung von Schlitzwänden zur Abstomsicherung von ETV-Belastungen im Grundwasser verwendet wurden. Fertigkompost (Rottegrad IV bis V) ist stabilisiert und hygienisiert, die Humifizierung und damit Bildung der adsorptiven Huminstoffe ist bereits weiter vorangeschritten. Je nach Kompost und Stoffspektrum ist die Minderungsleistung somit sorptions- oder abbaudominiert.

Prinzipiell wird bei der Sanierung eines Sprengplatzes zunächst der belastete Boden aus Trichtern oder Sprengfeldern entmunitioniert und gesiebt. Anschließend wird das Material mit Lagen aus Kompost gesichert wieder eingebaut. Die Trichtersohle und -wände sollten ebenfalls mit einem Bett aus Kompost ausgekleidet werden.



Der Erfolg bzw. die Wirksamkeit lassen sich mit Laborversuchen überprüfen. In Feldversuchen bei der Sanierung von Sprengplätzen lässt sich dies nur mit einer Überwachung erreichen. Hierzu werden z. B. sanierte Trichter mit Probenahmerohren ausgerüstet. Zusätzlich sollten Grundwassermessstellen gebaut bzw. bestehende Messstellen beprobt werden. Auch Proben von nahen Oberflächengewässern sind ggf. in ein Monitoring einzubinden.

Wie auch bei der AH ist eine Eignungsprüfung für den jeweiligen Standort durchzuführen. Die Anwendung der IM bewirkt eine DOC- und Ammoniumfracht im Sickerwasser, deren bodenschutzrechtliche Auswirkungen geprüft werden müssen.

Vorversuche zur Eignung des Komposts sind unbedingt erforderlich. Es muss beachtet werden, dass sich die Kompostzusammensetzung von Anlage zu Anlage und von Jahreszeit zu Jahreszeit ändert. Zwischen Vorversuchen und Sanierungsausführung können Monate liegen, was dazu führen kann, dass eine Eignung eines Komposts bescheinigt wird, der unter Umständen zum Zeitpunkt der Sanierung nicht mehr gegeben ist. Näheres zu den notwendigen Vorversuchen und Kriterien für die Eignungsprüfung wird in Kapitel 11 erläutert.

Eine In-situ Immobilisierung mittels Komposts stellt gleichzeitig eine Sicherungs- und Sanierungsmaßnahme dar, da mit Einbau von Lagen aus Kompost Schadstoffe einerseits zurückgehalten werden (Immobilisation), andererseits aber auch durch mikrobielle Prozesse zerstört werden.

## **6 Untersuchung der Sanierungsstandorte Marktbergel und Boxbrunn**

### **6.1 Ehemaliger Sprengplatz Marktbergel**

#### **6.1.1 Standortbeschreibung und Historie des Sprengplatzes Marktbergel**

Der Sprengplatz Marktbergel befindet sich in Westmittelfranken zwischen Bad Windsheim und Ansbach auf einem Höhenniveau von etwa 356 m NHN. Das nahezu ebene Gelände wird landwirtschaftlich genutzt. Geologisch gesehen liegt der Sprengplatz im Übergangsbereich zwischen Mittlerem und Unterem Keuper. Der Grundwasserflurabstand beträgt circa fünf Meter.

In den Jahren 1946 und 1947 vernichtete ein deutsches Sprengkommando unter US-Aufsicht große Mengen an Munition durch Sprengen. Es entstand ein Trichterfeld mit insgesamt 40 Sprengtrichtern, die einen Durchmesser von rund 15 m und eine Tiefe von rund 5 m besitzen. Vernichtet wurden unter anderem Spreng- und Panzergranaten (meist 8,8-cm Panzergranaten), Munitionsteile, Leuchtpurätze, Infanterie- und Bordwaffenmunition (Gemeinde Illesheim (2014)). Es wird von etwa 4.000 t an Kampfmitteln ausgegangen. Damit war gemäß der Arbeitshilfe des LfU (LfU (2009)) mit rund 400 kg an nicht umgesetztem Sprengstoff zu rechnen, die im Untergrund des Sprengplatzes verblieben sind.

Nach einer manuellen Kampfmittelräumung in den 1950er Jahren wurde der Sprengplatz im Jahre 2009 im Rahmen einer Orientierenden Altlastenerkundung mittels Baggerschürfen und Oberflächenmischproben untersucht. Zudem wurden vier Grundwassermessstellen gebaut. Das Grundwasser erwies sich als stark mit TNT/ADNT und untergeordnet mit RDX belastet. Der Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser war hinreichend bestätigt.



Eine Detailerkundung im Jahr 2011 bestätigte das Vorliegen einer Gefahr für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser. Es bestand Sanierungsbedarf. In den Jahren 2011 bis 2013 wurde der Sprengplatz oberflächennah endmunitioniert.

Die Trichter erwiesen sich als stark mit Kampfmitteln belastet. Ab 2012 wurden Forschungsanstrengungen unternommen, um eine kostengünstige Sanierungsmethode zu finden, die mit der Endmunitionierung der Sprengtrichter kombiniert werden konnte.

Nach Vorversuchen im Jahre 2012 erwies sich die Immobilisierung mittels Komposts als geeignete Sanierungsmethode als Ersatz für die „klassischen“ und kostenintensiven Verfahren der Deponierung, thermischen Behandlung oder des Baus einer Oberflächenabdeckung. Neben den Versuchen zur Immobilisierung wurden auch Untersuchungen zur Anwendung der Alkalischen Hydrolyse angestellt.

### 6.1.2 Vorversuche und Sanierung des Sprengplatzes Marktbergel

#### Durchführung der Vorversuche

Für die Vorversuche zur Immobilisierung mittels Komposts wurden Realproben aus Marktbergel verwendet, die mittels Bagger aus Sprengtrichtern gewonnen wurden. Das Ausgangsmaterial wurde mittels 1:1 Eluat auf den Gehalt an ETV überprüft. Während im Rahmen der OU und der DU TNT/ADNT und RDX als primäre Kontaminanten ermittelt wurden, stellten sich bei der Untersuchung der gewonnenen Realproben PETN und C1, EPU und DPU als vorherrschend heraus. RDX und die ADNT waren in geringerem Umfang nachweisbar. Dies hatte Einfluss auf die Wirksamkeit und Anwendbarkeit der beiden Methoden AH und IM.

In insgesamt sechs Auslaufsäulen aus Stahl wurden unterschiedliche Füllzusammensetzungen eingebaut:

- „pur“ (ausschließlich belastetes Bodenmaterial): 2 Säulen,
- belastetes Bodenmaterial + Kompost: 1 Säule vermischt, 1 Säule lagenweise geschichtet,
- belastetes Bodenmaterial + Kalkhydrat als Lauge: 1 Säule vermischt, 1 Säule lagenweise geschichtet.

Von oben wurde Wasser aufgegeben, das unten austretende Eluat wurde auf ETV analysiert.

Das Bodenmaterial wurde vor Versuchsbeginn homogenisiert und mit Wasser vermischt, so dass sich eine breiartige Konsistenz entwickelte. Dies verringerte die Durchlässigkeit jedoch stark. Die Auslaufsäulen konnten zunächst nicht durchsickert werden, so dass sie nach oben verlängert werden mussten (durch Aufsatz von weiteren Säulen) um den hydrostatischen Druck des aufgegebenen Wassers zu erhöhen. Die Mengen an gewonnenem Eluat waren dennoch sehr gering, obwohl zwischendurch versucht wurde, das Material in den Säulen mechanisch zu lockern. Zudem traten Setzungen auf.

Die Bodenbehandlung mittels Alkalischer Hydrolyse erwies sich als nicht, oder nur sehr eingeschränkt geeignet um PETN, C1 und die beiden Urethane EPU und DPU zu mindern. Die Immobilisierung mittels Komposts eliminierte dagegen die Schadstofffracht für beide Stoffgruppen gleichermaßen. TNT, ADNT, RDX, DPU und PETN konnten vollständig zurückgehalten werden. Beim EPU betrug die Minderungsleistung lediglich 39 %.

Es war kein nennenswerter Unterschied zwischen lageweisem Einbau oder Durchmischung mit Kompost zu beobachten. Auf Grundlage der durchgeführten Versuche konnte die IM als geeignete Sanierungsmethode für den Sprengplatz Marktbergel empfohlen werden.

### Sanierung des Trichterfeldes

Die Sanierung wurde in der zweiten Hälfte des Jahres 2013 durchgeführt. Nach Räumung, Entmunitonierung und Nachsondierung der Sprengtrichter wurde Kompost der beiden Kompostierungsanlagen Erlbach und Illesheim in jedem Trichter zunächst auf der Sohle in einer Schichtstärke von etwa 50 cm angelegt und an den Wänden – soweit möglich – in rund 20 bis 30 cm Schichtdicke hochgezogen. Danach erfolgte der verdichtete Einbau von Trichtermaterial, das von Kampfmitteln befreit war in vier bis fünf Lagen und in Schichtdicken von etwa 50 bis 100 cm. Auf jeder Bodenschicht wurde eine Kompostlage in einer Schichtstärke von 20 cm unverdichtet eingebaut. Die Abdeckung der Trichterwandung mit Kompost wurde sukzessive mit der Verfüllung mit hochgezogen, um zu verhindern, dass Stauwasser auf den Bodenschichten ohne Kontakt mit Kompost entlang der Trichterwände versickern kann.

Insgesamt wurden 2.000 t Kompost zusammen mit den ca. 60.000 t an belastetem Bodenmaterial eingebaut. Durch den Raumbedarf des Kompostes bedingt mussten einige Trichter seitlich vergrößert werden (Ausweichtrichter), um das insgesamt wieder einzubauende belastete Bodenmaterial aufnehmen zu können. Der unbelastete Aushub des Erweiterungsbereichs wurde auf die verfüllten Trichter und das Trichterumfeld aufgebracht und anschließend mit dem vorab abgeschobenen Oberboden abgedeckt.

Mit Feldversuchen zur Bestimmung der Sanierungsleistung konnte schon kurzfristig eine Reduzierung der Schadstofffracht im Sickerwasser von mehr als 90 % ermittelt werden. Damit war die Gefahr für das Schutzgut Grundwasser beseitigt.

Die Trichter T27 und T30 wurden als Beweissicherungstrichter ausgebaut und mit einem Probenamrohr versehen. An diesen Kontrollrohren, an den fünf Grundwassermessstellen B1 bis B5 sowie am westlich verlaufenden Schlüppbach lief im Nachgang das notwendige Monitoring zur Erfolgskontrolle der Sanierung.

### Sanierung des temporären Sprengplatzes

Im Rahmen der Entmunitonierung mussten insgesamt 1.453 Stück transportunfähige Granaten (vor allem 8,8-cm Panzergranaten mit vorgespannten Aufschlagzündern) vor Ort vernichtet werden. Hierzu wurde ein temporärer Sprengplatz im Nordwesten des Trichterfelds angelegt. Durch die Vernichtung entstand eine hohe Belastung des Bodens mit RDX-Rückständen aus der Füllung der Panzergranaten sowie aus den Hohlladungen, die zur Vernichtung verwendet worden waren. Aufgrund der hohen Konzentration von einigen hundert bis tausend µg/l im Eluat an dem erheblich mobilisierbaren und damit grundwassergefährdenden Hexogen waren Maßnahmen erforderlich.

Da im Gegensatz zum behandelten Trichterfeld mit seinem breiten ETV-Spektrum beim temporären Sprengplatz eine „Mono“-Belastung mit RDX vorlag und weil für die Eliminierung von RDX bei den Vorversuchen mittels AH gute Ergebnisse erzielt worden waren, wurde zur Sanierung des temporären Sprengplatzes diese Sanierungsvariante gewählt.

Das Bodenmaterial des hoch belasteten Kernbereichs des Sprengplatzes (ca. 600 m<sup>3</sup>) wurde in einem eigens hierfür gebauten, mit Folien ausgekleideten Behandlungsbecken mit insgesamt 20 t Natriumhydroxid vermischt. Phasenweise wurde Wasser zugegeben und das Material unter Zuhilfenahme eines Baggers homogenisiert. Der pH-Wert erreichte Werte um pH 13. Während der Reaktionsphase erwärmte sich das Material um etwa 5 Grad Celsius. Nach einer Woche Behandlungsdauer waren die Hexogenkonzentrationen von über 1.100 µg/l (1:1 Eluat) auf Werte unter der Bestimmungsgrenze gefallen. Die Reinigungsleistung der Maßnahme lag bei 100 Prozent.

Das behandelte Bodenmaterial wurde anschließend mit nur gering belastetem Material des sogenannten Peripheriebereichs des Sprengplatzes vermischt, womit sich der pH-Wert auf 11,5 senken ließ. Anschließend wurde dieses Gemisch auf einer 30 cm dicken Kompostlage auf dem Gelände aufgebracht und mit weiteren 20 cm Kompost bedeckt. Der Kompost diente als Pufferschicht für das zunächst stark alkalische Sickerwasser. Binnen 1,5 Jahren sank der pH-Wert im Boden wieder auf pH 8.

### 6.1.3 Aktuelle technische Erkundungen in Marktbergel

#### 6.1.3.1 Grund-, Sicker- und Oberflächenwasser

Die Grundwassermessstellen, Beweissicherungstrichter und Probenahmestellen für Oberflächenwasser in Marktbergel waren im Verlauf der vom LfU beauftragten technischen Erkundungen drei Mal in einem Zeitabstand von 4 bis 6 Wochen zu beproben.

Die erste Beprobung fand am 08.09.2021 statt. Die weiteren Beprobungen wurden am 06.10.2021 und am 03.11.2021 durchgeführt. An folgenden Stellen wurden Proben entnommen:

- Grundwassermessstellen B1 bis B5 (Grundwasser),
- Beweissicherungstrichter T27 und T30 (Sickerwasser),
- Schlüppbach (Oberflächenwasser).

Nachfolgende Abbildungen geben einen Eindruck von der Beprobungskampagne:



Abb. 1: Ehem. Sprengplatz Marktbergel, Beweissicherungstrichter T30.



Abb. 2: Trichter T30, Blick ins Probenahmerohr (Kontrollrohr).



Abb. 3: Sickerwasser aus Trichter T30.



Abb. 4: Grundwassermessstelle B5.





Abb. 5: Probe Schlüppbach.



Abb. 6: Beweissicherungstrichter T27.

Die Probenahmen wurden von einem Mitarbeiter der Untersuchungsstelle der LGA vorgenommen. Die Tiefe des Ruhewasserspiegels wurde unmittelbar vor der Probenahme mittels Lichtlot festgestellt. Anschließend wurden das Grund- und Sickerwasser in den Messstellen und Beweissicherungstrichtern mit einer Unterwasserpumpe abgepumpt.

Der Abpumpvorgang wurde über die Leitkennwerte Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, und Sauerstoffgehalt überwacht. Die Entnahme der Grundwasserprobe erfolgte nach 30 Minuten bei Konstanz der Leitwerte über einen Zeitraum von 5 Minuten.

Unter dem Begriff „Konstanz der Leitwerte“ wurden folgende Schwankungsbreiten der Messwerte toleriert:

- Leitfähigkeit:  $\pm 0,5 \%$
- Temperatur:  $\pm 0,1 \text{ K}$
- pH-Wert:  $\pm 0,1$
- Sauerstoffgehalt:  $\pm 0,1 \text{ mg/l}$

Die LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH ist für die Probenahme von Umweltproben akkreditiert (D-PL-14256-01-00).

Die Probenahme mit allen vor Ort gemessenen Parametern, Angaben zur Probenbehandlung und Probenkonservierung sowie die Daten der Messstelle wurden in den Probenahmeprotokollen festgehalten.

Das Grundwasser der fünf beprobten Messstellen wies pH-Werte zwischen 6,5 und 7 auf. Die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten bewegten sich zwischen  $1.500 \mu\text{S/cm}$  und  $2.300 \mu\text{S/cm}$ .

Der Schlüppbach konnte insgesamt nur zwei Mal beprobt werden. Bei der vorgesehenen dritten Probenahme am 03.11.2021 führte der Bach kein Wasser.

Das Sickerwasser in den Trichtern T27 und T30 war im Gegensatz zum beprobten Grundwasser (klar oder stark grau getrübt in B5) grau-braun gefärbt und stark getrübt. Die Proben wiesen einen schwachen unspezifischen Geruch auf. Abb. 3 gibt einen Eindruck des beprobten Trichter-Sickerwassers.

Das chemische Milieu des Sickerwassers in Trichter T27 bewegte sich im neutralen Bereich mit pH-Werten zwischen 6 und 7. Die Leitfähigkeit bei der ersten Beprobung am 06.10.2021 war mit

510  $\mu\text{S}/\text{cm}$  gering. Am 03.10.2021 und am 03.11.2021 lagen die Leitfähigkeiten bei etwa 2.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und 2.400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Das Sickerwasser in Trichter T30 wies elektrische Leitfähigkeiten von rund 5.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bis rund 6.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf, die einhergehen mit hohen Konzentrationen an DOC und Ammonium.

Die Proben wurden nach der Beprobung dunkel und gekühlt zu den Untersuchungslaboren transportiert.

### 6.1.3.2 Rammkernbohrungen in Trichter T27 und T30

Für die Bearbeitung der optionalen Fragestellung, ob durch stark DOC-beaufschlagtes Sickerwasser verlagerte ETV-Kontaminationen mobilisiert werden können, wurden am 18.11.2021 Rammkernbohrungen in den beiden sanierten Sprengtrichtern T27 und T30 des ehemaligen Sprengfelds am Standort Marktbergel durchgeführt.

Die Trichter wurden jeweils mit drei Rammkernbohrungen vollständig bis zum natürlichen Untergrund durchteuft. Hierbei wurden in Trichter T27 bis zu vier Lagen aus belastetem Bodenmaterial und Kompost angetroffen und beprobt. In Trichter T30 wurden bis zu fünf Lagen erfasst. Die Abb. 7 bis Abb. 10 geben einen Eindruck der Bohrungen vor Ort. Klar zu erkennen ist die Schichtung des belasteten Bodenmaterials im Wechsel mit Lagen aus Kompost.

Der Kompost weist nach wie vor das typische Erscheinungsbild von Kompost auf. Im erbohrten Bodenmaterial waren an vielen Stellen Rückstände der Sprengstoffe zu erkennen. In Abb. 10 ist ein roter Sprengstoffbrocken (Bohrung Trichter T30) erkennbar. Es handelt sich hierbei um phlegmatisiertes Nitropenta, das mit Sudanrot eingefärbt ist.



Abb. 7: Ehem. Sprengplatz Marktbergel bei Trichter T30.



Abb. 8: Bohrkern Rammkernbohrung Trichter T30 mit erkennbarer Schichtung.



Abb. 9: Lage aus Kompost.



Abb. 10: Nitropenta-Brocken (PETN).

Aus den Bohrungen wurden Proben des belasteten Bodenmaterials und der Kompostlagen für die Untersuchung der optionalen Fragestellung gewonnen. Die Bohrlöcher wurden anschließend mit Quellton-Pellets verfüllt. In den nachfolgenden Tabellen Tab. 4 und Tab. 5 sind die entnommenen Proben aufgelistet:

Reihe T27-1	Reihe T27-2	Reihe T27-3
T27-1 B1	T27-2 B1	T27-3 B1
T27-1 B2	T27-2 B2	T27-3 B2
T27-1 B3	T27-2 B3	T27-3 B3
T27-1 B4	T27-2 B4	T27-3 B4

Tab. 4: Bezeichnungen der entnommenen Bodenproben aus Trichter T27, Marktbergel.

Reihe T30-1	Reihe T30-2	Reihe T30-3
T30-1 B1	T30-2 B1	T30-3 B1
T30-1 B2	T30-2 B2	T30-3 B2
T30-1 B3	T30-2 B3	T30-3 B3
T30-1 B4	T30-2 RSP Nat. B.	
T30-1 B5		

Tab. 5: Bezeichnungen der entnommenen Bodenproben aus Trichter T30, Marktbergel.

## 6.1.4 Chemische Untersuchung von Proben aus Marktbergel

### 6.1.4.1 Untersuchungsstellen und Untersuchungsumfang

Auftragsgemäß waren die Grund-, Sicker- und Oberflächenwasserproben auf die Spreng- und Pulvertypischen Verbindungen gemäß der nachfolgenden Tabellen Tab. 6 und Tab. 7 zu untersuchen. Die von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA 2016) definierten Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) und die vorläufigen GFS des LfU für das Grundwasser sind mit angegeben. Ergänzend sollten die in Tab. 8 genannten Basisparameter die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Proben und später der Versuchseluate charakterisieren.



<b>Sprengstofftypische Verbindungen (STV)</b>	<b>GFS</b>
2,4,6-Trinitrotoluol (TNT)	0,2 µg/l
2-Amino-4,6-Dinitrotoluol (2-A-4,6-ADNT)	0,2 µg/l
4-Amino-2,6-Dinitrotoluol (4-A-2,6-ADNT)	0,2 µg/l
1,3,5-Trinitrobenzol (TNB)	8 µg/l
1,3-Dinitrobenzol (DNB)	0,3 µg/l
3,5-Dinitroanilin (3,5-DNA)	0,1 µg/l <sup>2</sup>
2,4-Dinitrotoluol (2,4-DNT)	0,05 µg/l
2,6-Dinitrotoluol (2,6-DNT)	0,05 µg/l
1,3,5,7-Tetranitro-2,4,6,8-tetraazacyclohexan (Oktogen - HMX)	175 µg/l
Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin (Hexogen - RDX)	1 µg/l
Pentaerythrittetranitrat (Nitropenta - PETN)	10 µg/l

Tab. 6:  
Untersuchungsparameter **STV**  
mit zugeordneten Geringfügig-  
keitsschwellenwerten (GFS)

Tab. 7: Untersuchungsparameter **PTV** mit zugeordneten Geringfügigkeitsschwellenwerten (GFS)

<b>Pulvertypische Verbindungen (PTV)</b>	<b>GFS</b>
N-N'-Diethyl-N-N'-diphenylharnstoff (Centralit I – C1)	∑ Centralite+Akardite 15 µg/l <sup>2</sup>
N-N'-Dimethyl-N-N'-diphenylharnstoff (Centralit II – C2)	∑ Centralite+Akardite 15 µg/l <sup>2</sup>
N,N'-Diphenylharnstoff (Akardit I)	∑ Centralite+Akardite 15 µg/l <sup>2</sup>
N-Methyl-N',N'-diphenylharnstoff (Akardit II)	∑ Centralite+Akardite 15 µg/l <sup>2</sup>
N-Ethyl-N-phenylurethan (EPU)	∑ DPU + EPU 0,1 µg/l <sup>2</sup>
N,N-Diphenylurethan (DPU)	∑ DPU + EPU 0,1 µg/l <sup>2</sup>
Diphenylamin (DPA)	1,2 µg/l <sup>3, 2</sup>
N-Ethyl-N-phenylamin (EPA)	-

<sup>2</sup> kursiv: vorläufige GFS / Prüfwerte des LfU

<sup>3</sup> ∑ DPA + NDPA (Nitrodiphenylamin)

<b>Basisparameter</b>
Färbung
Trübung
Geruch
Temperatur
Elektr. Leitfähigkeit
Redox-Spannung
pH-Wert
Sauerstoffgehalt (O <sub>2</sub> )
Eisen, gesamt (Fe)
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )
Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )
Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )
DOC
Spektr. Absorptionskoeffizient 436 nm <sup>4</sup>
Spektr. Absorptionskoeffizient 245 nm <sup>5</sup>
Arsen (As)
Antimon (Sb)
Blei (Pb)
Cadmium (Cd)
Chrom (Cr)
Nickel (Ni)
Quecksilber (Hg)
Zink (Zn)

Tab. 8:  
Untersuchte Basisparameter

Die Untersuchungen der Basisparameter führte das Chemische Labor Dr. Graser (CLG) in Schonungen (Reg. Nr. D-PL-18015-01-00) als Kooperationspartner der LGA für Umweltanalytik in unserem Auftrag durch.

Die Analytik der Explosivstofftypischen Verbindungen führte das Labor Envilytix GmbH in Wiesbaden durch.

Die Toxizitätsuntersuchungen (Biotests) wurden vom Referat „Biologische Analytik, ökotoxikologische Stoffbewertung“ des LfU durchgeführt.

#### **6.1.4.2 Grund-, Sicker- und Oberflächenwasserproben**

Schwermetalle und Arsen erwiesen sich in allen untersuchten Proben als analytisch unauffällig. Fast alle Parameter blieben unterhalb der Bestimmungsgrenzen (BG).

Die Gehalte an Ammonium, Eisen und Nitrat können mit den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) in Relation gesetzt werden.

<sup>4</sup> Adsorption in sichtbarem Licht; Maß für die Färbung der Wasserprobe

<sup>5</sup> Adsorption in ultraviolettem Licht; Maß für organische Inhaltsstoffe



Überschreitungen der (vorläufigen) Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) für die ETV-Parameter (Tab. 6 und Tab. 7) sowie erhöhte Konzentrationen an DOC, Eisen, Nitrat und Ammonium sind farbig hinterlegt.

Tab. 9: Relevante Stoffnachweise Marktbergel. 1. Probenahme am 08.09.2021.

Parameter	RDX	TNT	4-A-2,6-DNT	2-A-4,6-DNT	EPU	DPU	C1	DOC	NH <sub>4</sub>	Fe	NO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>
<i>Einheit</i>	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
<i>GFS</i>	1,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	15,0	-	-	-	-	-
<i>TrinkwV</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,2	50,0	-
<b>PN-Stelle</b>												
B1	1,99	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	2,2	0,32	< 0,01	46,4	0,4
B2	0,11	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	1,3	0,06	0,03	9,6	0,8
B3	4,01	< BG	0,1	< BG	< BG	< BG	< BG	1,4	0,03	< 0,01	85,4	5,4
B4	2,4	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	1,6	0,07	0,03	39,3	3,6
B5	0,18	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,5	1,4	< 0,1	2,9	7,6
T27	5,09	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	14,1	1,2	1,3	< 0,5	0,6
T30	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,6	306,0	64,0	21,0	4,8	1,2
Schlüppbach	0,16	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	1,4	0,02	< 0,01	135,0	9,5

Tab. 10: Relevante Stoffnachweise Marktbergel. 2. Probenahme am 06.10.2021.

Parameter	RDX	TNT	4-A-2,6-DNT	2-A-4,6-DNT	EPU	DPU	C1	DOC	NH <sub>4</sub>	Fe	NO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>
<i>Einheit</i>	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
<i>GFS</i>	1,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	15,0	-	-	-	-	-
<i>TrinkwV</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,2	50,0	-
<b>PN-Stelle</b>												
B1	1,13	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	1,0	0,56	0,01	29,80	1,7
B2	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< 0,5	0,06	0,02	7,5	0,6
B3	0,31	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< 0,5	0,31	< 0,01	19,4	1,7
B4	2,1	< BG	0,1	< BG	< BG	< BG	< BG	0,6	0,08	0,04	30,2	3,3
B5	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< 0,5	1,2	< 0,01	0,7	6,3
T27	< BG	< BG	< BG	< BG	3,92	< BG	0,35	23,3	28,0	9,4	< 0,5	0,7
T30	< BG	< BG	< BG	< BG	1,52	< BG	0,77	349,0	73,0	23,0	4,8	0,4
Schlüppbach	0,1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	1,70	0,07	0,07	132,0	8,1

Tab. 11: Relevante Stoffnachweise Marktbergel. 3. Probenahme am 03.11.2021. Im Schlüppbach keine Beprobung möglich, da trocken (keine Wasserführung).

Parameter	RDX	TNT	4-A-2,6-DNT	2-A-4,6-DNT	EPU	DPU	C1	DOC	NH <sub>4</sub>	Fe	NO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>
Einheit	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
GFS	1,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	15,0	-	-	-	-	-
TrinkwV	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,2	50,0	-
<b>PN-Stelle</b>												
B1	<b>0,38</b>	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>0,7</b>	<b>0,63</b>	<b>0,01</b>	<b>20,7</b>	<b>0,6</b>
B2	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>0,6</b>	<b>0,06</b>	<b>0,01</b>	<b>8,0</b>	<b>0,4</b>
B3	<b>0,11</b>	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< 0,5	<b>0,57</b>	<b>0,01</b>	<b>8,3</b>	<b>0,7</b>
B4	<b>1,66</b>	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>0,8</b>	<b>0,09</b>	<b>0,05</b>	<b>25,1</b>	<b>3,0</b>
B5	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>1,0</b>	<b>1,7</b>	<b>0,01</b>	<b>2,3</b>	<b>4,5</b>
T27	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>6,07</b>	< BG	<b>0,19</b>	<b>46,5</b>	<b>37,00</b>	<b>2,10</b>	<b>2,3</b>	<b>0,6</b>
T30	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>3,34</b>	<b>0,26</b>	<b>0,77</b>	<b>409,0</b>	<b>67,00</b>	<b>25,00</b>	< 0,5	<b>0,2</b>

### 6.1.5 Folgerungen aus den Ergebnissen in Marktbergel

Während im Grund- und Oberflächenwasser niedrige DOC-Gehalte und Ammonium-Konzentrationen in der Größenordnung des Trinkwasser-Grenzwerts von 0,5 mg/l vorherrschen, sind diese in den beiden Beweissicherungstrichtern durch den eingebauten Kompost um ein Vielfaches höher. So sind in Trichter T30 gelöste organische Kohlenstoffverbindungen in Konzentrationen von etwa 300 mg/l bis 400 mg/l und Ammonium-Gehalte um 70 mg/l messbar.

In T27 sind die Konzentrationen von DOC (im Mittel rund 30 mg/l) und Ammonium (im Mittel rund 20 mg/l) vergleichsweise niedrig. Der Trichter liegt allerdings tiefer als T30, näher am Schlüppbach und ist um etwa 2,5 m höher mit Wasser gefüllt (Flurabstand 1,5 m u. POK im Vergleich zu 4 m u. POK in Trichter T30). Es ist somit von einer gewissen Verdünnung durch das Grundwasser auszugehen.

Die hohen Nitratwerte im Grundwasser (max. 85 mg/l) und im Schlüppbach (max. 135 mg/l) im Gegensatz zu Werten von maximal 4,8 mg/l in den Trichtern zeigen vermutlich Einträge durch die landwirtschaftliche Nutzung des Umfelds an. Laut Körner (2008) erfolgen die wesentlichen Stickstoffausträge aus Kompost während der Rottephase. Bei dem in Marktbergel verwendeten Kompost handelt es sich um ausgerotteten Fertigungskompost.

Im Grundwasser unterhalb des sanierten Sprengplatzes sind STV nur noch durch RDX vertreten. Es ist in allen Grundwassermessstellen nach wie vor in erhöhten Konzentrationen nachweisbar. Mit bis zu 4,01 µg/l wird die vorläufige GFS von 1 µg/l immer noch deutlich überschritten. Im Oberflächenwasser des Schlüppbachs waren bis zu 0,16 µg/l nachweisbar.

Von TNT und seinen Begleitkontaminanten ist nur 4-A-2,6-DNT noch in einer geringfügigen Konzentration von 0,1 µg/l nachweisbar.

In den beiden Beweissicherungstrichtern sind neben RDX noch die pulvertypischen Verbindungen EPU, DPU und C1 in teils erheblichen Konzentrationen messbar. Hier ist vor allem EPU die Verbindung, die mit bis zu 6,07 µg/l weit über der vorläufigen GFS von 0,1 µg/l hervorsteht. C1 ist zwar noch nachweisbar, die Konzentrationen sind mit bis zu 0,77 µg/l jedoch im unteren Bereich der vorläufigen GFS (15 µg/l) angesiedelt.

RDX ist somit der einzige Parameter im Bereich der Sanierungsfläche des ehemaligen Sprengplatzes Marktbergel, der außerhalb der Trichter in erhöhten Konzentrationen nachweisbar ist.

Im Vergleich waren 2014 neben Hexogen (mit 0,84 µg/l bis 1,78 µg/l) noch DNBS (2,4- und 4,6-Dinitrobenzoesäure) in Konzentrationen von 0,17 µg/l bis 0,43 µg/l nachweisbar. Neben ADNT, DNBS, MNX (Mono-Nitroso-Hexogen) war in T27 vor allem Hexogen in hohen Konzentrationen von 100 µg/l nachweisbar.

Unklar ist, wie hoch die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers für den bindigen Boden in Marktbergel anzusetzen ist und wie viel Hexogen bereits vor der Sanierung aus den Trichterbereichen mobilisiert war.

EPU und DPU werden zwar ebenfalls nach wie vor in erheblichen Konzentrationen gemessen. Die Verbindungen liegen aber ausschließlich im Sickerwasser der Trichter vor, was darauf schließen lässt, dass sie vom Kompost oder in den unterlagernden Bodenschichten zurückgehalten werden. Die Befunde innerhalb der Trichter lassen möglicherweise darauf schließen, dass der vollständige Rückhalt erst an der Trichtersohle erreicht wird. Auf Dauer ist von einer weiteren Abnahme der Konzentrationen durch Abbau oder Mineralisierung auszugehen.

## 6.2 Ehem. Sprengplatz Boxbrunn

### 6.2.1 Standortbeschreibung Boxbrunn

Nordwestlich des Stadtteils Boxbrunn (Amorbach) im Landkreis Miltenberg in Bayern liegt der ehemalige Sprengplatz Boxbrunn (Sprengplatz Munitionsfundstelle Boxbrunn). In den Jahren 1946 bis 1949 wurden hier im Gönzbachtal rund 10.000 t an Munition vernichtet (siehe hierzu die Broschüre der Stadt Amorbach (2018)).

Dokumentiert sind insgesamt 32 Sprengtrichter, die über das gesamte Tal hinweg verteilt sind. In der Talsohle, entlang der Landesgrenze zu Hessen, verläuft der Gönzer Bach. Dieser durchfließt am südlichen Ende des Tales den sogenannten Königsee.

### 6.2.2 Vorversuche und Sanierung des Sprengplatzes Boxbrunn

Die Entmunitionierung der Sprengtrichter erfolgte in den Jahren 2016 und 2017. Im Vorfeld wurden, analog zum Vorgehen in Marktbergel, Vorversuche mit Kompost im Rahmen einer Eignungsprüfung der IM für den Standort durchgeführt.

Das ETV-Spektrum in Boxbrunn bestand aus TNT/ADNT, RDX, C1, DPU und EPU. Die Vorversuche ergaben, dass Frischkompost und Fertigkompost nahezu gleichermaßen geeignet waren, die vorhandenen Schadstoffe zurückzuhalten. Eine nähere Spezifikation der Komposte fehlt.

Das Versuchseluat enthielt hohe Konzentrationen an TNT (10.500 µg/l), ADNT (3.500 µg/l und 7.800 µg/l) sowie C1, EPU und DPU in Konzentrationen von rund 40 bis 100 µg/l. Alle relevanten Kontaminanten konnten mit den verwendeten Kompostarten vollständig gemindert werden. Während Frischkompost zu einer schnellen Minderung von TNT und DPU führte, war der Fertigkompost eher dazu geeignet, EPU innerhalb kurzer Zeit zurückzuhalten, wenn auch nicht zu 100 %.

Die Sanierung in Boxbrunn erfolge nach dem gleichen Schema wie in Marktbergel. Das belastete Trichtermaterial wurde ausgehoben und nach Entmunitionierung schichtweise im Wechsel mit Lagen aus 20 cm Kompost wieder in die Trichter eingebaut. Auch hier schüttete man auf der Trichtersohle

ein Bett aus 50 cm Kompost. Der verwendete Kompost bestand aus einer Mischung aus ca. 85 % Fertigkompost (Körnung 0-15 mm) und 15 % Frischkompost (0-25 mm), der auch die ersten 10 cm des Sohlbetts bildete.

Die Trichter T16/17 (Doppeltrichter) und T2 wurden zu Beweissicherungstrichtern ausgebaut. Wie in Marktbergel verwendete man PVC-Probenahmerohre, bestehend aus einer mit Geotextil und Filterkies ummantelten Filterstrecke und darüberliegenden 4 m Vollrohr. Die Ausmaße der Trichter betragen etwa 7,5 m im Durchmesser bei etwa 4 m Tiefe.

Die Sanierungsmaßnahme war erfolgreich, die Minderungsleistung lag bei 100 % für TNT/ADNT. C1 und DPU konnten fast vollständig zurückgehalten werden. Lediglich für EPU lag, wie auch in Marktbergel, eine geringere Reinigungsleistung vor (ca. 90 %).

Der Standort wurde im Rahmen eines Monitorings durch die Trichter T16/17 und T2 sowie Beprobungen von Hangaustrittswasser und Oberflächenwasser aus dem Gönzbach und dem Königsee überwacht.

### 6.2.3 Aktuelle technische Erkundungen in Boxbrunn

Die Grundwassermessstellen, Beweissicherungstrichter und Probenahmestellen für Oberflächenwasser in Boxbrunn waren im Verlauf der vom LfU beauftragten technischen Erkundungen wie in Marktbergel drei Mal in einem Zeitabstand von etwa 4 bis 6 Wochen zu beproben.

Die erste Beprobung in Boxbrunn fand am 09.09.2021 statt. Die beiden weiteren Beprobungen wurden am 07.10.2021 und am 04.11.2021 durchgeführt. An folgenden Stellen wurden Proben entnommen:

- Beweissicherungstrichter T16/17 und T2 (Sickerwasser),
- Austrittsstelle 2 (Hangaustrittswasser),
- Zulauf Königsee (Oberflächenwasser).

Nachfolgende Abbildungen geben einen Eindruck von der Beprobungskampagne:



Abb. 11: Ehemaliger Sprengplatz Gönz (Boxbrunn).



Abb. 12: Blick in Probenahmerohr Beweissicherungstrichter T16/T17.





Abb. 13: Ruhbrunnen (Quelle), oben links im Bild die Probenahmestelle „Austrittsstelle 2“.



Abb. 14: Hangaustrittswasser „Austrittsstelle 2“.



Abb. 15: Probenahmerohr Beweissicherungstrichter T2



Abb. 16: Zulauf Königsee.

Die Probenahmen in Boxbrunn wurden mit den gleichen Methoden wie in Marktbergel durchgeführt. Die Probenahme mit allen vor Ort gemessenen Parametern, Angaben zur Probenbehandlung und -konservierung sowie die Daten der Messstelle sind in Probenahmeprotokollen beschrieben.

Das Sickerwasser in den beiden Beweissicherungstrichtern wies neutrale pH-Werte von 6,5 bis 7 auf. Die elektrischen Leitfähigkeiten im Doppeltrichter T16/17 waren mit 770  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bis 1.400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  niedriger als in Trichter T2 (3.300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bis 4.040  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Das Sickerwasser war in beiden Trichtern braun gefärbt und getrübt.

Das Hangwasser an der Austrittsstelle 2 in unmittelbarer Nähe zum Quellteich „Ruhbrunnen“ hatte ebenfalls einen neutralen pH-Wert; die gemessenen Leitfähigkeiten betragen rund 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Das klare Oberflächenwasser des Gönzbachs hatte einen schwach sauren pH-Wert (4,85 bis 5,65). Die elektrischen Leitfähigkeiten der Proben betragen 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bis 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### 6.2.4 Chemische Untersuchungen der Proben aus Boxbrunn

Schwermetalle und Arsen erwiesen sich in allen untersuchten Proben als analytisch unauffällig. Fast alle Parameter blieben unterhalb der Bestimmungsgrenzen (BG).

Überschreitungen der (vorläufigen) Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) für die ETV-Parameter (Tab. 6 und Tab. 7) sowie erhöhte Konzentrationen an DOC, Eisen und Ammonium ergaben sich für folgende Proben (farbig hinterlegt):

Tab. 12: Relevante Stoffnachweise Boxbrunn. 1. Probenahme am 09.09.2021.

Parameter	RDX	TNT	4-A-2,6-DNT	2-A-4,6-DNT	EPU	DPU	C1	DOC	NH <sub>4</sub>	Fe	NO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>
Einheit	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
GFS	1,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	15,0	-	-	-	-	-
TrinkwV	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,2	50,0	-
<b>PN-Stelle</b>												
Austrittsstelle 2	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>0,29</b>	<b>2,2</b>	<b>0,01</b>	<b>0,08</b>	<b>5,8</b>	<b>10,0</b>
T16/17	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>25,5</b>	<b>0,64</b>	<b>34,5</b>	<b>14,3</b>	<b>6,5</b>	<b>9,7</b>	< 0,5	<b>1,3</b>
T2	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>45,0</b>	<b>4,17</b>	<b>12,8</b>	<b>240,0</b>	<b>83,0</b>	<b>1,5</b>	< 0,5	<b>1,0</b>
Zulauf Königsee	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>0,3</b>	<b>0,27</b>	<b>1,11</b>	<b>3,9</b>	<b>0,02</b>	<b>0,21</b>	<b>2,1</b>	<b>10,9</b>

Tab. 13: Relevante Stoffnachweise Boxbrunn. 2. Probenahme am 07.10.2021.

Parameter	RDX	TNT	4-A-2,6-DNT	2-A-4,6-DNT	EPU	DPU	C1	DOC	NH <sub>4</sub>	Fe	NO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>
Einheit	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
GFS	1,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	15,0	-	-	-	-	-
TrinkwV	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,2	50,0	-
<b>PN-Stelle</b>												
Austrittsstelle 2	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>0,1</b>	< BG	<b>0,28</b>	<b>1,2</b>	<b>0,01</b>	<b>0,07</b>	<b>5,80</b>	<b>9,8</b>
T16/17	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>22,8</b>	<b>0,44</b>	<b>94,6</b>	<b>19,3</b>	<b>9,8</b>	<b>6,9</b>	< 0,5	<b>0,6</b>
T2	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>52,6</b>	<b>5,64</b>	<b>14,6</b>	<b>261,0</b>	<b>100,0</b>	<b>9,6</b>	<b>1,9</b>	<b>0,7</b>
Zulauf Königsee	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>0,27</b>	<b>0,23</b>	<b>1,01</b>	<b>2,7</b>	<b>0,04</b>	<b>0,11</b>	<b>17,9</b>	<b>11,7</b>

Tab. 14: Relevante Stoffnachweise Boxbrunn. 3. Probenahme am 04.11.2021.

Parameter	RDX	TNT	4-A-2,6-DNT	2-A-4,6-DNT	EPU	DPU	C1	DOC	NH <sub>4</sub>	Fe	NO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>
Einheit	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
GFS	1,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	15,0	-	-	-	-	-
TrinkwV	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,2	50,0	-
<b>PN-Stelle</b>												
Austrittsstelle 2	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>0,19</b>	<b>2,50</b>	< 0,01	<b>0,1</b>	<b>5,6</b>	<b>9,4</b>
T16/17	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>27,7</b>	<b>1,03</b>	<b>30,2</b>	<b>29,0</b>	<b>19,0</b>	<b>7,4</b>	<b>0,9</b>	<b>0,5</b>
T2	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>61,9</b>	<b>5,18</b>	<b>13,1</b>	<b>250,0</b>	<b>99,0</b>	<b>12,0</b>	< 0,5	<b>0,3</b>
Zulauf Königsee	< BG	< BG	< BG	< BG	<b>0,23</b>	<b>0,12</b>	<b>0,91</b>	<b>3,7</b>	< 0,01	<b>0,16</b>	<b>2,6</b>	<b>10,5</b>

### 6.2.5 Folgerungen aus den Ergebnissen in Boxbrunn

Im Gegensatz zum Standort in Marktbergel weisen die Proben aus Hangaustritts- und Bachwasser nur geringe Konzentrationen an Nitrat auf. Aufgrund der Lage mitten im Wald finden hier allerdings auch keine Nährstoffeinträge aus der landwirtschaftlichen Nutzung statt.

Mit 80 mg/l bis 100 mg/l an Ammonium und DOC-Werten von 240 mg/l bis 260 mg/l zeigt sich vor allem in Trichter T2 die Auswirkung des Komposts auf den Chemismus des Sickerwassers.

RDX und TNT/ADNT sind in den Proben aus Boxbrunn nicht nachweisbar. In den Trichtern T16/17 und T2 ist vor allem EPU der Parameter, der mit etwa 20 µg/l bis 60 µg/l und damit dem 600-fachen des vorläufigen GFS-Wertes in erheblichen Mengen nachgewiesen wird. DPU liegt in einem Niveau um das 50-fache der vorläufigen GFS in den Trichtern vor, C1 beim 6-fachen.

In der Austrittsstelle 2 werden nur geringfügige Konzentrationen nachgewiesen, im Zulauf des Königsees sind die Konzentrationen auf ein Niveau nahe der GFS gefallen.

Die PTV sind somit in den Trichtern noch in erheblichen Mengen vorhanden, werden aber weitestgehend dort zurückgehalten. In absehbarer Zeit werden die Konzentrationen im Gönzbach voraussichtlich auf ein Niveau unterhalb der vorläufigen GFS sinken.

### 6.3 Toxizitätsuntersuchungen Marktbergel und Boxbrunn

Ausgewählte Wasserproben und Versuchseluate wurden im Biotestlabor (LfU Augsburg) auf akute Schadstoffwirkungen gegenüber Wasserorganismen untersucht.

Tab. 15: Ergebnisse Biotests Marktbergel (Probenahme am 08.09.2021).

Entnahmestelle	pH-Wert	G <sub>F</sub> Fischei	G <sub>L</sub> Leucht-bakterien	G <sub>D</sub> Daphnien	G <sub>A</sub> Algen
B1	6,55	1	1	1	1
T27	6,1	1	1	2	1
T30	3,35	2	1	4	1

Tab. 16: Ergebnisse Biotests Boxbrunn (Probenahme am 09.09.2021).

Entnahmestelle	pH-Wert	G <sub>F</sub> Fischei	G <sub>L</sub> Leucht-bakterien	G <sub>D</sub> Daphnien	G <sub>A</sub> Algen
T2	6,8	2	2	2	1
T16/17	6,4	2	1	1	1
Zulauf Königsee	6,45	2	1	1	1

Der G-Wert oder G<sub>x</sub>-Wert wird als Maß für die Toxizität von Abwässern herangezogen. Bei den Untersuchungen werden verschiedene Verdünnungen der Proben hergestellt. Die Verdünnungsstufe, ab der keine Schädigung mehr auf den jeweiligen Wasserorganismus (Fischei, Daphnien, Leucht-bakterien und Algen)<sup>6</sup> beobachtet wird, stellt den G<sub>x</sub>-Wert dar.

<sup>6</sup> Leuchtbakterientest nach DIN EN ISO 11348-2 (2009), Fischeitest nach DIN EN ISO 15088 (2009), Algentest nach DIN 38412-L33 (1991), Daphnientest nach DIN 38412-L30 (1989)

Die Untersuchungen belegen eine sehr niedrige Toxizität für die Proben aus Grund- und Oberflächenwasser (Faktor 1, schon die Originalprobe ist nicht toxisch). Die Probe aus T30 erwies sich mit einem  $G_D$ -Wert von 4 als gering toxisch.

## 7 Laborversuche zur In-situ Immobilisierung mittels Kompost

### 7.1 Anforderungen an die Versuchsdurchführung

Die Versuchsreihe zur Immobilisierung mittels Kompost sollte zum einen detaillierteren Aufschluss über die Wirksamkeit der Sanierungsmethode geben und zum anderen dazu dienen, Voraussetzungen für die Durchführung von Vorversuchen im Rahmen einer Eignungsprüfung und letztendlich für die Prüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens im Einzelfall zu definieren.

Jede Eignungsprüfung für einen bestimmten Sanierungsfall muss klaren Vorgaben folgen und die notwendigen Vorversuche müssen reproduzierbar sein, mit Parametern, die mit definierten Kenngrößen vergleichbar sind. Gleichzeitig sollten möglichst realitätsnahe Versuchsbedingungen geschaffen werden.

Biotests an Wasserproben sollten mit den Toxizitätsindikatoren Fischeier, Leuchtbakterien, Daphnien und Algen durchgeführt werden.

Da unabhängig von der IM geeignete Methoden für eine effektive und kostengünstige Sanierung von Sprengplätzen gefunden werden sollten, wurde ergänzend vorgeschlagen, in zwei Säulen ein Aktivkohle-impregniertes Vlies („Tektoseal“) in einer Bettung aus Filtersand einzubauen und mit einer ETV-Dotierlösung zu durchströmen. Das Vlies böte bei Erfolg zwei Vorteile: Es wäre ein definiertes, industriell gefertigtes Sorptionsmedium und würde es zulassen, einen Trichterinhalt quasi volumenneutral rückzuerbauen.

### 7.2 Versuchskonzept und -design

Um den Rückhalt bzw. den Abbau von Hexogen und den PTV C1, EPU und DPU sowie der potenziellen PTV-Abbauprodukte EPA und DPA reproduzierbar zu überprüfen, sollten Eluatversuche mit dotierten wässrigen Versuchslösungen durchgeführt werden. Folgende Lösungen wurden als Versuchsm Medien definiert:

- 100 µg/l an Hexogen (RDX) in deionisiertem Wasser,
- Ein Gemisch aus jeweils 100 µg/l an C1, EPU, DPU, EPA und DPA in deionisiertem Wasser.

EPA wurde als potenzielles Abbauprodukt von C1 und EPU sowie DPA als potenzielles Abbauprodukt von DPU in die PTV-Versuchsreihe mit aufgenommen. Die während der Versuchsreihe gewonnenen Eluatproben waren auf die jeweiligen Parameter sowie auf die Basisparameter aus Tab. 8 zu untersuchen.

Die Versuchslösungen wurden vom Labor Envilytix bereitgestellt. Die ausgewählten Verbindungen stellen die Substanzen dar, die in der Vergangenheit bei Versuchen und Sanierungen die schlechtesten Minderbarkeiten zeigten bzw. die immer noch auf den sanierten Standorten im Grund- und Oberflächenwasser in teils erheblichen Konzentrationen nachweisbar oder als potenzielle Abbauprodukte zu erwarten sind.



Fertigkompost (Rottegrad IV oder V) sollte als Säulenfüllung dienen. Um Störungen durch hohe Konzentrationen an löslichen organischen Verbindungen zu vermeiden, sollte der Kompost je Einzelversuch zwei Mal mit Wasser gesättigt und dieses anschließend abgelassen werden („Waschen“ des Komposts).

Für die Laborversuche wurden folgende Möglichkeiten des Versuchsdesigns diskutiert:

- Standzylinder mit periodischen Einstau von oben, intermittierendes Ablassen (Vorgehen wie bei den Vorversuchen für Marktbergel),
- Offenes System mit künstlicher Begegnung,
- Kontinuierliches Durchströmen mittels Pumpe.

In Abstimmung mit dem LfU wurde entschieden, Glassäulen zu verwenden, die mittels Peristaltik-Pumpe durchströmt bzw. beschickt werden. Damit sollte ein System genutzt werden, das in der Altlastenanalytik ebenfalls zum Einsatz kommt. Die definierten Versuchsbedingungen sollen es ermöglichen, den Versuchsaufbau standardmäßig für Versuche im Vorfeld geplanter Sanierungen anzuwenden und übertragbare Ergebnisse zu erzielen.

Das Beschicken der Säulen mit den Versuchslösungen sollte von unten nach oben erfolgen. Im Vergleich zu den genannten Versuchsdesigns bietet dies folgende Vorteile:

1. Die Säulen sind einsehbar – Prozesse wie Gasbildung, Farbänderungen oder ggf. präferenzielle Fließwege können beobachtet werden.
2. Durch das Durchströmen bzw. die Aufgabe der Versuchslösungen von unten nach oben wird Porenluft ausgetrieben und eine schnelle und optimale Benetzung der Oberflächen des Adsorbens Kompost erreicht. (In früheren Versuchen mit von oben nach unten durchströmten Auslaufsäulen aus Edelstahl hatte dies zu einer niedrigen Wasserdurchlässigkeit und zur Bildung von präferenziellen Fließwegen geführt).
3. Es kommt nicht zu Matrixstörungen, Setzungen oder zur Bildung von Schlufflinsen. (In früheren Versuchen mit von oben nach unten durchströmten Auslaufsäulen kam es dabei zu einer stark verminderten Wasserdurchlässigkeit.)
4. Präferenzielle Fließwege werden vermieden.

Beschafft wurde die „KEB 101 Kompakt-Elutionseinheit“ für die Bodenanalytik der Fa. Behr Labor-Technik GmbH. Die Glassäulen weisen einen Innendurchmesser von 80 mm und ein Volumen von 3,1 Litern auf. In der folgenden Abb. 17 ist ein Schema des Systems dargestellt.

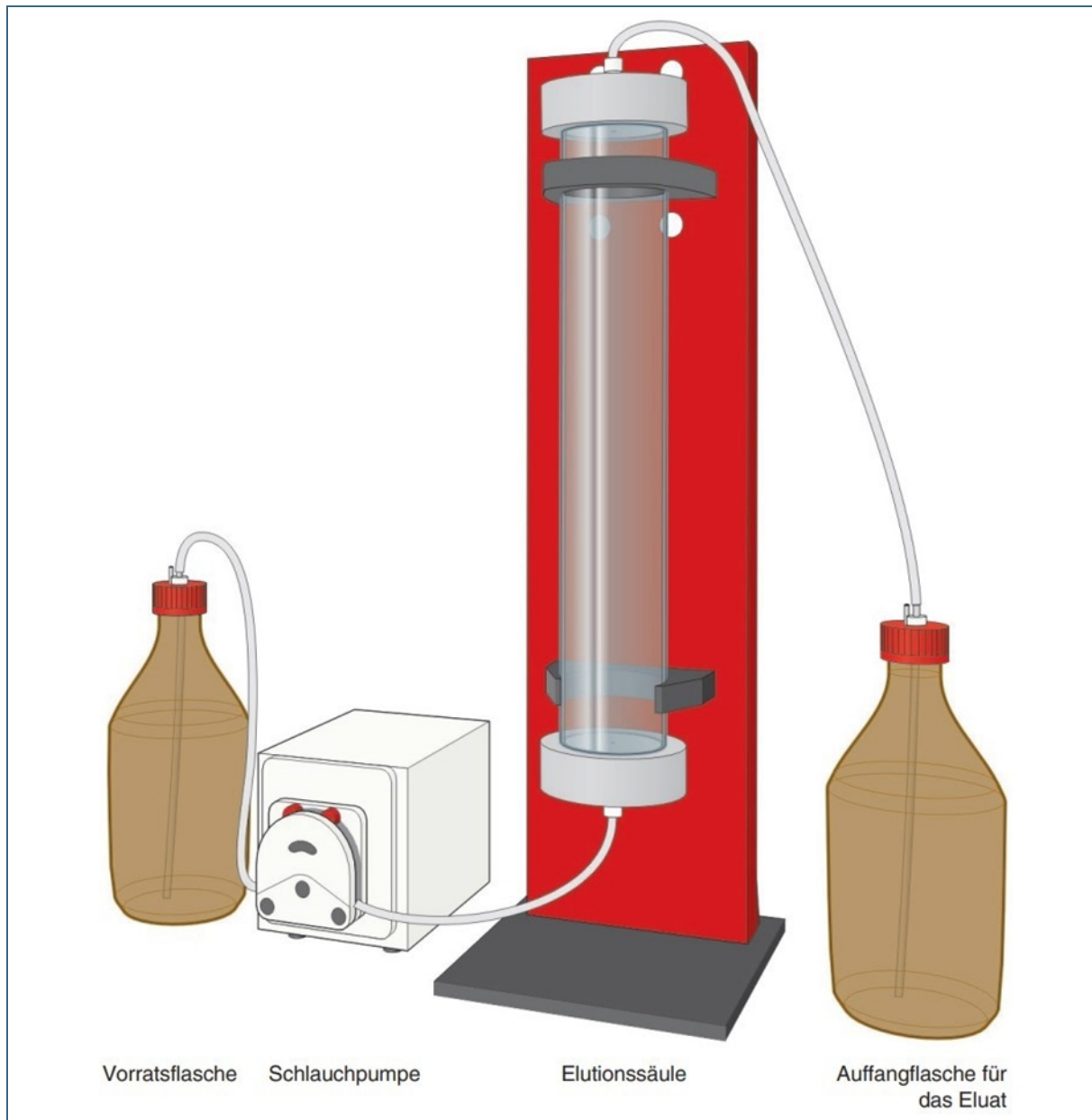


Abb. 17: Schema Elutionssäule KEB der Fa. Behr Labortechnik.

Es wurden vier separate Säulen beschafft. Es konnten somit je Versuchslösung (RDX bzw. C1, EPU, DPU, EPA und DPA) zwei parallele Versuche gefahren werden.

Nach verdichtetem Einbau des Komposts und Beschickung der Säulen mit den Versuchslösungen sah das Konzept fünf unterschiedliche Kontaktzeiten der dotierten Lösungen mit der Kompostmatrix bzw. fünf Probenahmezeitpunkte vor.

In Tab. 17 sind die Kontaktzeiten und Probenahmeintervalle aufgelistet.

Tab. 17: Versuchsschema und Untersuchungskonzept für die Säulen 1-4.

	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
<b>Dotierlösung</b>	RDX (100 µg/l)	RDX (100 µg/l)	C1, EPU, DPU, EPA, DPA (100 µg/l)	C1, EPU, DPU, EPA, DPA (100 µg/l)
Kontaktzeit	↓	↓	↓	↓
<b>4 Stunden</b>	RDX Basisparameter <sup>7</sup> <i>Biotests</i>	RDX Basisparameter <i>Biotests</i>	PTV <sup>8</sup> Basisparameter <i>Biotests</i>	PTV Basisparameter <i>Biotests</i>
<b>1 Tag</b>	RDX Basisparameter <i>Biotests</i>	RDX Basisparameter <i>Biotests</i>	PTV Basisparameter <i>Biotests</i>	PTV Basisparameter <i>Biotests</i>
<b>3 Tage</b>	RDX Basisparameter <i>Biotests</i>	RDX Basisparameter <i>Biotests</i>	PTV Basisparameter <i>Biotests</i>	PTV Basisparameter <i>Biotests</i>
<b>9 Tage</b>	RDX Basisparameter <i>Biotests</i>	RDX Basisparameter <i>Biotests</i>	PTV Basisparameter <i>Biotests</i>	PTV Basisparameter <i>Biotests</i>
<b>15 Tage</b>	RDX Basisparameter <i>Biotests</i>	RDX Basisparameter <i>Biotests</i>	PTV Basisparameter <i>Biotests</i>	PTV Basisparameter <i>Biotests</i>

	Tektoseal
<b>Dotierlösung</b>	RDX+PTV 100 µg/l (1:1)
	↓
	Durchsickerung von 2 Säulen; RDX+PTV-Analytik

Tab. 18:  
Versuchsschema und Untersuchungskonzept für das Tektoseal.

<sup>7</sup> Siehe Tab. 8

<sup>8</sup> C1, EPU, DPU, EPA, DPA (siehe auch Tab. 7)

### 7.3 Auswahl des Kompostes

Ein elementarer Faktor bei der Sanierung eines mit ETV-belasteten Standorts ist die Auswahl eines geeigneten Komposts. Kompost stellt ein variables Produkt dar, das stark unterschiedliche Eigenschaften aufweisen kann, je nach

- Kompostierungsanlage (großtechnisch-gewerblich oder kommunale Anlagen);
- Verfahren, Rottesystem (Mieten, Rotteturm oder -tunnel, Boxen, Tunnelkompostierung);
- Rottegrad (Frisch- oder Fertigungskompost);
- Eingangsmaterial, Substrat (Grünschnitt, Biotonne), Anteil an schwer umsetzbaren Stoffen wie Lignin und Lignocellulose.

Die bei früheren Sanierungen durchgeführten Vorversuche belegten Minderungsleistungen sowohl für Frischkompost (Rottegrad I bis III), als auch für Fertigungskompost (IV, V). Frischkompost weist eine höhere mikrobielle Aktivität auf: Abbauprozesse setzen hier schneller ein. Innerhalb einiger Wochen verlangsamt sich die Abbaurate.

Fertigungskompost stellt hygienisierten, biologisch stabilisierten und fraktionierten Kompost dar, der auch bei Bodenverbesserung und Düngung Anwendung findet. Von ausgerottetem Kompost (Rottegrad V) sind nur noch geringe Änderungen der Beschaffenheit zu erwarten. Bei Rottegrad IV und V ist in der Regel keine Wassergefährdung gegeben, wenn die Qualitätskriterien und Grenzwerte gem. BioAbfV seitens der Abfallbehandlungsanlage eingehalten werden. Folgende Kriterien sind gemäß Bundesgütesicherung Kompost (BGK (2023)) zu erfüllen und Nachweise zu erbringen, damit der Bioabfallbehandler nach Vorgaben der BioAbfV den Kompost abgeben oder selbst auf bewirtschafteten Betriebsflächen aufbringen darf (Auszug):

- Hygiene-Nachweise zur Wirksamkeit der Hygienisierung, maximal 2 keimfähige Samen und austriebfähige Pflanzenteile je Liter, Salmonellen nicht nachweisbar (in 50 g Kompostfrischmasse),
- Fremdstoffgrenzwerte sind einzuhalten (Flächensumme der ausgelesenen Fremdstoffe über 2 mm maximal 15 cm<sup>2</sup>/l),
- Pflanzenverträglichkeit ist nachzuweisen, der Kompost darf keine phytotoxischen Stoffe enthalten, Keimpflanzenversuch,
- Schadstoffgehalte (Grenzwerte gem. BioAbfV) sind einzuhalten sowie
- Vorgaben für den Gehalt an organischer Substanz (mindestens 15 Gew.-% i. d. TS, gemessen als Glühverlust), Wassergehalt (lose Ware maximal 45 Gew.-%) sind einzuhalten.

Darüber hinaus sind Angaben unter anderem zur Körnung, pH-Wert, Dichte, Salzgehalt, Gewicht, Anwendung und Nährstoffen zur Deklaration zu machen.

Ein wesentlicher Faktor bei der Auswahl des Komposts im Rahmen einer Eignungsprüfung sind die Zeitpunkte der Vorversuche und der tatsächlichen Sanierung. Hier kann ein zeitlicher Versatz von mehreren Monaten vorliegen. Zum Zeitpunkt des Sanierungsbeginns ist der Kompost der Vorversuche ggf. nicht in dieser Qualität greifbar.

Oben genannte Gründe führten zu der Entscheidung, ausgerotteten Kompost (Rottegrad V) zu verwenden. Aufgrund der Stabilisierung ist hier eine begrenzte Lagerungsmöglichkeit gegeben (bis zu einigen Monaten). Von den möglichen Eingangsstoffen ist Grünschnitt das Ausgangsmaterial, das ortsunabhängig eine weitestgehend ähnliche und homogene Zusammensetzung erwarten lässt. Kompost aus Abfällen wie dem kommunalen Biomüll ist nicht geeignet.

Der Kompost für die aktuellen Versuche wurde bei der Firma Veolia von der Abfallbehandlungsanlage in Fischbach bei Nürnberg bezogen. Es handelte sich um Kompost aus reinem Grünschnitt (Stoffe aus dem Garten- und Landschaftsbau, vor allem Gehölzschnitt), Rottegrad V, Siebung 0-15 mm, aus Freiflächenkompostierung. Oben genannte Gütekriterien wurden aufgrund der Kleinmengen und der vorgesehenen Verwendung (Laborversuche) nicht im Detail vom Abfallbehandler eingefordert. Von den durchgeführten Analysen zur Spezifikation des Komposts wurden die Werte für den Wassergehalt (etwa 25 Gew.-%) und für den Glühverlust (etwa 17 Gew.-%) eingehalten.

Nachfolgend ist der bezogene Kompost abgebildet:



Abb. 18: Kompost (Veolia Fischbach), Rottegrad V, Siebung 0-15 mm.



Abb. 19: Detailaufnahme Kompost.

Eine weitere Fragestellung, die sich im Zusammenhang mit dem verwendeten Kompost ergibt, ist die Fracht an Stoffen aus dem Kompost selbst, die bodenschutzrechtlich relevant sein kann. Mit dem Sickerwasser werden unter Umständen große Mengen an organischen Substanzen aus dem Kompost gelöst und mobilisiert. Dies war im Rahmen der Vorversuche im Ausblick auf die Konsequenzen bei geplanten Sanierungen zu berücksichtigen.

## 7.4 Versuchsablauf und Kompostspezifikation

Die Versuche zur Immobilisierung mittels Komposts wurden vom 14.02.2022 (Beginn der Versuchsreihe) bis zum 16.03.2022 durchgeführt. Es wurden vier Säulen (1 bis 4) mit Kompost befüllt und die Versuche mit RDX und PTV jeweils an zwei Säulen parallel durchgeführt. Vor Beginn der Versuchsreihen wurde der Kompost spezifiziert.

Der Kompost (insgesamt 50 Liter) wurde zunächst durchmischt und homogenisiert. Um möglichst viele Eigenschaften des Komposts zu erfassen, wurden insgesamt sechs Einzelproben gebildet und auf den Parameterumfang in Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 19 untersucht.

Für die Untersuchungen in der wässrigen Phase wurden 10:1-Eluate unter Berücksichtigung des bestimmten Wassergehalts hergestellt. Das Verhältnis Wasser zu Kompost bezog sich auf die Trockensubstanz.



Tab. 19: Spezifikationswerte des Kompostes – Bestimmungen im Eluat.

	Einzelprobe Nr.	1	2	3	4	5	6
<b>Basisparameter</b>	<b>Einheit</b>						
Färbung (visuell)	-	braun	braun	braun	braun	braun	braun
Trübung (visuell)	-	klar	klar	klar	klar	klar	klar
Geruch	-	Kom- postty- pisch, erdig	kom- postty- pisch, erdig	kom- postty- pisch, erdig	kom- postty- pisch, erdig	kom- postty- pisch, erdig	kom- postty- pisch, erdig
pH-Wert	-	7,7	7,72	7,76	7,54	7,76	7,77
Temperatur bei pH- Wert-Messung	°C	23,1	23,1	23	22,9	22,9	23
Elektrische Leitfähig- keit, 25°C	µS/cm	846	876	880	969	896	877
Redox-Spannung (UH)	mV	452	430	421	420	410	393
Sauerstoff, gelöst (O <sub>2</sub> )	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/l	7,4	8	2,9	3,3	4,1	4,5
Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	0,85	0,73	0,27	0,24	0,26	0,28
Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	68,6	74,1	65,4	72,8	59	63,9
DOC (C)	mg/l	84,8	83,9	79,7	76,7	85	83,6
Chlorid (Cl <sup>-</sup> )	mg/l	87	91,9	94,7	98,4	96	92,6
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/l	23	24,2	25,5	26,3	24,7	24,6
Phosphor, gesamt (P)	mg/l	2,5	2,5	2,6	2,4	2,5	2,5
Vergärungsgrad (or- ganische Säuren)	mg/l	89	62	77	57	66	36
Stickstoff (N), ge- samt	mg/l	59,9	40	32	35,7	38,4	35,2
AK 254 nm	1/m	42	42	42	42	42	42
AK 436 nm	1/m	33	31	30	25	30	30

Tab. 19 (Fortsetzung)

	Einzelprobe Nr.	1	2	3	4	5	6
<b>Metalle und Metalloide</b>	<b>Einheit</b>						
Arsen (As)	mg/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Blei (Pb)	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02
Cadmium (Cd)	mg/l	< 0,0005	< 0,0005	0,002	< 0,0005	0,002	0,0014
Chrom, gesamt (Cr)	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Kupfer (Cu)	mg/l	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04
Nickel (Ni)	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Quecksilber (Hg)	mg/l	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Zink (Zn)	mg/l	0,06	0,06	0,09	0,03	0,13	0,06
Antimon (Sb)	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Eisen (Fe)	mg/l	0,18	0,18	0,18	0,15	0,18	0,18

Tab. 20: Spezifikationswerte des Kompostes – Bestimmungen im Feststoff.

	Einzelprobe Nr.	1	2	3	4	5	6
<b>Basisparameter</b>	<b>Einheit</b>						
Trockensubstanz (105° C)	Masse-% FM	77,7	78,3	76,4	77,6	77,4	77,5
Rohdichte	g/l FM	953,0	953,0	953,0	-	-	-
Glühverlust (450° C)	Masse-% TS	17,6	17,5	16,9	16,8	17,1	17,8
TOC	Masse-% TS	9,3	9,0	9,1	9,2	9,2	9,0
flüchtige organische Säuren	mg/kg	174,0	185,0	180,0	191,0	186,0	-

Der Kompost wies mit rund 950 kg/m<sup>3</sup> eine relativ hohe Feuchtdichte auf. Der Wassergehalt betrug etwa 20 %. Die chemischen Eigenschaften des Komposts erwiesen sich über alle sechs Proben hinweg annähernd gleich.

Glühverluste um 17 Masse-% und TOC-Werte um 9 Masse-% kennzeichnen den Kompost als humusreiches Substrat.

Von besonderer Relevanz für die Fragestellung sind die Befunde für den DOC und die spektralen Absorptionskoeffizienten AK 254 nm und AK 436 nm. Der sehr hohe DOC um 80 mg/l zeigt an, dass das Eluat des Komposts erhebliche Anteile an gelösten organischen Verbindungen enthält. Und in Verbindung mit der durchgängig hohen AK 254 nm von 42 nm, die eine starke Extinktion von UV-Strahlung bei 254 nm und damit ein hohes Maß an C=C- bzw. C=O- und konjugierten Doppelbindungen im Wasser anzeigt, kann davon ausgegangen werden, dass mit den Befunden ein mit Huminstoffen beladenes Eluat nachgewiesen ist. Die starke Färbung des Wassers, die sich in der Schwächung des UV-Lichts bei 436 nm zeigt, untermauert den Befund. Die Messwerte lassen auf einen huminstoffreichen Kompost schließen, wie er für die Bindung von ETV benötigt wird.

Schwermetalle waren nur in geringen Konzentrationen im Kompost enthalten. Im Verhältnis zu Nitrat (etwa 80 mg/l) enthielt der Kompost nur geringe Mengen an Ammonium (etwa 3 bis 8 mg/l).

Die Ergebnisse für den Gehalt an organischen Säuren erwiesen sich als typisch für Kompost.

### Einbau des Komposts – 14.02.2022

In die Glassäulen wurde zunächst eine Lage aus 2 cm Quarzsand eingebaut. Anschließend wurde der trockene, homogenisierte Kompost eingebracht und mit einem Kolben von Hand verdichtet (Abb. 21).



Abb. 20: Elutionssäulen im Labor.



Abb. 21: Einbau und Verdichtung des Komposts.

Folgende Mengen an Kompost konnten in die Säulen eingebaut werden:

- Säule 1: 2.523 g
- Säule 2: 2.599 g
- Säule 3: 2.535 g
- Säule 4: 2.557 g

Die obersten 2 cm der Säulenfüllungen bildete wieder eine Schicht aus Quarzsand.

### Säulenkonditionierung – 14.02.2022

Die Säulen wurden mittels der Peristaltikpumpen von unten nach oben mit Reinstwasser beschickt, um die Luft im Porenraum auszutreiben. Über eine Stunde hinweg wurde Wasser aufgegeben, bis das Wasser oben im Ablaufschlauch zu sehen war. Durch das Sättigen des Komposts sank der Füllstand zunächst wieder. Es wurde so lange Wasser nachgegeben, bis der Füllstand konstant blieb. In Abb. 22 ist das Einpumpen des Wassers von unten nach oben zu erkennen.

Die benötigten Wassermengen betragen:

- Säule 1: 870 ml
- Säule 2: 831 ml
- Säule 3: 832 ml
- Säule 4: 846 ml

Nach etwa einer Stunde „Sumpfen“ des Komposts wurde der untere Säulenverschluss geöffnet und das Wasser lief ab. Man ließ sie Säule „ausbluten“. Es traten hierbei folgende Wassermengen aus:

- Säule 1: 90 ml
- Säule 2: 83 ml
- Säule 3: 95 ml
- Säule 4: 88 ml

Zusätzlicher Ablauf wurde durch das Anlegen eines schwachen Überdruckes von oben auf die Säulen gewonnen:

- Säule 1: 208 ml
- Säule 2: 201 ml
- Säule 3: 200 ml
- Säule 4: 211 ml

Das gewonnene Eluat bildete die erste Probe für die chemischen Untersuchungen der Basisparameter und Biotests.

Etwa 250 ml stellten somit die Wassermenge dar, die während des Versuchsverlaufs jeweils an dotierter Lösung aufgegeben werden konnte, ohne dass dotierte Lösung selbst nach oben ausgetrieben wurde. Für die zweite Säulenconditionierung (Waschvorgang) wurden zunächst weitere 800 ml deionisiertes Wasser eingedrückt.



Abb. 22: Säulenconditionierung mit deionisiertem Wasser.



Abb. 23: Lichtschutz während der Standzeiten.



Abb. 24: Beschickung der Säulen mit Versuchslösung (100 µg/l RDX bzw. PTV).

## Säulenbeaufschlagung mit dotierten Lösungen – 14.02.2022 bis 16.03.2022

Jeweils 250 ml an RDX- bzw. PTV-Versuchslösung wurde möglichst langsam von unten in die Säulen eingepumpt (Abb. 24). Dieser Vorgang dauerte jeweils in etwa 2 Stunden. Nach den jeweiligen Standzeiten wurden weitere 250 ml Versuchslösung eingepumpt. Die aus den Säulen austretenden Mengen an Eluat betragen jeweils 100 ml bis 150 ml. Die ersten 20 ml wurden jeweils verworfen, um das Totvolumen durch den Quarzsand am Säulende zu kompensieren.

Das anschließend gewonnene Eluat wurde aufgeteilt: Ein Teil (etwa 120 ml) wurde umgehend gekühlt für die ETV-Analytik zum Labor Envilytix transportiert, ein zweiter Teil (etwa 60 ml) verblieb im Labor Dr. Graser zur Analyse der Basisparameter. Der dritte und letzte Teil (etwa 120 ml) wurde eingefroren und später dem LfU Augsburg für die Durchführung der Biotests zur Verfügung gestellt. Aufgrund der geringen Mengen an Eluat wurden jeweils die Proben von Säule 1 und 2 sowie 3 und 4 vereinigt.

Während der Standzeiten wurden die Säulen mit Alufolie umwickelt (Abb. 23), um photolytische Abbauprozesse in den Versuchssäulen zu unterbinden. Diese finden in Sprengtrichtern nicht statt und hätten unter Umständen zu einer Verfälschung bei den Eluatkonzentrationen geführt.



Abb. 25: Luftblasenbildung.



Abb. 26: Flüssigkeitsaustritt.

## Beobachtungen während der Versuchsreihe

### Gasblasenbildung:

Nach rund 10 Tagen (Standzeit 9 Tage) war Gasbildung in den Säulen zu beobachten (Abb. 25), die auf Nachrotte- und mikrobielle Abbauprozesse zurückgeführt werden.

### Flüssigkeitsaustritt:

Vom 26.02.2022 bis zum 01.03.2022 wurde bei allen vier Säulen spontane Austritte einer braunen Flüssigkeit (11 ml bis 25 ml) beobachtet. Der Flüssigkeitsaustritt hielt nach Beendigung der 15-Tage-Standzeit am Ende der Versuchsreihe noch einige Tage an. Der Effekt ist ebenfalls durch die Aktivität von Mikroorganismen zu erklären.

### Optische Veränderungen:

Die Färbung der Eluate wurde im Verlauf der Versuchsreihe heller und die Trübungen verringerten sich bis zu annähernd klaren Eluaten. Mit zunehmendem Austausch des Säuleninhalts waren offensichtlich weniger Huminstoffe und organische Kohlenstoffverbindungen aus dem Kompost lösbar.



## 7.5 Chemische Untersuchungen der Säuleneluat

### 7.5.1 Vorgehensweise

Gemäß Vorgaben und Abstimmung mit dem LfU wurden die Eluate der Testsäulen entsprechend dem Untersuchungskonzept der Tabellen Tab. 17 und Tab. 18 auf den Untersuchungsumfang der Tabellen Tab. 6 und Tab. 7 untersucht.

Je Standzeit und je Säule standen nur etwa 150 ml Eluat zur Verfügung. Mit der Vereinigung der Eluate von Säule 1 und 2 (RDX) beziehungsweise Säule 3 und 4 (PTV) ergaben sich jeweils insgesamt 300 ml Eluat, davon wurden etwa 120 ml für die RDX/PTV-Analytik (durchgeführt im Labor Envilytix GmbH) und weitere 120 ml für den Biotest (durchgeführt am LfU) reserviert. Somit standen nur rund 60 ml Eluat für die Analytik im Labor CLG zur Verfügung. Es konnten daher nicht nach jeder Einwirkzeit alle Parameter untersucht werden.

Die Stoffkonzentrationen im Eluat werden von den Kompostparametern dominiert, der RDX/PTV-Anteil ist vernachlässigbar. Die Auswahl der Parameter erfolgte anhand der Ergebnisse des ersten Säuleneluats (Konditionierung mit deionisiertem Wasser).

Der Ammonium-Stickstoffgehalt der Eluate wurde titrimetrisch nach Destillation ermittelt, da wegen der starken Eigenfärbung der Eluate die photometrische Bestimmung nicht möglich war. Ein Einsatz einer Probenmenge unter 10 ml war wegen zu starker Erhöhung der Bestimmungsgrenze nicht sinnvoll.

Für die Nitratbestimmung war aufgrund der starken DOC-Belastung der Eluate eine Aufreinigung notwendig, weshalb ein Probenvolumen von 10 ml benötigt wurde. Die Bestimmung der spektralen Adsorptionskoeffizienten konnte aufgrund der starken Eigenfärbung der Eluate nicht durchgeführt werden.

### 7.5.2 Ergebnisse der chemischen Untersuchungen

Nachfolgende Tabellen zeigen die Ergebnisse der Säulenversuche mit Kompost für die Parameter RDX und PTV (Tab. 21, Tab. 22, Tab. 23 und Tab. 24).

Bei der Bewertung der Untersuchungsbefunde ist zu beachten, dass im Gegensatz zur 10:1-Elution gemäß DIN EN 12457-4 bei der Voruntersuchung des Kompostes (Kapitel 7.4) ein wesentlich höherer Feststoffanteil (etwa 2,5 kg pro Säule) mit der dotierten Testflüssigkeit im Kontakt stand. Besonders deutlich zeigt sich dies am DOC, der im Rahmen der Kompostuntersuchung (10:1-Elution) um 80 mg/l lag, während die Eluate aus den Versuchssäulen DOC-Konzentrationen von rund 400 bis über 1.000 mg/l enthielten. Bei den Versuchsreihen mit den dotierten Lösungen wurden insgesamt etwa 1.000 ml Eluat gewonnen. Dies entspricht bei der angegebenen Feststoffmenge (2,5 kg) in den Säulen einem Wasser-/Feststoffverhältnis von etwa 1:2,5. Dies bedeutet ein um den Faktor 25 geringeres Wasser-/Feststoffverhältnis gegenüber der Eingangscharakterisierung des Kompostes.

Tab. 21: Ergebnistabelle **Säule 1 – RDX**.

	BG	Einheit	14.02.22 H <sub>2</sub> O Auf- schlag 1	15.02.22 H <sub>2</sub> O Auf- schlag 2	16.02.22 RDX (4 h)	17.02.22 RDX (1 Tag)	20.02.22 RDX (3 Tage)	01.03.22 RDX (9 Tage)	16.03.22 RDX (15 Tage)
<i>Probennummer</i>	-	-	2202079	2205083	2205980	2205984	2205988	2205992	2205996
<b>Basisparameter</b>									
Färbung (visuell)	-	-	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	braun	hell- braun
Trübung (visuell)	-	-	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	getrübt	nahezu klar
Geruch	-	-	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig
pH-Wert	-	-	7,57	7,84	7,77	7,6	7,85	7,52	7,42
Temperatur	-	°C	12,3	20,9	20	19,7	20	21,6	21,8
Elektr. Leitfähig- keit, 25°C	-	µS/cm	9500	544	3.350	2930	3520	4390	3930
Redox-Spannung (UH)	-	mV	250	n. u.	n. u.	n. u.	300	347	320
Sauerstoff, gelöst (O <sub>2</sub> )	-	mg/l	0,5	n. u.	< 0,1	0,7	2,3	1,9	3,1
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	-	mg/l	38	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	-	mg/l	< 1,0	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	< 1
Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	-	mg/l	n. u.	n. u.	8,2	8,4	n. u.	4,0	< 0,5
DOC (C)	-	mg/l	1.090	349	898	947	715	759	613
Spektraler AK 254 nm	-	1/m	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Spektraler AK 436 nm	-	1/m	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Stickstoff (N), gesamt	-	mg/l	363	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
<b>Metalle und Metalloide</b>									
Arsen (As)	-	mg/l	0,08	0,03	0,1	0,12	0,13	n. u.	0,03
Blei (Pb)	-	mg/l	0,03	0,03	0,06	0,08	0,1	n. u.	0,03
Cadmium (Cd)	-	mg/l	0,0008	0,0005	0,0018	0,0024	0,0037	n. u.	0,0006
Chrom, gesamt (Cr)	-	mg/l	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	n. u.	<0,01
Kupfer (Cu)	-	mg/l	0,21	0,28	0,54	1	0,51	n. u.	0,04
Nickel (Ni)	-	mg/l	0,08	0,03	0,06	0,06	0,04	n. u.	0,03
Quecksilber (Hg)	-	mg/l	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	n. u.	< 0,0001
Zink (Zn)	-	mg/l	0,22	0,23	0,38	0,44	0,27	n. u.	0,08
Antimon (Sb)	-	mg/l	0,02	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	n. u.	< 0,01
Eisen (Fe)	-	mg/l	4,7	5,7	3,3	8,3	3	n. u.	3,4
<b>Hexogen (RDX)</b>	0,5	µg/l	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
<i>Mischprobe mit Probennummer</i>									
				(vgl. Tab. 22)	2205981	2205985	2205989	2205993	2205997

n. u.: nicht untersucht

Tab. 22: Ergebnistabelle Säule 2 – RDX.

	BG	Einheit	14.02.22 H <sub>2</sub> O Auf- schlag 1	15.02.22 H <sub>2</sub> O Auf- schlag 2	16.02.22 RDX (4 h)	17.02.22 RDX (1 Tag)	20.02.22 RDX (3 Tage)	01.03.22 RDX (9 Tage)	16.03.22 RDX (15 Tage)
<i>Probennummer</i>	-	-	2205080	2205084	2205981	2205985	2205989	2205993	2205997
<b>Basisparameter</b>									
Färbung (visuell)	-	-	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	braun	hell- braun
Trübung (visuell)	-	-	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	getrübt	nahezu klar
Geruch	-	-	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig
pH-Wert	-	-	7,59	7,83	7,76	7,65	7,92	7,47	7,43
Temperatur	-	°C	12,3	20,9	20	19,7	20	21,6	21,8
Elektr. Leitfähig- keit, 25°C	-	µS/cm	10200	572	3500	3200	3560	4390	4120
Redox-Spannung (UH)	-	mV	230	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	320
Sauerstoff, gelöst (O <sub>2</sub> )	-	mg/l	0,9	n. u.	< 0,1	n. u.	3,2	0,6	3,5
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	-	mg/l	39	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	-	mg/l	< 1,0	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	-	mg/l	n. u.	n. u.	7,7	7,5	n. u.	< 0,5	< 0,5
DOC (C)	-	mg/l	1060	409	1245	1230	n. u.	766	545
Spektraler AK 254 nm	-	1/m	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Spektraler AK 436 nm	-	1/m	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Stickstoff (N), gesamt	-	mg/l	380	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
<b>Metalle und Metalloide</b>									
Arsen (As)	-	mg/l	0,07	0,04	0,11	0,12	0,14	n. u.	0,04
Blei (Pb)	-	mg/l	0,02	0,05	0,09	0,07	0,14	n. u.	0,02
Cadmium (Cd)	-	mg/l	0,0009	0,001	0,0021	0,0024	0,058	n. u.	0,0005
Chrom, gesamt (Cr)	-	mg/l	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	n. u.	<0,01
Kupfer (Cu)	-	mg/l	0,29	0,29	0,64	0,89	0,65	n. u.	0,03
Nickel (Ni)	-	mg/l	0,08	0,04	0,06	0,06	0,05	n. u.	0,03
Quecksilber (Hg)	-	mg/l	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	n. u.	< 0,0001
Zink (Zn)	-	mg/l	0,24	0,28	0,48	0,42	0,33	n. u.	0,07
Antimon (Sb)	-	mg/l	0,01	< 0,01	0,006	< 0,01	< 0,01	n. u.	< 0,01
Eisen (Fe)	-	mg/l	4,1	8,8	3,4	4,37	4,6	n. u.	1,2
<b>Hexogen (RDX)</b>	0,5	µg/l	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
<i>Mischprobe mit Probennummer</i>									
				(vgl. Tab. 21)	2205980	2205984	2205988	2205992	2205996

n. u.: nicht untersucht

Tab. 23: Ergebnistabelle Säule 3 – PTV.

	BG	Einheit	14.02.22 H <sub>2</sub> O Auf- schlag 1	15.02.22 H <sub>2</sub> O Auf- schlag 2	16.02.22 PTV (4 h)	17.02.22 PTV (1 Tag)	20.02.22 PTV (3 Tage)	01.03.22 PTV (9 Tage)	16.03.22 PTV (15 Tage)
Probennummer	-	-	2205081	2205085	2205982	2205986	2205990	2205994	2205998
<b>Basisparameter</b>									
Färbung (visuell)	-	-	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	braun	hell- braun
Trübung (visuell)	-	-	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	getrübt	nahezu klar
Geruch	-	-	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig
pH-Wert	-	-	7,6	7,77	7,8	7,66	7,94	7,52	7,45
Temperatur	-	°C	12,3	20,9	20	19,7	20	21,6	21,8
Elektr. Leitfähig- keit, 25°C	-	µS/cm	10530	590	3450	3150	3550	4400	4130
Redox-Spannung (UH)	-	mV	240	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	320
Sauerstoff, gelöst (O <sub>2</sub> )	-	mg/l	0,6	n. u.	< 0,1	n. u.	2,2	2,3	4,4
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	-	mg/l	37	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	-	mg/l	<1	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	<1
Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	-	mg/l	n. u.	n. u.	7,4	7,5	n. u.	3,9	<0,5
DOC (C)	-	mg/l	1100	369	1240	1150	957	761	457
Spektraler AK 254 nm	-	1/m	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Spektraler AK 436 nm	-	1/m	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Stickstoff (N), gesamt	-	mg/l	363	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
<b>Metalle und Metalloide</b>									
Arsen (As)	-	mg/l	0,07	0,03	0,09	0,12	0,13	n. u.	0,03
Blei (Pb)	-	mg/l	0,02	0,03	0,07	0,08	0,16	n. u.	0,02
Cadmium (Cd)	-	mg/l	0,0008	0,0007	0,0013	0,0018	0,0069	n. u.	<0,0005
Chrom, gesamt (Cr)	-	mg/l	0,02	0,01	0,04	0,04	0,02	n. u.	<0,01
Kupfer (Cu)	-	mg/l	0,22	0,25	0,45	0,8	0,66	n. u.	0,03
Nickel (Ni)	-	mg/l	0,08	0,03	0,06	0,06	0,05	n. u.	0,03
Quecksilber (Hg)	-	mg/l	< 0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	n. u.	< 0,0001
Zink (Zn)	-	mg/l	0,22	0,18	0,41	0,44	0,34	n. u.	0,06
Antimon (Sb)	-	mg/l	0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	n. u.	0,01
Eisen (Fe)	-	mg/l	4,1	4,8	3,6	9,38	5,193	n. u.	2,8
<b>PTV*</b>	0,5	µg/l	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
<i>Mischprobe mit Probennummer</i>									
				(vgl. Tab. 24)	2205983	2205987	2205991	2205995	2205999

\*PTV: N-Ethyl-N-phenylurethan (EPU), N,N-Diphenylurethan (DPU), Diphenylamin (DPA), Centralit I (C1),  
N-Ethyl-N-Phenylamin (EPA)

n. u.: nicht untersucht

Tab. 24: Ergebnistabelle Säule 4 – PTV.

	BG	Einheit	14.02.22 H <sub>2</sub> O Auf- schlag 1	15.02.22 H <sub>2</sub> O Auf- schlag 2	16.02.22 PTV (4 h)	17.02.22 PTV (1 Tag)	20.02.22 PTV (3 Tage)	01.03.22 PTV (9 Tage)	16.03.22 PTV (15 Tage)
Probennummer	-	-	2205082	2205086	2205983	2205987	2205991	2205995	2205999
<b>Basisparameter</b>									
Färbung (visuell)	-	-	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	dunkel- braun	braun	hell- braun
Trübung (visuell)	-	-	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	stark ge- trübt	getrübt	nahezu klar
Geruch	-	-	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig	unauffäl- lig
pH-Wert	-	-	7,59	7,7	7,83	7,71	7,75	7,58	7,53
Temperatur	-	°C	12,3	20,9	20	19,7	20	21,6	21,8
Elektr. Leitfähig- keit, 25°C	-	µS/cm	10210	581	3230	2960	3410	4360	4150
Redox-Spannung (UH)	-	mV	240	n. u.	189	205	263	338	310
Sauerstoff, gelöst (O <sub>2</sub> )	-	mg/l	0,4	n. u.	<0,1	0,4	2,1	1,9	4,2
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	-	mg/l	36	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	-	mg/l	<1	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	<1
Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	-	mg/l	n. u.	n. u.	7,9	8,2	n. u.	3,8	<0,5
DOC (C)	-	mg/l	1130	359	1270	1260	930	719	583
Spektraler AK 254 nm	-	1/m	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Spektraler AK 436 nm	-	1/m	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
Stickstoff (N), gesamt	-	mg/l	359	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
<b>Metalle und Metalloide</b>									
Arsen (As)	-	mg/l	0,07	0,03	0,1	0,12	0,14	n. u.	0,03
Blei (Pb)	-	mg/l	0,03	0,03	0,07	0,1	0,16	n. u.	0,02
Cadmium (Cd)	-	mg/l	0,0006	0,0008	0,0017	0,0023	0,0067	n. u.	<0,0005
Chrom, gesamt (Cr)	-	mg/l	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02	n. u.	<0,01
Kupfer (Cu)	-	mg/l	0,24	0,23	0,5	0,99	0,7	n. u.	0,03
Nickel (Ni)	-	mg/l	0,08	0,03	0,06	0,06	0,05	n. u.	0,03
Quecksilber (Hg)	-	mg/l	< 0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	n. u.	< 0,0001
Zink (Zn)	-	mg/l	0,22	0,21	0,4	0,49	0,36	n. u.	0,06
Antimon (Sb)	-	mg/l	0,01	<0,01	0,01	0,01	<0,01	n. u.	<0,01
Eisen (Fe)	-	mg/l	4,3	5,4	10	10	5,3	n. u.	3,1
<b>PTV*</b>	0,5	µg/l	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
<i>Mischprobe mit Probennummer</i>									
				(vgl. Tab. 23)	2205982	2205986	2205990	2205994	2205998

\*PTV: N-Ethyl-N-phenylurethan (EPU), N,N-Diphenylurethan (DPU), Diphenylamin (DPA), Centralit I (C1),  
N-Ethyl-N-Phenylamin (EPA)

n. u.: nicht untersucht



### 7.5.3 Wertediagramme der Versuchsreihe Immobilisierung mittels Komposts

In den nachfolgenden Diagrammen (Abb. 27 bis Abb. 38) sind die Werteverläufe einiger Parameter dargestellt. Die Interpretation der Ergebnisse findet sich in Kapitel 0.

#### Wertediagramme elektrische Leitfähigkeit und DOC

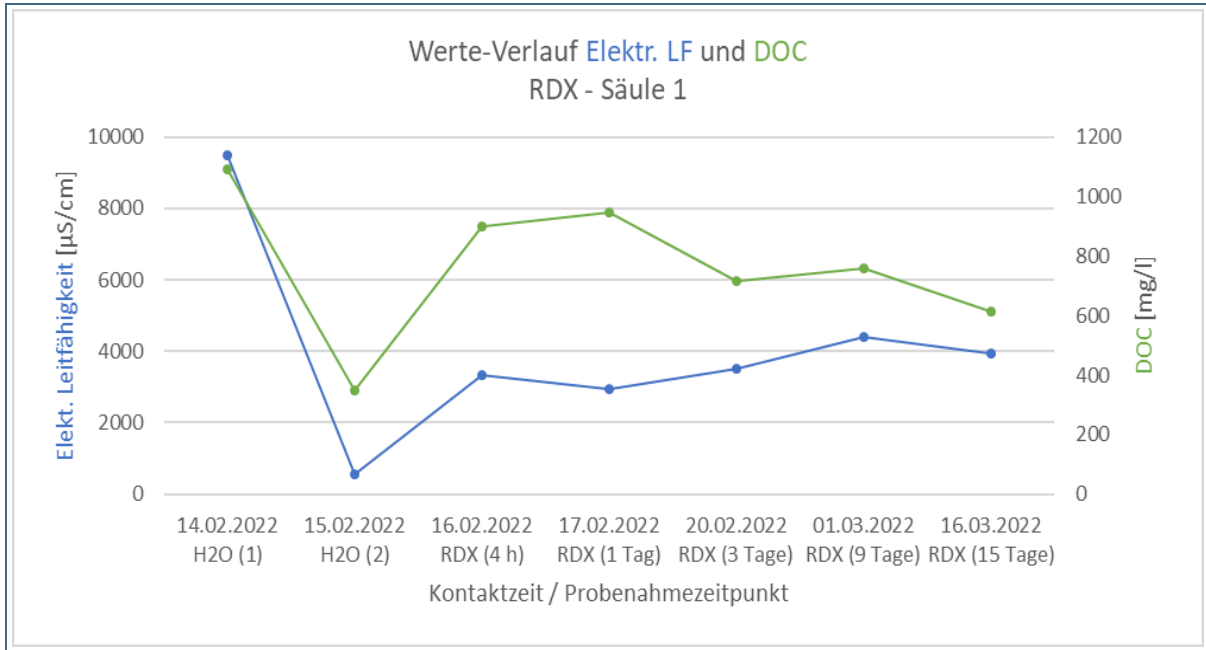


Abb. 27: Elektrische Leitfähigkeit und DOC (Säule 1).

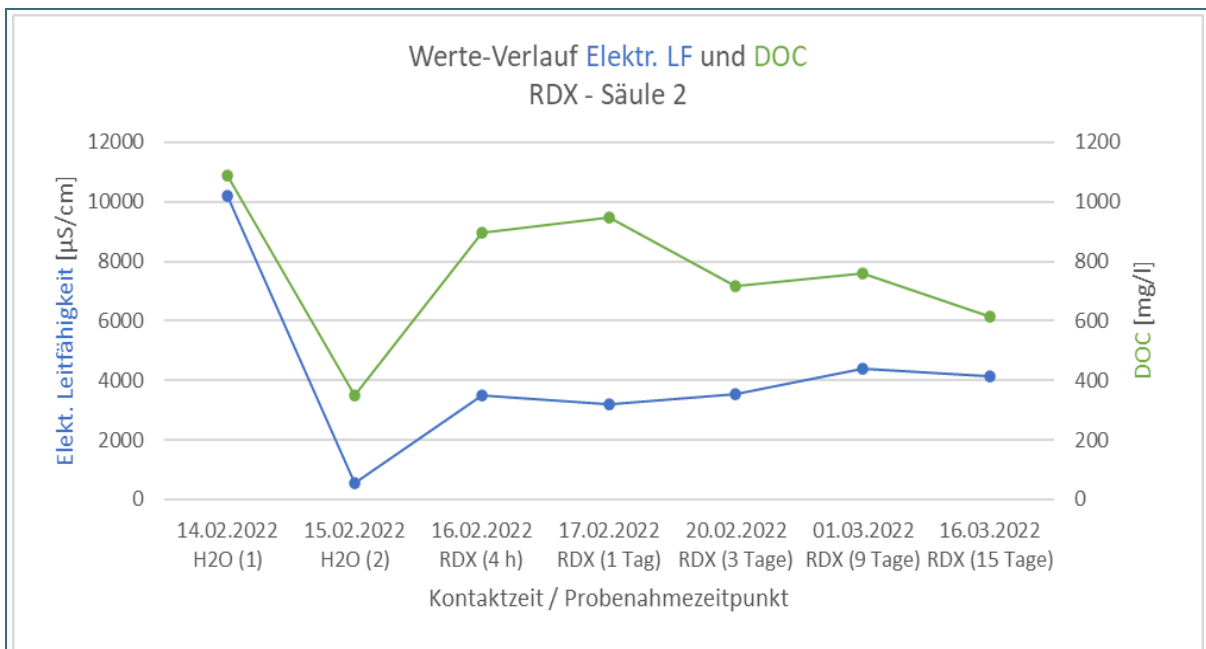


Abb. 28: Elektrische Leitfähigkeit und DOC (Säule 2).

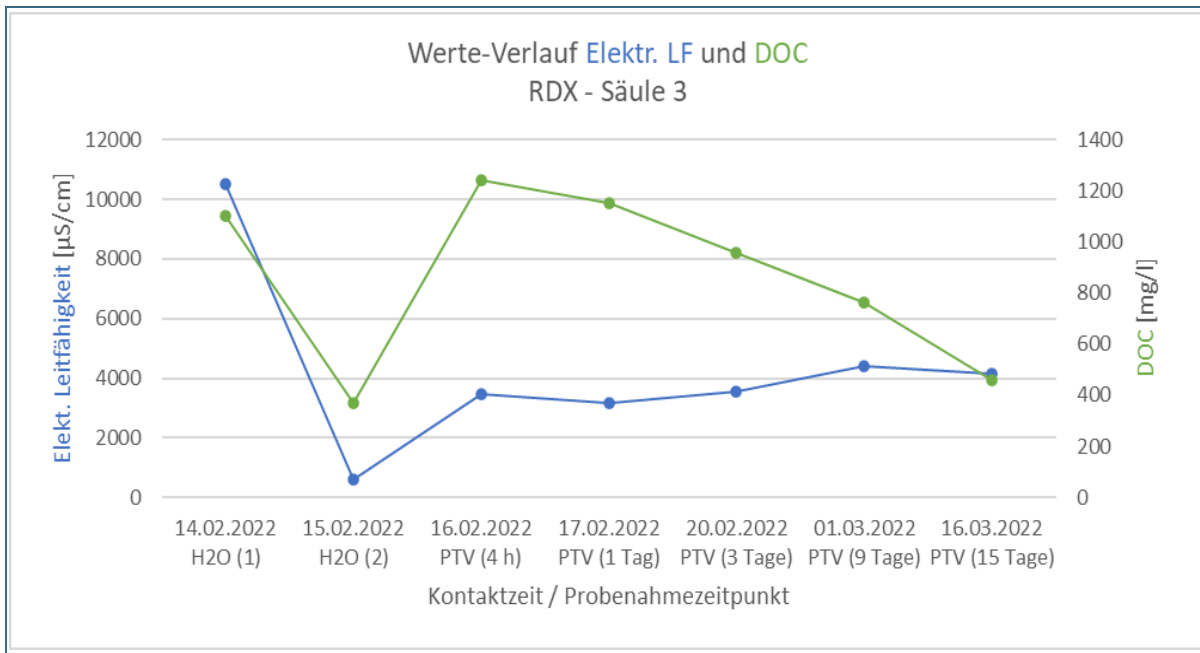


Abb. 29: Elektrische Leitfähigkeit und DOC (Säule 3).

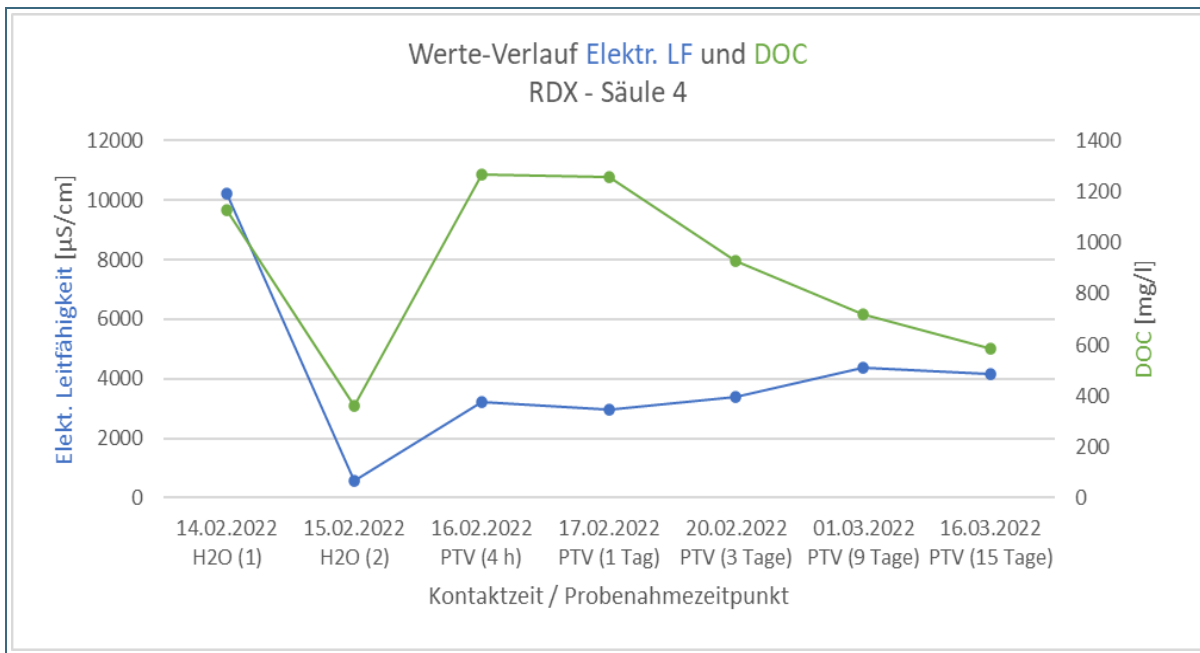


Abb. 30: Elektrische Leitfähigkeit und DOC (Säule 4).

Wertediagramme Eisen, Kupfer und Arsen

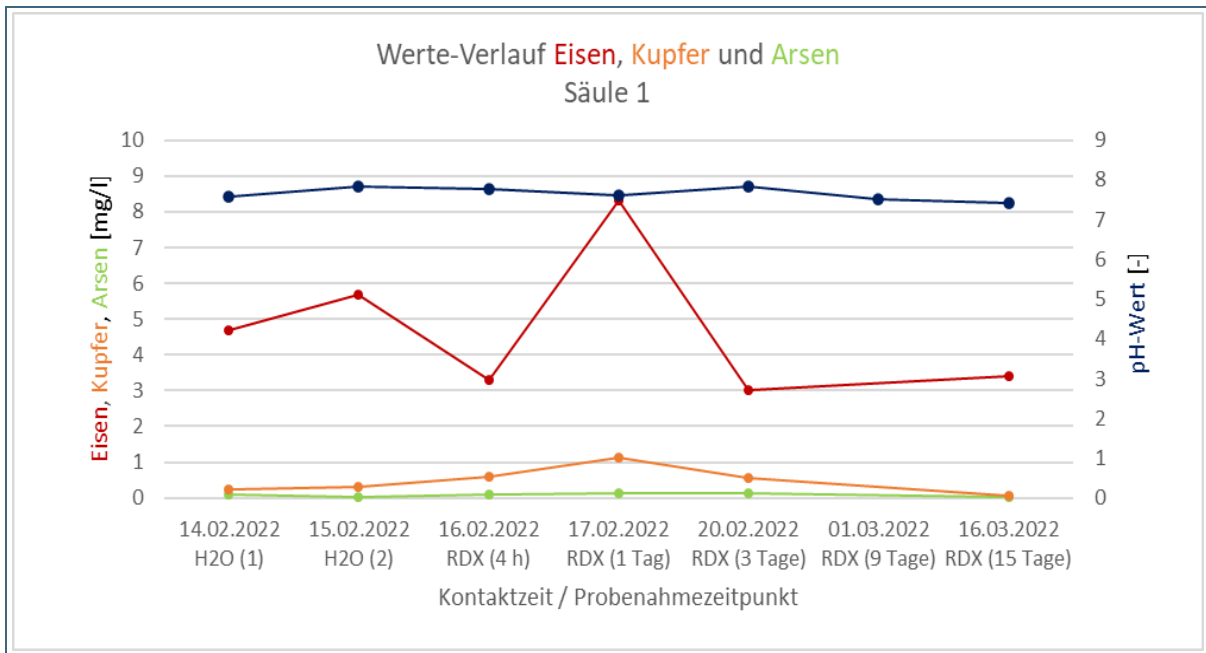


Abb. 31: Eisen, Kupfer und Arsen (Säule 1).

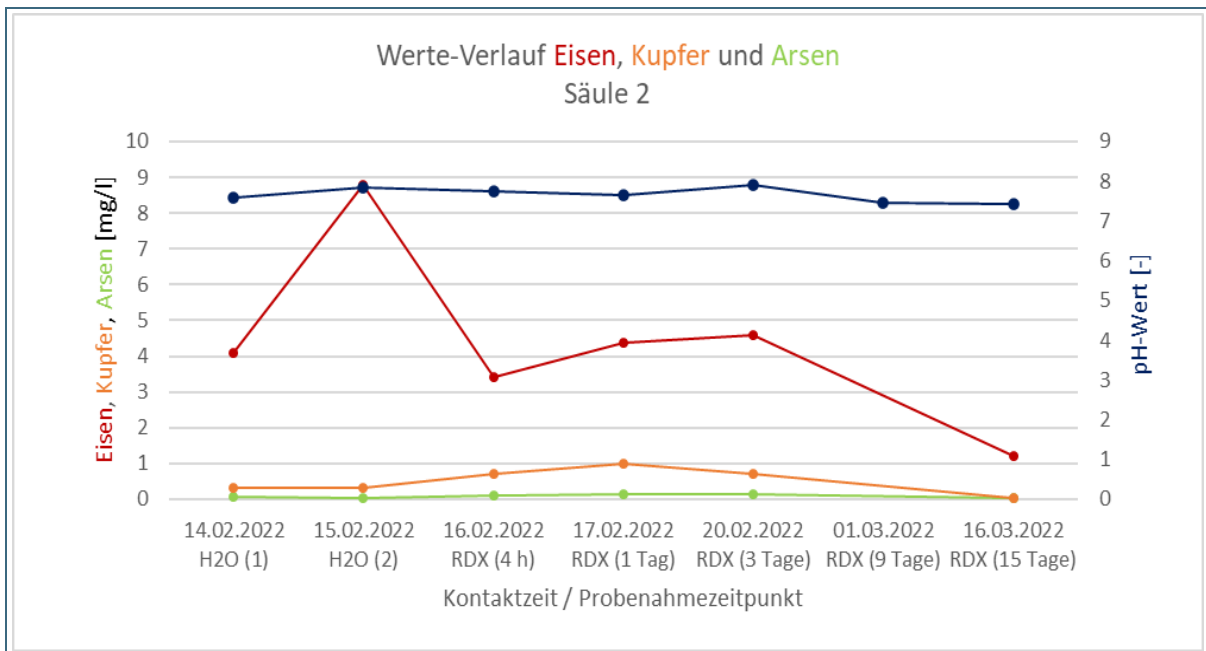


Abb. 32: Eisen, Kupfer und Arsen (Säule 2).

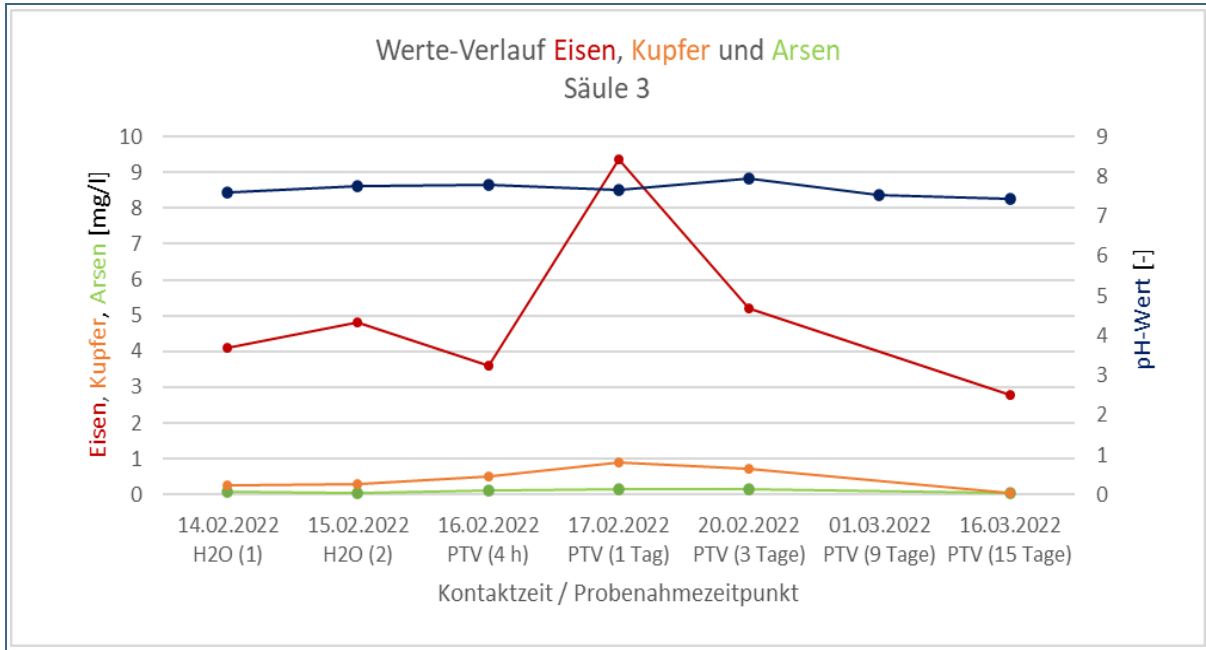


Abb. 33: Eisen, Kupfer und Arsen (Säule 3).

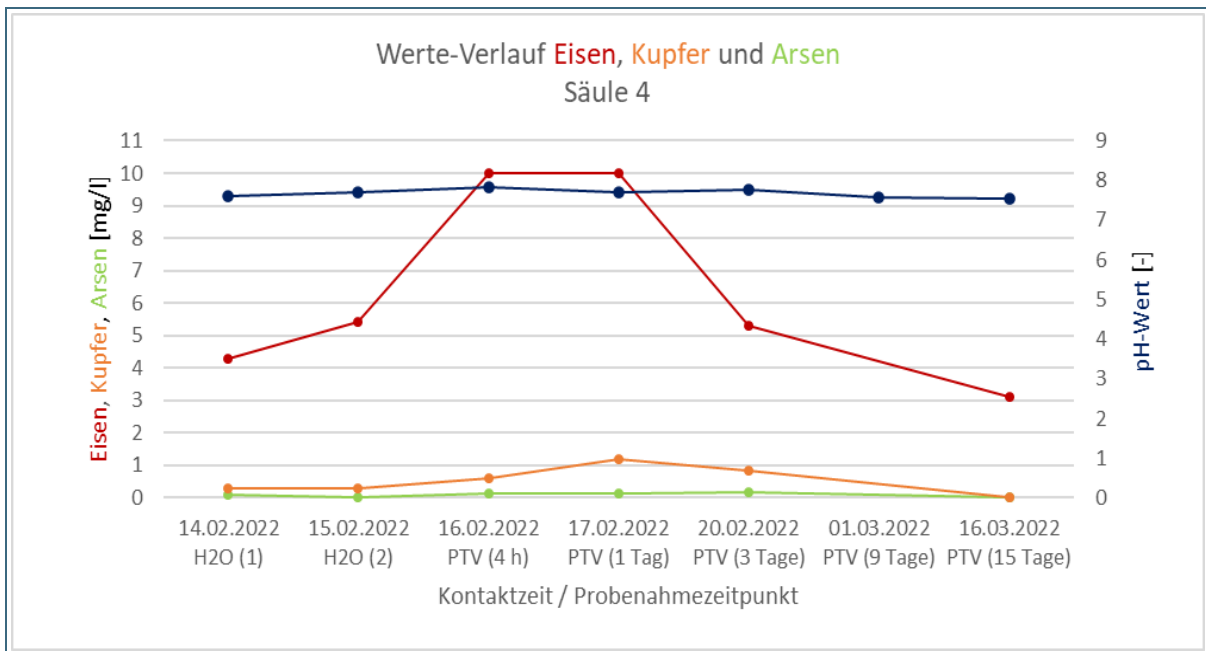


Abb. 34: Eisen, Kupfer und Arsen (Säule 4).

Wertediagramme Nitrat und Sauerstoff

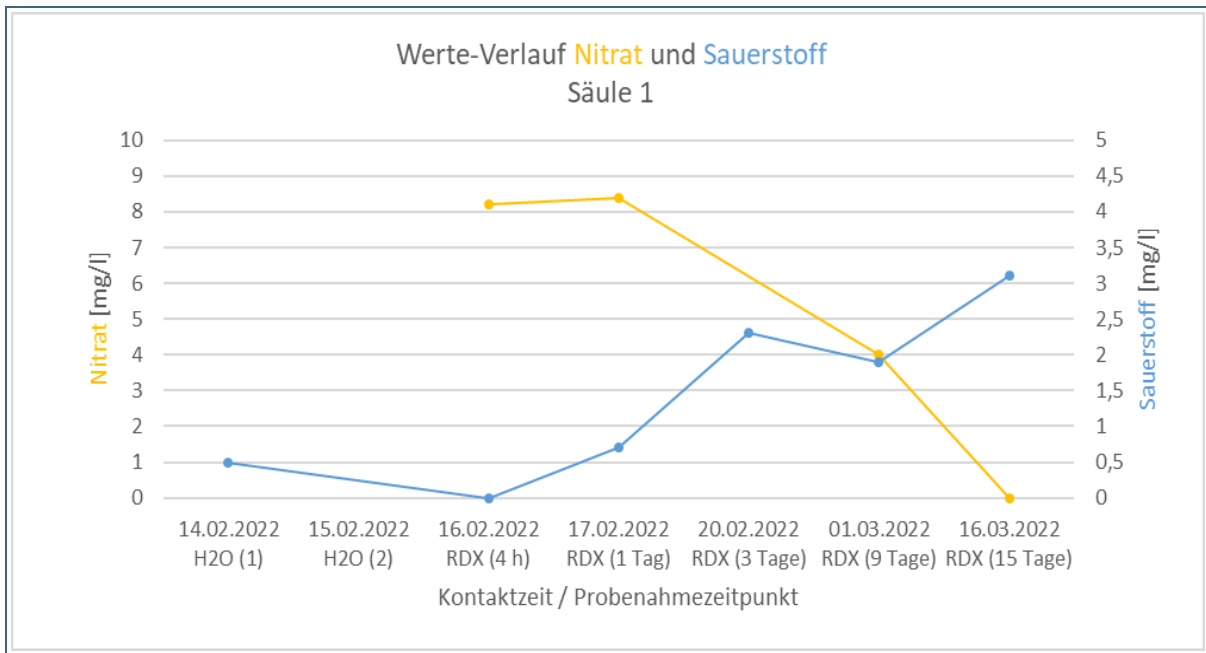


Abb. 35: Nitrat und Sauerstoff (Säule 1).

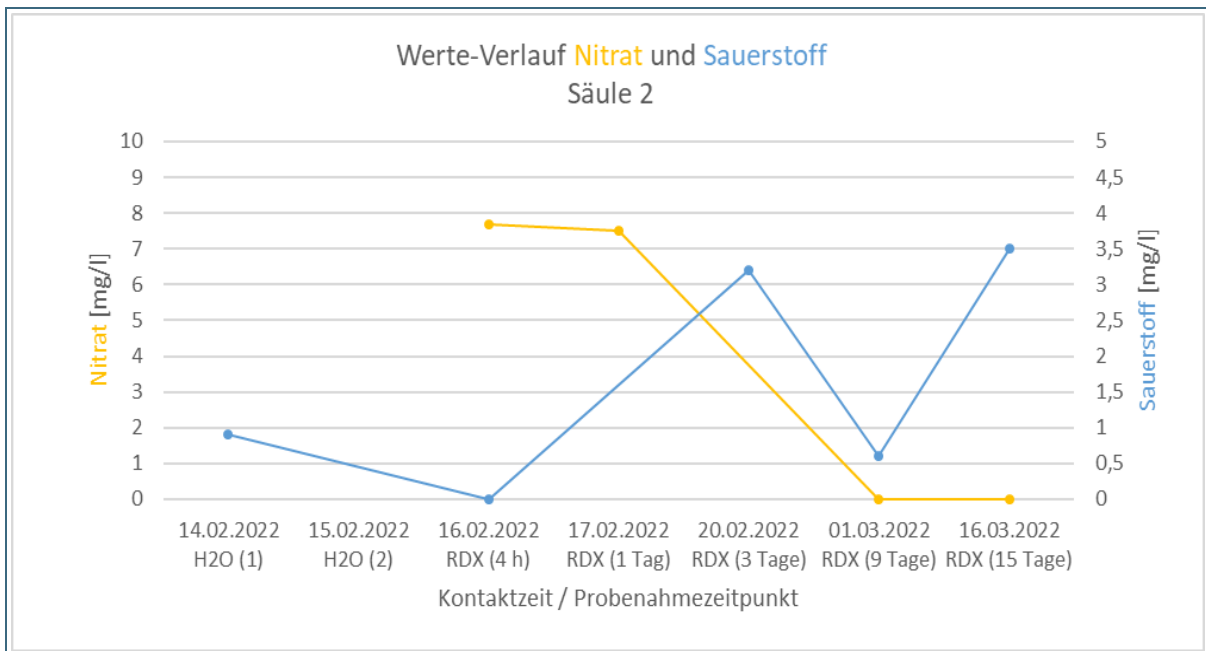


Abb. 36: Nitrat und Sauerstoff (Säule 2).



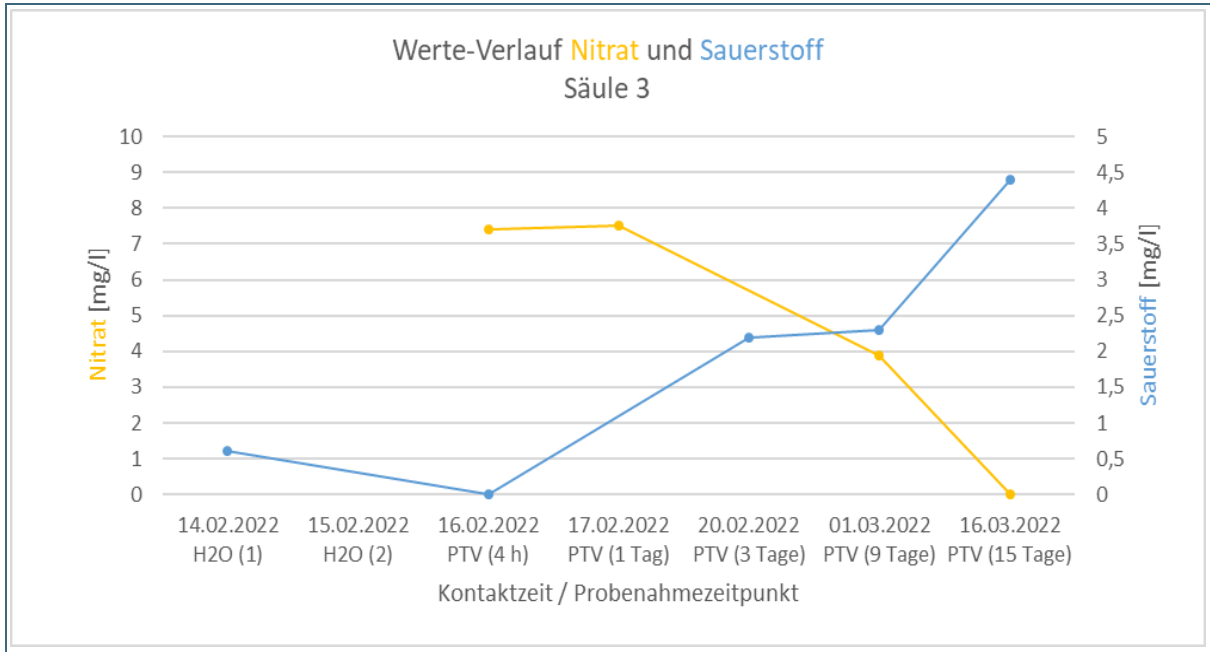


Abb. 37: Nitrat und Sauerstoff (Säule 3).

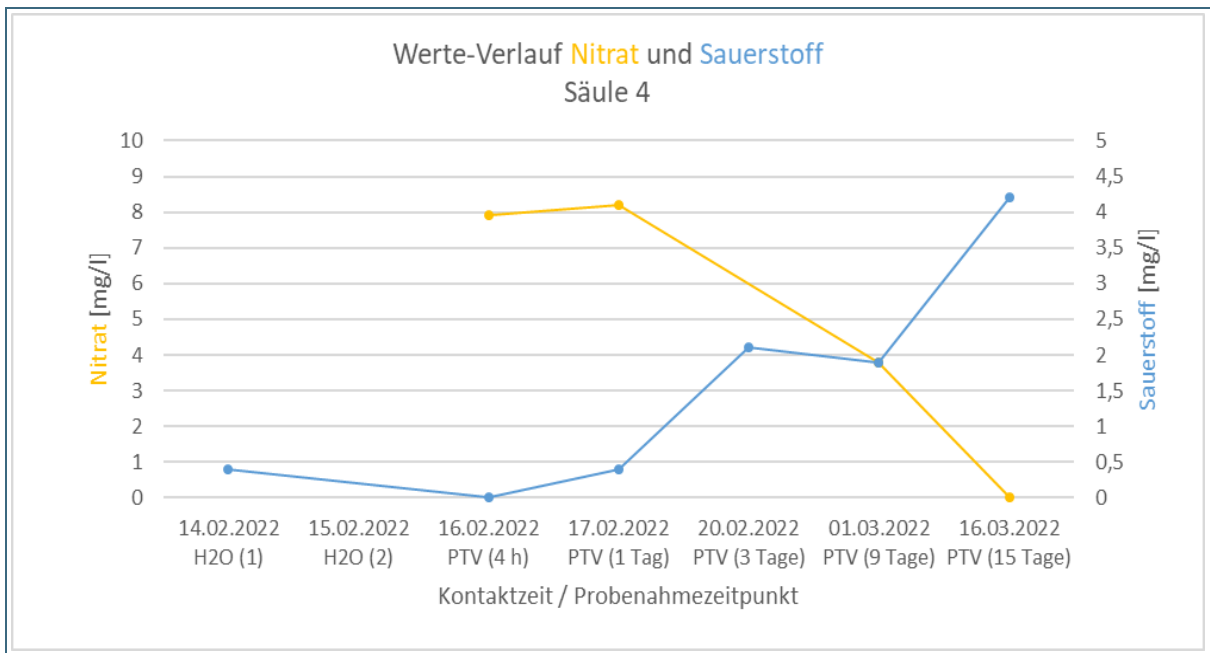


Abb. 38: Nitrat und Sauerstoff (Säule 4).

#### 7.5.4 Mischung der dotierten Lösungen mit Kompost-Eluat

Ergänzend zu den durchgeführten Untersuchungen wurden 75 ml DOC-haltiges Eluat aus der Säulenkonditionierung, also der Sättigung des Komposts mit deionisiertem Wasser, zum Austreiben des Sauerstoffs und zur Steigerung der Aufnahmefähigkeit für wässrige Lösungen mit 75 ml Dotierlösung (100 µg/l an RDX) vermischt, sodass eine Kompost-Eluat-Dotierlösung mit 50 µg/l des Analyten RDX entstand. Verwendet wurde Eluat aus Säule 2.

Gleiches wurde mit 75 ml an Eluat aus Säule 3 und der PTV-Dotierlösung durchgeführt. Nach einer Kontaktzeit von 24 bis 48 Stunden (Probenversand zum Labor Envilytix noch am selben Tag) wurden die Mischungen jeweils auf die Analyten RDX und C1, EPU, DPU, EPA und DPA untersucht. In Tab. 25 sind die Ergebnisse aufgelistet.

Die DOC-Gehalte der beiden Lösungen lagen bei etwa 500 mg/l (DOC-Gehalte der unvermischten Eluate aus der Säulenkonditionierung 1.060 mg/l und 1.100 mg/l).

Tab. 25: ETV-Nachweise in der Kompost-Eluat-Dotierlösung (von 50 µg/l je Analyt).

Parameter	ETV	Kürzel	Einheit	BG	Wert
Hexogen	STV	RDX	µg/l	0,50	47,7
N-Ethyl-N-phenylurethan	PTV	EPU	µg/l	0,50	37,0
N,N-Diphenylurethan	PTV	DPU	µg/l	0,50	33,3
Diphenylamin	PTV	DPA	µg/l	0,50	15,9
Centralit I	PTV	C1	µg/l	0,50	38,3
N-Ethyl-N-Phenylamin	PTV	EPA	µg/l	0,50	32,8

Zuverlässige Aussagen bezüglich einer möglichen Minderung der eingesetzten Parameter durch die DOC-haltigen Eluate können aus den Ergebnissen in Tab. 24 jedoch nicht abgeleitet werden. Eine Analyse der verwendeten PTV-Dotierlösung nach Versuchsende zeigte signifikant reduzierte Konzentrationen bei den Parametern C1, DPU, EPA und DPA. Nur EPU wurde in der Ausgangskonzentration ermittelt, die RDX-Dotierlösung wurde nicht nachuntersucht. Aufgrund der längeren Lagerungszeit der Versuchslösungen zum Zeitpunkt der Versuche (etwa 4 Monate) sind Zerfallsprozesse nicht auszuschließen, obwohl die Lösungen dunkel und kühl gelagert wurden.

Bislang liegen zu derartigen Abbaureaktionen bei PTV keine Daten vor, theoretisch ist aber ein Umbau von DPU zur instabilen Verbindung EPA durch Abspaltung von Seitenketten möglich. Ob dies einen tatsächlich stattfindenden Abbauweg darstellt, wäre mit weiteren Versuchen zu überprüfen.

Im Rahmen der Untersuchungen aus dem Jahr 2018 (vgl. IBH (2018)) waren bei DOC-Gehalten von bis zu 220 mg/l in wässrigen Lösungen keine Minderungen für EPU, DPU und C1 festgestellt worden.

## 7.6 Ergebnisse der Toxizitätsuntersuchungen

Die Tests zur Bestimmung der Schadwirkung auf die aquatischen Toxizitätsindikatoren Fischeier, Leuchtbakterien, Daphnien und Algen wurden analog zu den Untersuchungen an den Proben aus Marktbergel und Boxbrunn durchgeführt. Geprüft wurden die nach den jeweiligen Kontaktzeiten gewonnenen Eluate aus den Säulenversuchen.

Aufgrund der geringen Mengen an Eluat konnten keine Biotests an den unverdünnten Originalproben durchgeführt werden. Die Testreihen begannen mit der ersten Verdünnungsstufe (Faktor 2).

Tab. 26: Ergebnisse aus den Toxizitätstests an den Säuleneluaten für RDX.

Kontaktzeit	G <sub>EI</sub> Fischei	G <sub>L</sub> Leucht- bakterien	G <sub>D</sub> Daphnien	G <sub>A</sub> Algen
Versuchslösung (100 µg/l) RDX	1	1	1	2
4 h	≤ 2	32	4	n. b.
1 Tag	≤ 2	16	≤ 2	n. b.
3 Tage	≤ 2	16	4	n. b.
9 Tage	≤ 2	16	≤ 2	≤ 2
15 Tage	≤ 2	16	≤ 2	≤ 2

G<sub>x</sub>-Werte ≤ 2: für eine unverdünnte Originalprobe stand nicht genügend Eluat zu Verfügung.

n. b.: aufgrund der starken Färbung der Proben war der Algentest (Fluorometrie) nicht durchführbar.

Tab. 27: Ergebnisse aus den Toxizitätstests an den Säuleneluaten für PTV (C1, EPU, DPU, EPA, DPA).

Kontaktzeit	G <sub>EI</sub> Fischei	G <sub>L</sub> Leucht- bakterien	G <sub>D</sub> Daphnien	G <sub>A</sub> Algen
Versuchslösung (100 µg/l) PTV	3	1	1	1
4 h	≤ 2	32	≤ 2	n. b.
1 Tag	≤ 2	16	≤ 2	n. b.
3 Tage	≤ 2	16	≤ 2	n. b.
9 Tage	≤ 2	8	≤ 2	≤ 2
15 Tage	≤ 2	4	≤ 2	≤ 2

G<sub>x</sub>-Werte ≤ 2: für eine unverdünnte Originalprobe stand nicht genügend Eluat zu Verfügung.

n. b.: aufgrund der starken Färbung der Proben war der Algentest (Fluorometrie) nicht durchführbar.

Die Säuleneluate sind gegenüber Fischeiern, Daphnien und Algen als nicht bis gering toxisch einzustufen. Bei den Leuchtbakterien trat keine Toxizität erst ab einer Verdünnung von Faktor 32 auf, die Toxizität ist hier als mäßig zu bezeichnen (zum Vergleich: gemäß Anhang 22 Abschnitt C Absatz 3 Nummer 3 der Abwasserverordnung (AbwV) ist bei der chemischen Industrie eine Direkteinleitung von Abwasser in den Vorfluter mit einem G<sub>L</sub>-Wert von 32 noch zulässig).

Deutlich wird, dass die Toxizität der Eluate nicht aus den ETV begründet ist, sondern die Wirkung auf die Wasserorganismen auf gelöste Inhaltsstoffe (DOC) aus dem Kompost zurückzuführen ist. Die dotierten Versuchslösungen (100 µg/l je Analyt) wiesen niedrige G<sub>x</sub>-Werte von 1 bis 3 auf (Tab. 26 und Tab. 27), es traten keine Hemmungen der aquatischen Organismen auf. Die Toxizität der Eluate ergab sich erst nach dem Durchgang durch den Kompost. Hierbei ergab sich eine Beaufschlagung der Säuleneluate von 349 mg/l bis 1.270 mg/l an DOC (siehe Tab. 21 bis Tab. 24).

## 7.7 Folgerungen zu den Laborversuchen zur In-situ Immobilisierung

### 7.7.1 Minderungserfolg und Eignung des Kompostes

Sowohl RDX als auch die pulvertypischen Verbindungen C1, EPU und DPU sowie die potenziellen Abbauprodukte EPA und DPA konnten im Verlauf der Laborversuche zu 100 % gemindert werden. In keiner Probe waren ETV nachweisbar. Bereits nach vier Stunden waren die 100 µg/l beider Versuchslösungen vollständig zurückgehalten.

Auch nach 5-maligem Beschicken der Kompostsäulen mit „frischer“ Versuchslösung ergab sich kein Durchbruch von ETV.

Bei früheren Versuchen im Zusammenhang mit durchgeführten Sanierungen und Forschungen hatte sich gezeigt, dass RDX und insbesondere die PTV (C1, EPU und DPU) zum Teil nur in unbefriedigendem Maß minderbar waren. Vor allem EPU erreichte in den Vorversuchen zur Sanierung in Marktbergel nur eine Reinigungsleistung von knapp 40 %.

Dass auch diese Substanzen während der aktuellen Versuchsreihe vollständig minderbar waren, ist ein weiterer Hinweis für die Eignung von Kompost als Medium für Sorption und Abbau von ETV. Nachdem bereits nach vier Stunden kein Durchbruch erfolgte, ist davon auszugehen, dass die „spontane“ Minderungsleistung der Physisorption zuzusprechen ist. Gasbildung und Flüssigkeitsaustritte nach rund zehn Tagen legen den Schluss nahe, dass mikrobielle Prozesse in den Kompostsäulen eingesetzt haben.

Die Pulverstabilisatoren bzw. -phlegmatisierer EPA und DPA, die ggf. auch Metaboliten von EPU und DPU darstellen, wurden in keiner der Proben nachgewiesen. Gleiches trifft für die Proben aus Marktbergel und Boxbrunn zu. Eine Bildung von EPA und DPA durch Kontakt von PTV mit Kompost ist somit nicht oder höchstens in geringfügigem Umfang anzunehmen. Ein Gefahrenpotenzial für das Grundwasser geht damit von den beiden Verbindungen bei einer Sanierung mittels IM nicht aus.

Grundlegend ist festzuhalten, dass unter den Versuchsbedingungen und mit dem verwendeten Kompost<sup>9</sup> eine grundlegende Eignung zur Sanierung eines Standorts gegeben wäre, der mit dem Stoffspektrum RDX, C1, EPU und DPU sowie gegebenenfalls mit EPA und DPA belastet ist. Aufgrund der guten Bindung von TNT und ADNT an Kompost, wie sie bei früheren Untersuchungen und Sanierungen bereits nachgewiesen werden konnte, wäre eine vollständige Minderung durch den aktuell verwendeten Kompost ebenfalls anzunehmen.

Eine Schadstoffminderung durch DOC-haltige Komposteluatete allein konnte nicht belegt werden. Wie bereits im Forschungsbericht der IBH Weimar GmbH aus dem Jahr 2018 erläutert, wird angenommen, dass die kontaminierten Lösungen hierzu mit Kompostfeststoff Kontakt haben müssen, um in relevanten Maßen adsorbiert zu werden.

---

<sup>9</sup> Hier: Grünschnitt, Rottegrad V, Siebung 0-15 mm, hoher DOC und hohe Extinktion im UV-Licht bei 436 und 254 nm als Maß für den Huminstoffanteil.

### 7.7.2 Chemisch-mikrobielle Prozesse in den Säulen

Mit Bezug auf die Diagramme in Abb. 27 bis Abb. 38 können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Die Ergebnisse der Kompostspezifikation zeigten eine chemisch-physikalische Konstanz über alle vier Säulen. Die Wasseraufnahme beziehungsweise der Wasserbedarf zur Sättigung der Kompostfüllung war nahezu gleich (circa 850 ml).

Auch die Konzentrationen an Ammonium waren über die vier Säulen hinweg auf einem ähnlichen Niveau (36 mg/l bis 39 mg/l).

Bei allen vier Säulen waren in den Eluatlen der ersten Säulenconditionierung sehr hohe elektrische Leitfähigkeiten (9.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bis 10.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) messbar, die in den Proben der zweiten Spülung mit deionisiertem Wasser auf ein Niveau von einigen 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  abfielen. Analog verhielt es sich mit dem Gehalt an DOC. Hier fielen die Werte von über 1.000 mg/l auf ein Niveau von rund 400 mg/l ab. Die Befunde lassen darauf schließen, dass zunächst eine große Menge an gelösten organischen und anorganischen Verbindungen mobilisiert wird, die nach der Rotte nur schwach an Feststoffpartikel gebunden sind.

Nach Aufgabe der beiden Versuchslösungen mit RDX beziehungsweise PTV steigen die Leitfähigkeit und der Gehalt an DOC wieder deutlich an. Im Fall der Säulen 1 und 2 (RDX) auf ein Niveau von 3.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bis 4.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (elektrische Leitfähigkeit) und DOC-Gehalten von rund 900 mg/l. Die Leitfähigkeiten in Säule 3 und 4 steigen auf ein ähnliches Niveau, während der DOC hier auf circa 1.250 mg/l ansteigt.

Für die PTV kommt es im weiteren Versuchsverlauf bei den längeren Standzeiten zu einer stärkeren Abnahme des DOC. Es ist anzunehmen, dass die Abnahme des DOC auf eine anaerobe Veratmung von gelösten organischen Verbindungen zurückzuführen ist. Nitrat sinkt im Verlauf der Versuchsreihe auf null ab. Dies ist ebenfalls ein Hinweis auf Abbauprozesse.

Der Anstieg der Sauerstoffgehalte in den Eluatproben ist auf Sauerstoffeinträge über die Dotierlösungen und die Auffanggefäße zurückzuführen. Die Vorratsbehälter der Dotierlösungen und die Auffanggefäße waren nur mit Kunststoffkappen abgedeckt.

Mit zunehmender Standzeit konnte somit mehr Sauerstoff aus der Umgebungsluft in die Dotierlösungen und Eluate übergehen. Photolytische Prozesse in den Säulen können durch den Lichtschutz aus Aluminiumfolie ausgeschlossen werden. Der Anstieg der Sauerstoffkonzentrationen ist somit nicht durch Prozesse in den Säulen bedingt.

Die mit längeren Standzeiten abnehmenden Konzentrationen an Eisen und Kupfer sind wahrscheinlich durch Bindung/Komplexierung der Metalle an den Kompost bedingt. Der pH-Wert bleibt über die Versuchsdauer hinweg annähernd konstant.

### 7.7.3 Toxizität der Versuchseluate

Die Eluate, die aus den Versuchssäulen gewonnen wurden, stellten sich als weitestgehend nicht oder nur gering toxisch für Wasserorganismen heraus. Die hemmende Wirkung der Eluate auf Leuchtbakterien ist wahrscheinlich auf gelöste Stoffe aus der Kompostmatrix zurückzuführen. Im Falle der Säuleneluate mit PTV gingen die Toxizitäten mit zunehmender Kontaktzeit bzw. mit zunehmender Verdünnung der Kompostinhaltsstoffe (klarer werdende Eluate) deutlich zurück, bei den Eluatlen mit RDX nahm dagegen die Toxizität nur um eine Verdünnungsstufe ab.

Die Versuchslösungen mit 100 µg/l der jeweiligen Analyten hatten keine oder nur eine geringe toxische Wirkung auf die biologischen Wasserindikatoren.

Die Ammonium-Konzentrationen aus der ersten Säulenkonditionierung lagen mit um die 40 mg/l im nicht-toxischen Bereich. Bei Untersuchungen von Sprengtrichtereluat an anderen Standorten wurde eine Toxizität für Algen und Daphnien ab Ammonium-Konzentrationen von 250 mg/l festgestellt, für Leuchtbakterien war bis 1g/l keine Schädigung zu beobachten.

Die Trübung der Eluatproben wurde in den Leuchtbakterientests vom Luminometer herausgerechnet, sodass ein Einfluss auf das Messergebnis auszuschließen ist.

In den frischen Eluatproben mit hohen Konzentrationen an gelösten Inhaltsstoffen aus dem Kompost sind demnach Substanzen vorhanden, die eine gewisse Toxizität verursachen. Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen liegen jedoch keine Hinweise auf die Art der hierfür verantwortlichen Substanzen vor.

## 8 Versuchsreihe mit Aktivkohle-Vlies „Tektoseal“

### 8.1 Versuchskonzept

Die Versuche zur Reinigungsleistung eines Aktivkohle-Vlieses für die Versuchslösungen RDX / PTV wurden ebenfalls mit den Elutionssäulen durchgeführt. Es wurden zwei Versuchsreihen parallel durchgeführt (Säule 1 und Säule 2). Beide wurden mit der gleichen Lösung beschickt.

Die Firma Freco Geosysteme in Würth am Main vertreibt Geotextilien und Vliesstoffe der Firma HUESKER Synthetic GmbH. Die Produktpalette beinhaltet unter anderem einen Vliesstoff zur Abreinigung von Kohlenwasserstoffverbindungen („Tektoseal Active AS 400“) und den Vliesstoff „Tektoseal Active AC“.

Letzterer Aktivkohleträger wurde für die Säulenversuche ausgewählt. Es handelt sich hierbei um ein doppelagiges Geotextil mit Steppnähten im Abstand von 2 cm. Die abgesteppten Streifen zwischen den Nähten sind mit Aktivkohle-Granulat gefüllt (Abb. 39).

Das Versuchskonzept sah vor, das Aktivkohle-Vlies zwischen zwei Lagen aus Filtersand einzubauen und die Versuchslösungen von oben tröpfchenweise aufzugeben. Es sollte sich eine „Schadstofffront“ langsam durch das Vlies bewegen. Eine Lage aus Vliesstoff BS 20 (Abb. 40) sollte den Strömungswiderstand an der Unterseite des Tektoseal Activ AC erhöhen und somit unter der Aktivkohle als „Bremsvlies“ fungieren, um eine ausreichende Kontaktzeit der Versuchslösungen mit der Aktivkohle zu gewährleisten.





Abb. 39: Tektoseal Active AC (Aktivkohlevlies).



Abb. 40: Vliesstoff BS 20 („Bremsvlies“).

Als Vorbereitung für den Versuch wurden das Aktivkohle- und „Bremsvlies“ kreisförmig in einem Durchmesser von 80 mm vernäht und ausgestanzt (Abb. 41). Das Vernähen verhinderte ein Ausrieseln des Aktivkohlegranulats.

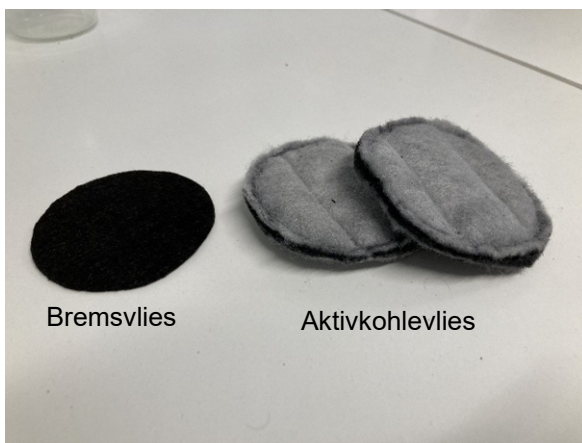


Abb. 41: Brems- und Aktivkohlevlies.



Abb. 42: Einbau des Aktivkohlevlieses auf „Bremsvlies“ und Filtersand.

Als Säulenfüllung wurden nicht Filtersand, sondern gleichkörnige Glaskugeln im Durchmesser 106-600 µm (Produkt Spherastek der Firma Donroad GmbH) verwendet. Der Aufbau in der Säule stellt sich folgendermaßen dar:

1. Lage 1: Filtersand (Glasperlen),
2. Lage 2: „Bremsvlies“,
3. Lage 3: Aktivkohlevlies (Tektoseal),
4. Lage 4: Quellton-Granulat (ringförmig)

Um den Fließweg der Versuchslösungen durch das Vlies hindurch zu erzwingen und ein Vorbeisickern entlang der Säulenwände zu vermeiden, wurde mittels Glasröhrchen und Trichter fein zermörstertes Quellton-Granulat ringförmig auf das Aktivkohlevlies aufgestreut (Abb. 43). Nach Aufquellen durch Wasserzugabe bildete sich ein „Dichtring“.

5. Lage 5: Spherastek-Glasperlen (Füllhöhe 30 cm, Abb. 44).

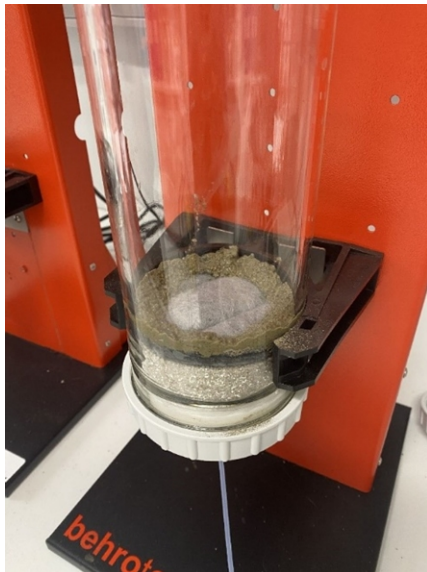


Abb. 43: Dichtring aus Quellton.



Abb. 44: Einfüllen der Glasperlen.

## 8.2 Versuchsdurchführung

Die Mischung aus beiden Versuchslösungen RDX/PTV (100 µg/l) 1:1 in einer daraus resultierenden Konzentration von 50 µg/l je Komponente wurde tröpfchenweise in die vorbereiteten Elutionssäulen aufgegeben (2 Tropfen pro Minute). Das Aktivkohle-Vlies wurde somit langsam durchsickert. Es wurde so lange Versuchslösung aufgegeben bis 150 ml an Proben-Eluat aufgefangen waren.

Die beiden Proben wurden an das Labor Envilytix GmbH versendet.

## 8.3 Analytische Befunde aus der Versuchsreihe Aktivkohlevlies „Tektoseal“

In der nachfolgenden Tab. 28 sind die analytischen Befunde aus den Säulenversuchen mit dem Aktivkohlevlies Tektoseal aufgelistet.

Tab. 28: Ergebnisse aus der Versuchsreihe "Tektoseal".

Verbindung	Einheit	BG	Säule 1 (2219554)	Säule 2 (2219555)	Ausgangskon- zentration je Analyt
Hexogen	µg/l	0,50	27,6	29,7	50 µg/l
N-Ethyl-N-Phenylurethan (EPU)	µg/l	0,50	17,9	23,2	50 µg/l
N,N-Diphenylurethan (DPU)	µg/l	0,50	15,2	20,6	50 µg/l
Diphenylamin (DPA)	µg/l	0,50	0,61	0,74	50 µg/l
Centralit I (C1)	µg/l	0,50	14,1	19,6	50 µg/l
N-Ethyl-N-Phenylamin (EPA)	µg/l	0,50	< BG	< BG	50 µg/l

Die Minderungsleistung betrug 55 bis 59 % für RDX und 28 bis 46 % für C1, EPU und DPU. EPA und DPA wurden praktisch vollständig zurückgehalten.

## 8.4 Folgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Durchsickerung des Aktivkohle-Vlieses unter den gegebenen Versuchsbedingungen keine vollständige Abreinigung der ETV aus der dotierten Versuchslösung möglich war. Erkennbar ist eine tendenziell höhere Minderungsleistung für die PTV im Vergleich zu RDX.

Im direkten Vergleich mit den kompostgefüllten Säulen muss beachtet werden, dass dort etwa 2 kg an Adsorbens über mehrere Stunden bis Tage im Kontakt mit den Versuchslösungen standen, während im Vlies nur wenige Gramm an Aktivkohle wirksam waren und die Kontaktzeit nur Sekunden bis maximal Minuten betragen haben kann.

Ebenfalls ungünstig ist der unrealistisch niedrige Auflastdruck auf dem Vlies. Bei einer Bodenauflast von mehreren Tonnen pro Quadratmeter werden die gesteppten Streifen breitgedrückt und die Aktivkohlefüllung dicht gepackt. Die Bedeutung der Nähte als bevorzugte Fließwege durch das Vlies tritt dadurch zurück.

Als äußerst schwierig hat sich der dichte Anschluss der Vlies-Pads an die Glasröhren der Versuchseinrichtung erwiesen. Ein genaues Einpassen oder Ankleben war nicht möglich. Behelfsweise wurde Bentonit als trockenes feinkörnig zerdrücktes Granulat am Rand aufgestreut, das beim Quellen aber eher an der Oberfläche der Pads blieb und den Ringspalt zum Glas nicht zuverlässig abdichten konnte.

Vor dem Hintergrund der Einschränkungen des Versuchsaufbaus sind die Untersuchungsergebnisse als außerordentlich gut einzuordnen.

Wesentliche Erkenntnis aus dem Versuch ist es, dass im Aktivkohlevlies selbst nach extrem kurzer Kontaktzeit bereits rund 70 % der Gesamtmenge an ETV aus der Versuchslösung zurückgehalten wurden.

Unter Realbedingungen erscheint ein vollständiger Rückhalt der ETV durchaus möglich, da durch die flächige Auflast eine größere Kontaktfläche und eine langsamere Durchsickerung (deutlich längere Kontaktzeit) erreicht wird.

Das Vlies sollte unter realistischen Bedingungen durch weitere Versuchsreihen validiert werden. Durch eine flächige Vernähung von Basis und Deckvlies können vermutlich Durchgänge entlang der Nähte weitestgehend reduziert werden.

## 9 Laborversuche zur ETV-Mobilisierung durch Kompost-Eluat

### 9.1 Versuchskonzept

Bei Sprengplätzen oder einem sonstigen mit ETV kontaminierten Standorts, der mittels IM saniert wurde, sind im Idealfall die ETV vollständig immobilisiert oder abgebaut. Aus den mit Kompost gesicherten Sanierungsbereichen (z. B. Trichtern) sollte kein Austrag an ETV mehr stattfinden.

Eine bislang noch nicht untersuchte Fragestellung ist, ob ETV-Belastungen in der Bodenzone unterhalb der sanierten Trichter als Effekt der IM-Sanierung mobilisiert werden können. Durch jahrzehntelanges Durchsickern der Trichter mit Niederschlagswasser werden ETV aus den Trichtern nach unten ausgetragen und führen hier zu einer Sekundärkontamination.

Durch die Sanierung und den Einbau von Kompost (50 t/Trichter), wird die Qualität des Sickerwassers aus der Trichterfüllung dahingehend verändert, dass es hohe Konzentrationen an gelösten organischen Verbindungen enthält. Es bestand die Vermutung, dass diese organischen Substanzen als Adsorbens für ETV fungieren könnten, die dann wiederum an DOC gebunden mobilisiert und ins Grundwasser verlagert werden.

Auf Grundlage dieser Überlegungen sollten geeignete, mit ETV-belastete Realproben gewonnen und mit Kompost-Eluat durchsickert werden. Das entstehende Sickerwasser bzw. Eluat sollte auf seinen Gehalt an ETV untersucht werden.

## 9.2 Untersuchung der Realproben aus Marktbergel

Aus den gewonnenen Realproben aus Marktbergel (Kapitel 6.1.3.2) wurde je Trichter (T27 und T30) eine Mischprobe gebildet, homogenisiert und mittels 10:1-Schütteleluat auf ihren Gehalt an ETV untersucht.

Die aus den Trichtern T27 und T30 gewonnen Proben waren nachweislich mit RDX, TNT/ADNT, C1, EPU und DPU sowie Nitropenta belastet und somit für die Durchführung der Versuche geeignet.

Ergänzend zu den beiden Mischproben aus T27 und T30 wurde die Einzelprobe „T30-2 RSP Nat. B.“ untersucht. Hierbei handelte es sich um eine 5 cm dicke Schicht aus hellem Sand aus der Rammkernbohrung T30-2, für die anzunehmen war, dass es sich um natürliches Material handelt. Im Eluat dieser Probe waren keine ETV nachweisbar.

## 9.3 Versuchsdurchführung

Auch die Realproben sollten mit Hilfe der Elutionssäulen untersucht werden. Aus den homogenisierten Mischproben T27 und T30 wurde dazu je eine Säulenfüllung gebildet.

Nach Bestimmung des ETV-Gehalts der beiden Proben sollte das Bodenmaterial auf einer Schicht aus ca. 1 cm Filtersand in die beiden Glassäulen eingebaut werden. Das Material aus T27 erwies sich jedoch als so stark bindig (schluffig-tonig) und die Durchlässigkeit so gering, dass entschieden wurde, lediglich den Boden aus T30 zu verwenden.

Das Bodenmaterial wurde in Säule 1 und Säule 2 auf ein ca. 2 cm mächtiges Sandbett einbaut. Die Füllhöhe betrug ca. 17 cm (Abb. 45). Der Boden wurde mittels Fallgewicht lagenweise verdichtet.

Anschließend wurde Komposteluat in Säule 2 aufgegeben. Die braune, stark DOC-haltige Lösung wurde dazu eigens mittels 10:1-Eluat aus noch „vorrätigem“ Kompost der Säulenversuche hergestellt. Säule 1 wurde zum Vergleich mit deionisiertem Wasser beschickt.

Die Kompostlösung und das deionisierte Wasser wurde mit 2 Tropfen pro Minute aufgegeben. Nach Gewinnung von 200 ml Eluat (45 Stunden Laufzeit – 0,5 ml/min – Gesamtmenge 1.350 ml) wurde der Versuch beendet und die Proben wurden zum Labor Envilytix GmbH transportiert. In die Säulen eingebaut wurden 1,75 kg an belastetem Bodenmaterial, so dass sich ein Feststoff-Wasserverhältnis von rund 1:1 ergab.

Die Eluate waren klar und wiesen eine hellgelbe Färbung auf (Abb. 46). Dies zeigt, dass die farbgebenden DOC-Bestandteile des Komposteluats – und damit auch ggf. anhaftende ETV-Verbindungen – vom eingesetzten Boden zurückgehalten wurden.



Abb. 45: Elutionssäule mit Realprobe aus T30.

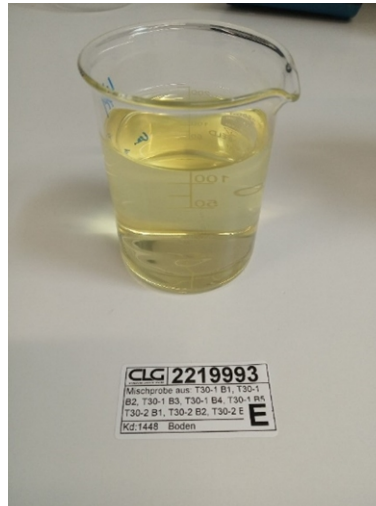


Abb. 46: Elution aus Realprobe T30 (Komposteluat).

## 9.4 Analytische Befunde aus der ETV-Mobilisierung

In Tab. 29 sind die Ergebnisse aus den Untersuchungen der Realprobe T30 und den beiden Säuleneluat mit deionisiertem Wasser und Kompost-Eluat aufgelistet.

Tab. 29: Ergebnisse der Säulenversuche mit Komposteluat.

Verbindung	Einheit	S4-Eluat (Spezifizierung der Realprobe T30)	Säuleneluat mit <u>deion. Wasser</u>	Säuleneluat mit <u>Kompost-Lösung</u>
Oktogen	µg/l	< BG	< BG	< BG
Hexogen	µg/l	<b>0,71</b>	<b>9,74</b>	<b>8,55</b>
1,3,5-Trinitrobenzol	µg/l	< BG	< BG	< BG
1,3-Dinitrobenzol	µg/l	< BG	< BG	< BG
3,5-Dinitroanilin	µg/l	< BG	< BG	< BG
2,4,6-TNT	µg/l	< BG	< BG	< BG
4-Amino-2,6-dinitrotoluol	µg/l	<b>2,25</b>	<b>4,60</b>	<b>4,98</b>
2-Amino-4,6-dinitrotoluol	µg/l	<b>1,94</b>	<b>0,75</b>	<b>1,33</b>
2,6-Dinitrotoluol	µg/l	< BG	< BG	< BG
2,4-Dinitrotoluol	µg/l	<b>3,74</b>	< BG	< BG
Akardit 1	µg/l	< BG	<b>4,45</b>	<b>3,88</b>
Akardit 2	µg/l	< BG	< BG	< BG
Nitropenta	µg/l	<b>346</b>	<b>340</b>	<b>334</b>
N-Ethyl-N-phenylurethan (EPU)	µg/l	<b>6,61</b>	< BG	< BG
Centralit II (C2)	µg/l	<b>0,36</b>	< BG	< BG
N,N-Diphenylurethan (DPU)	µg/l	<b>1,49</b>	<b>7,76</b>	<b>13,8</b>
Diphenylamin (DPA)	µg/l	< BG	< BG	< BG
Centralit I (C1)	µg/l	<b>8,88</b>	<b>25,6</b>	<b>22,9</b>
N-Ethyl-N-Phenylamin (EPA)	µg/l	< BG	< BG	< BG



## 9.5 Folgerungen

Die Ergebnisse der chemischen Untersuchungen zeigten zum einen, dass unter den Versuchsbedingungen mehr ETV in den Säuleneluaten als im „S4-Eluat“ der gleichen homogenisierten Probe nachweisbar waren. So waren Hexogen, DPU und C1 in erheblich größeren Konzentrationen in den Säuleneluaten messbar. EPU, 2,4-DNT und Centralit II wurden ausschließlich im 10:1-Schüttelamat festgestellt. Ob es sich hierbei um eine Inhomogenität des Probenmaterials handelt, lässt sich aufgrund der geringen Probenanzahl nicht feststellen.

Grundlegend ist auch bei den Untersuchungsergebnissen für die Realproben zu beachten, dass das Wasser-Feststoff-Verhältnis wesentlich mehr auf der Seite des Feststoffs lag sodass naturgemäß deutliche höhere Stoffkonzentrationen gemessen werden als im 10:1 Standard-Eluat.

Im Vergleich der Ergebnisse aus der Elution mit deionisiertem Wasser und mit Kompost-Eluat hat sich kein erheblicher Unterschied der Stoffkonzentrationen ergeben.

In beiden Eluaten zeigten sich erhebliche ETV-Nachweise. Ein Hinweis auf eine verstärkte Mobilisierbarkeit der ETV durch Komplexbindungsprozesse an Huminstoffen hat sich aber nicht gefunden. Ähnliche Beobachtungen wurden auch bei den Forschungsergebnissen aus dem Jahr 2018 gemacht (IBH (2018)). Dabei wurde nachgewiesen, dass durch Zugabe DOC-haltiger Lösungen keine ETV-Bindung an den DOC erfolgt. Im Ergebnis wurde postuliert, dass für eine Minderung der gelösten ETV im Sickerwasser ein Kontakt zur Festphase des Komposts notwendig ist.

## 10 Folgerungen aus Grundlagenforschung und Laborversuchen

Zusammenfassend hat sich die Eignung von Kompost zum Einsatz in der In-situ-Immobilisierung als Sanierungsmaßnahme für ETV-belastete Böden erneut bestätigt. Es ist eine Dekontamination bei gleichzeitiger Sicherung gegeben. Für eine Sprengplatz-übliche Konzentration von 100 µg/l an ETV im Sickerwasser konnten neben Hexogen auch die Pulvertypischen Verbindungen C1, EPU und DPU sowie die potenziellen Abbauprodukte EPA und DPA innerhalb kurzer Zeit vollständig gemindert werden. Eine Rücklösung von ETV nach der Bindung im Kompost war bis zu einer Kontaktzeit von 15 Tagen bzw. einer Gesamtversuchszeit von 28 Tagen nicht festzustellen.

Aus der Grundlagenforschung ist bekannt, dass TNT und ADNT innerhalb kurzer Zeit irreversibel im Kompost gebunden, metabolisiert und langfristig mit der Zersetzung der Huminstoffe mineralisiert werden. Für RDX kann Gleiches angenommen werden, wobei hier Sorptionsprozesse primär an der Festsubstanz des Komposts anzunehmen sind. Die untersuchten PTV (C1, EPU und DPU) sowie EPA und DPA werden vermutlich zunächst an Huminstoffen im Kompost physisorbiert. Die Bindungen an gelöste Huminstoffe sind nach IBH (2018) als nicht stabil anzunehmen; für eine Bindung ist vermutlich Kontakt zur Kompostfestphase nötig.

Der Einsatz von Frischkompost führt zum schnelleren Einsetzen von Abbauprozessen bis hin zur vollständigen Zerstörung der Verbindungen. Dies gilt nicht nur für die STV, sondern auch für die PTV. Diese Prozesse könnten bei einer Sanierung initiiert werden, indem der entmunitionierte und gesiebte Boden bereits vor der Rückverfüllung mit Frischkompost durchmischt wird, bevor er mit Lagen aus Fertigkompost gesichert eingebaut wird.

Die Konzentrationen an Ammonium im Sickerwasser bzw. den frischen Komposteluaten sind zunächst gering (30 bis 40 mg/l). In sanierten Sprengtrichtern sind deutlich höhere Konzentrationen an Ammo-



nium zu beobachten (100 mg/l). Dies lässt auf sauerstoffzehrende Prozesse nach dem Einbau schließen. Von den entstehenden Ammonium-Konzentrationen sind aber keine erheblichen Auswirkungen auf Wasserorganismen zu erwarten. Der Parameter Ammonium muss jedoch beim Monitoring dauerhaft unter Kontrolle bleiben, damit rechtzeitig erkannt wird, ob im Einzelfall die Ammoniumkonzentrationen durch z. B. Ammonifikation ansteigen.

Nitrat und Nitrit, die beim Abbau der Nitroaromaten entstehen können, konnten in den Sickerwässern der Trichter in Marktbergel nur in geringen Konzentrationen (in Trichter T30 bis 4,8 mg/l an Nitrat, 0,03 mg/l an Nitrit) nachgewiesen werden. Ein „Abströmen“ der gut wasserlöslichen Verbindungen mit dem Grundwasser ist möglich, in der Grundwassermessstelle B3 wurden bis zu 85,4 mg/l Nitrat gemessen. Bei einer stöchiometrischen Betrachtung der Stoffe ist kein Zusammenhang zwischen ETV und Nitrat festzustellen (ETV im Mikrogrammbereich, Nitrat im Milligrammbereich). Die erhöhten Nitratbefunde sind auf Einflüsse durch die langwirtschaftliche Nutzung der Untersuchungsfläche zurückzuführen. Laut Körner (2008) sind Auswaschungen von Nitrit und Nitrat aus Kompostmaterial vernachlässigbar. Meist liegen Stickstoff-Auswaschungen unter 3 % der insgesamt im Kompostmaterial vorhandenen Stickstoffmasse.

Hinweise auf eine verstärkte Mobilisierung von ETV aus belastetem Bodenmaterial am Trichtergrund durch Wasser mit einem hohen organischen Anteil konnte nicht nachgewiesen werden. Auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse ist kein vermehrter Austrag aus verlagerten ETV durch Kompost-Sickerwasser zu erwarten.

## 11 Faktoren zur Eignungsprüfung

### 11.1 Alkalische Hydrolyse

In der folgenden Tab. 30 sind die grundlegenden Eignungsfaktoren für die beiden Maßnahmen AH und IM zusammengestellt. Diese stellen die Grundlage für eine Eignungsprüfung gemäß Anhang 1 dar, die für jeden potenziellen Sanierungsstandort durchzuführen ist.

Tab. 30: Prüffaktoren zur Anwendbarkeit der Alkalischen Hydrolyse.

Faktoren	Alkalische Hydrolyse
Stoffspektrum	TNT/ADNT und RDX sind vollständig minderbar, auch in hohen Konzentrationen von einigen Tausend µg/l. Für PETN, Centralite und Urethane nur sehr eingeschränkt oder nicht geeignet.
Zeitbedarf	Mehrere Tage bis Wochen zuzüglich Zeitbedarf der Nachbehandlung (Neutralisieren, Absenken der hohen pH-Werte).
Einflussfaktoren	Eingangskonzentration der Kontaminanten, Stoffspektrum, Feinstkornanteil (Ton/Schluff) des Bodens wegen abnehmender Durchmischbarkeit mit zunehmendem Feinstkorn, pH-Wert und Pufferkapazität des belasteten Bodens, Temperaturbedingungen.
Art der Minderung	Vollständige Zerlegung der Moleküle in ihre Bestandteile; der Mechanismus kommt einer Mineralisierung gleich. Der Prozess kommt mit der Neutralisation (Absenkung des pH-Wertes) zum Erliegen. Es ist anzunehmen, dass ein Abbau bzw. eine Mineralisierung von Residuen und Verbindungen, die bei der Zerstörung der ursprünglichen ETV gebildet werden, mit der Erholung der Bodenfunktionen einsetzt.

Tab. 30: Prüffaktoren zur Anwendbarkeit der Alkalischen Hydrolyse (Fortsetzung).

Faktoren	Alkalische Hydrolyse
Voraussetzungen	Der Umgang mit den starken Alkalien erfordert erhöhte Anforderungen an den Arbeitsschutz. Geeignete Behandlungsmittel (starke Alkalien) müssen in ebenfalls geeigneter Form (Trockengranulat) und in ausreichender Menge verfügbar sein. Im Sanierungsbereich muss genügend Platz für ein geeignetes Behandlungsbecken samt Umgriff für den Platzbedarf der Arbeitsmaschinen existieren.
Behandlungsmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Natronlauge (NaOH) – Lösung von Natriumhydroxid, das in Form von Pellets mit dem Bodenmaterial vermischt und anschließend gewässert wird,</li> <li>- Kalilauge (KOH) – wässrige Lösung von Kaliumhydroxid, oder</li> <li>- Calciumhydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>)</li> </ul>
Emissionspotenzial	Unter den Voraussetzungen, dass die Behandlung in einem dichten Behandlungsbecken stattfindet, ist kein Emissionspotenzial für Stoffe aus dem behandelten Bodenmaterial zu erwarten. Eventuell werden hochlösliche Metabolite und unbekannte oder nicht bewertbare Substanzen wie NDAB gebildet.
Langfristwirksamkeit	Nachdem die Verbindungen bereits während der Behandlung komplett zerstört werden, ist ein langfristiger Behandlungserfolg gegeben.
Einschränkungen	<p>Das Verfahren ist nach bisherigen Erkenntnissen für PETN, C1, EPU und DPU nicht geeignet. Hier existiert keine ausreichende Datengrundlage.</p> <p>Durch das Aufschlännen des Bodens und der starken Anhebung des pH-Werts werden das Bodengefüge und das Bodenleben zerstört. Die Bodenfunktionen werden nachhaltig beeinträchtigt, der Boden verliert einen Teil seiner Pufferfunktion. Es können dadurch andere Stoffe mobilisiert werden (z. B. Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe, PAK).</p> <p>Vor dem Einbau muss der behandelte Boden durch Säurezugabe (z. B. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Zitronensäure) neutralisiert werden und/oder eine Bodenverbesserung durch das Einmischen von organischem Material (Kompost, Torf) erfahren. Dadurch ist auch ein Rückhalt eventuell noch vorhandener ETV bzw. von Abbauprodukten möglich.</p> <p>Das Verfahren ist technisch aufwändig; es sind besondere Anforderungen an den Arbeitsschutz notwendig (siehe oben).</p> <p>Die Nähe zu Wasserschutz- und Heilquellenschutzgebieten, der Bereich eines Karst-Grundwasserleiters oder hohe Grundwasserfließgeschwindigkeiten stellen ein Ausschlusskriterium dar (vergleiche auch Kapitel 12.1).</p> <p>Beachtet werden muss auch die Bodenverdichtung, die durch das Befahren der (zumeist landwirtschaftlichen) Flächen zu erwarten ist. Fallbezogen kann auch auf längere Sicht keine Bewirtschaftung möglich sein.</p>
Stoffbezogene Anwendbarkeit	Für Standorte mit einer Belastung mit einem engen Stoffspektrum aus TNT/ADNT uneingeschränkt und langfristig wirksam. Für RDX nach bisherigen Erkenntnissen langfristig hoch wirksam.

## 11.2 In-situ Immobilisierung mittels Kompost

In nachfolgender Tab. 31 werden die Eignungsfaktoren für die In-situ Immobilisierung genannt.

Tab. 31: Prüffaktoren zur Anwendbarkeit der In-situ Immobilisierung mittels Kompost.

Faktoren	In-situ Immobilisierung mittels Kompost
Stoffspektrum	<p>Sprengstofftypische Verbindungen, insbesondere TNT/ADNT, aber auch RDX werden schnell (innerhalb von Stunden bis wenigen Tagen) vollständig gemindert. Die STV sind nicht reeluierbar. Auch polare Nitroaromaten können effektiv gemindert werden.</p> <p>Pulvertypische Verbindungen (untersucht an C1, EPU und DPU) sind ebenfalls minderbar, bei sprengplatztypischen Konzentrationen von einigen hundert µg/l in der Regel vollständig oder auf ein akzeptables Niveau im Bereich der GFS. Die Minderungsleistung ist von der Anfangskonzentration und der Kontaktzeit abhängig. EPU ist unter Umständen nur begrenzt minderbar.</p>
Zeitbedarf	<p>Sanierungswirkung tritt für TNT/ADNT nach einigen Stunden Kontaktzeit, für RDX und PTV nach Stunden bis Tagen ein. Die Sanierungszeit hängt stark vom betroffenen Bodenvolumen und der Verfügbarkeit ausreichender Kompostmengen ab.</p>
Einflussfaktoren	<p>Stoffspektrum, Eingangskonzentrationen, Art des Komposts, Grundwasserflurabstand, Feinkornanteil des Bodens</p>
Art der Minderung	<p>STV (insbesondere TNT/ADNT, aber auch DNT und polare Nitroaromaten) werden vollständig gemindert, unabhängig von der Konzentration – es finden chemische Bindungs- und Sorptionsprozesse statt. Die Verbindungen werden dauerhaft an Huminstoffe gebunden und sind dann nicht wieder reeluierbar. Eine Mineralisierung findet erst mit der Zersetzung der Huminstoffe statt (Zeitbedarf mehrere bis viele Jahrzehnte). Sorptions- und Abbauprozesse im Kompost finden auch für RDX statt (IBH (2018)). Es kommt zu einer vollständigen Minderung (Sorptions und Entgiftung).</p>
Anforderungen	<p>Für den Einsatz von Kompost geeignetes Stoffspektrum, Verfügbarkeit von geeignetem Kompost (auch zeitlicher Faktor), genügend Platz im Bereich der Sanierungsfläche zum Zwischenlagern von Kompost und ausgekoffertem Bodenmaterial. Aufgrund der Volumenmehrung durch den Komposteinsatz in die Sprengtrichter sind zusätzliche „Ausweichtrichter“ anzulegen (siehe Kapitel 6.1.2).</p>
Emissionspotenzial	<p>Bei TNT/ADNT gering, für RDX und PTV werden je nach Konzentration geringe Emissionen beobachtet, die aber zum Großteil unter den jeweiligen Geringfügigkeitsschwellen liegen. Dies sollte mit Vorversuchen überprüft werden.</p> <p>Auf Grundlage der bisherigen Untersuchungen ist von einer geringen Toxizität auf Wasserorganismen im Trichterabstrom auszugehen. Das Sickerwasser innerhalb der Trichter kann aufgrund hoher Ammoniumkonzentrationen toxisch sein (beobachtet für Leuchtakterien).</p> <p>Unter Umständen werden unbekannte oder nicht bewertbare Metaboliten gebildet (hypothetisches dead-end-Produkt NDAB).</p>
Langfristwirksamkeit	<p>Es ergeben sich bislang keine Hinweise auf eine Erschöpfung der Minderungsleistung für STV. Je nach Eingangskonzentration ist unter Umständen eine unvollständige Minderung bzw. für PTV eine teilweise und langsame Reelution möglich. Für Konzentrationen von bis zu 100 µg/l ist dies nicht zu erwarten.</p>

Tab. 31: Prüffaktoren zur Anwendbarkeit der In-situ Immobilisierung mittels Kompost (Fortsetzung).

Faktoren	In-situ Immobilisierung mittels Kompost
Auswahl des Kompostes	<p>Sowohl Frischkompost als auch Fertigkompost zeigen ein Immobilisierungspotenzial; die mikrobielle Aktivität ist im Frischkompost höher, hier setzt schneller ein mikrobieller Abbau der ETV ein, auch für C1, EPU und DPU sowie EPA und DPA ist eine Minderung belegt.</p> <p>Fertigkompost zeigt eine Eignung für alle ETV und ist stabilisiert und hygienisiert. Der Kompost ist für eine gewisse Zeit lagerbar (bis zu mehreren Monaten).</p> <p>Kompost aus Grünschnitt (Abfälle aus Garten- und Landschaftsbau, Gehölzschnitt) ist als Eingangsmaterial geeignet, Abfälle aus der kommunalen Biotonne sind aufgrund der Inhomogenität und der variablen Zusammensetzung dagegen nicht geeignet.</p> <p>Bei den aktuellen Tests haben sich folgende Kompostparameter als vorteilhaft erwiesen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Grünschnitt Kompost im Rottegrad V (sehr homogen),</li> <li>- Siebung auf 0 mm bis 15 mm,</li> <li>- DOC bei 80 mg/l im 10:1 Schütteleuat und</li> <li>- AK 254 nm bei 40 m<sup>-1</sup> zur Sicherstellung eines ausreichenden Huminstoffanteils.</li> </ul> <p>Eignungsversuche am Kompost werden mit den beschriebenen Eluattests und Untersuchungen der Eluate auf die Parameter gemäß den Tabellen Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 8 empfohlen.</p>
Einschränkungen	<p>In Sprengtrichtern der Beispielsanierung Marktbergel hat sich Sickerwasser gebildet, das hohe Konzentrationen an gelösten organischen Verbindungen (Huminstoffen) aufweist. Möglicherweise wird RDX zu NDAB metabolisiert. Für eine toxikologische Einordnung von NDAB liegen keine Bewertungskriterien vor.</p> <p>Erstreckt sich der zu sanierende Bereich (Sprengtrichter) bis in die gesättigte Bodenzone, muss der Arbeitsablauf ggf. für den Einbau des Komposts angepasst werden (Vermischen des Bodens mit Kompost, da sonst Aufschwimmen des Komposts beim Einbau).</p> <p>Die Nähe zu Wasserschutz- und Heilquellenschutzgebieten stellt ein Ausschlusskriterium dar.</p> <p>Zu berücksichtigen ist auch die Bodenverdichtung, die durch das Befahren der (meist landwirtschaftlichen) Flächen zu erwarten ist.</p>
Grundlegende Wirksamkeit	<p>Für TNT/ADNT: uneingeschränkt langfristig wirksam.</p> <p>Für RDX: schnell und nach aktuellem Kenntnisstand langfristig wirksam.</p> <p>Für C1, EPU und DPU sowie EPA und DPA: schnell und voraussichtlich langfristig wirksam; eventuell Reelution möglich.</p>

### 11.3 Auswahl des geeigneten Sanierungsverfahrens

Grundsätzlich muss ein Verfahren zum Tragen kommen, dass dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit folgt (notwendig, geeignet und angemessen). Im Rahmen der Detailuntersuchung (§ 15 Absatz 3 BBodSchV) ist zu bewerten, inwieweit für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser und notwendigenfalls für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze Sanierungs-, Schutz- oder Beschränkungsmaßnahmen erforderlich sind.

Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung (§ 16 Absatz 2 BBodSchV) sind auch Kostenschätzungen und eine Gegenüberstellung der favorisierten Maßnahme mit weiteren geeigneten Sanierungsmethoden vorzunehmen (Variantenstudie).

Eine Bewertungsmatrix zu den beiden Verfahren AH und IM, die im Rahmen einer Eignungsprüfung herangezogen werden kann, ist in Anhang 1 beigefügt. In den Anhängen Anhang 2 und Anhang 3 sind zu beiden Verfahren Flussdiagramme angefügt.

## 12 Handlungsanleitung Alkalische Hydrolyse

### 12.1 Standortbezogene Eignungsprüfung

Für die Anwendung der AH ist vorbereitend die Eignung des Standorts zu prüfen. Wesentlich sind:

- Klären der geologischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen mit Bodenaufbau bis in relevante Bodentiefen, charakterisierender Geländeschnitt, Bodentyp, Durchlässigkeit, Ausdehnung und Tiefenlage des relevanten Aquifers sowie auch tiefer liegender Aquifere, wenn eine Beeinflussung nicht sicher ausgeschlossen werden kann sowie die Prognose von potenziellen Ausbreitungswegen und -geschwindigkeiten für Stoffe im Wasserpfad.
- Klären der Vorflutverhältnisse für den Oberflächenabfluss und des unterirdischen Abflusses von Grundwasser aus dem Schadens- und Sanierungsbereich.
- Prüfen der Ausschlusskriterien (z. B. Karst-Grundwasserleiter, Nähe zu Wasserschutz- und Heilquellenschutzgebieten, hohe Grundwasserfließgeschwindigkeiten aufgrund hoher  $k_f$ -Werte, Stoffspektrum mit PTV (siehe Anhang 1: Matrix Eignungsprüfung)).
- Abschätzen von Risiken für die Nachbarschaft und für eventuell vorhandene oder geplante Wassergewinnungsanlagen.
- Prüfung von Auswirkungen auf die zukünftige Nutzbarkeit des Standorts (anzunehmendes Schutzbedürfnis in Abhängigkeit von der planungsrechtlich zulässigen Nutzung - auch für absehbare höherwertige Nutzungen in der Zukunft, z. B. Wohnbebauung).
- Ermittlung nutzbarer Grundwassermessstellen im Umfeld für das erforderliche Monitoring, (ggf. Errichtung neuer Grundwassermessstellen).
- Vorsorglich sollte stets geprüft werden, ob Belange des Naturschutzes betroffen sind und zusätzliche Maßnahmen erfordern (spezielle artenschutzrechtliche Prüfung, landschaftspflegerischer Begleitplan, wasserrechtliche Genehmigung).

### 12.2 Vorversuche

Im Folgenden werden die Vorversuche definiert, die für eine qualitätsgesicherte und erfolgreiche Sanierung mittels Alkalischer Hydrolyse durchzuführen sind. Prinzipiell wird im Labormaßstab Bodenmaterial des Sanierungsstandorts mit ortstypischer ETV-Belastung mit der vorgesehenen starken Alkalie versetzt, durchmischt und gewässert, bis eine breiartige Konsistenz entsteht. Trockene Produkte von Natrium-, Calcium- oder Kaliumhydroxid führen erst in wässriger Lösung nach einer exothermen Reaktion zu der gewünschten, starken Anhebung des pH-Wertes und der Hydrolyse der ETV.

- Aus dem belasteten Sanierungsbereich (Sprengtrichter, Verfüllung) sind mindestens 20 geeignete Bodenproben zu gewinnen, weil stets von einer sehr inhomogenen Schadstoffverteilung ausgegangen werden muss. Um eine bewertbare Datenbasis zu erhalten, werden fünf Entnahmestellen, zwei Tiefenstufen im kontaminierten Bereich sowie Untersuchungen der Sohle

des Schadensbereichs und eine Abgrenzung zum unbelasteten Boden empfohlen. Mittels 2:1-Schüttel eluat werden das relevante ETV-Spektrum und die zu erwartenden Stoffkonzentrationen an allen Proben bestimmt. Ergänzend kann die Bestimmung auch mit anderen Wasser-/Feststoffverhältnissen (z. B. 1:1-Wanneneluat) erfolgen.

- Das Verfahren zur Entnahme der Bodenproben ist so zu wählen, dass je Entnahmestelle mindestens 50 Liter an Probenmaterial des kontaminierten Bereichs gewonnen werden können (z. B. Baggerschürfe). Material, das nicht für die Analytik benötigt wird, wird zurückgestellt bzw. für die erforderlichen Vorversuche verwendet. Für die Analytik des unterlagernden natürlichen Bodens werden jeweils ein Liter Probenmaterial als ausreichend erachtet.
- Sofern ein behandelbares Stoffspektrum nachgewiesen wird, müssen Behandlungsvorversuche gemacht werden. Säulenversuche haben sich bei bindigen Böden und nach der Aufschlammung als nicht geeignet erwiesen. Die Säulen konnten aufgrund der geringen Durchlässigkeit nicht durchströmt werden.
- Empfohlen wird eine Behandlung mittels AH im Technikumsmaßstab, wofür sich Kunststoffwannen (z. B. Mörtelwannen mit mindestens 60 Liter Inhalt) bewährt haben. In den Wannen lässt sich repräsentatives Probenmaterial gut mit Behandlungsmittel mischen und es steht ausreichend Material für die analytische Kontrolle des Behandlungsverlaufs zur Verfügung. Selbst im kleinen Maßstab lässt sich die Möglichkeit zur Durchmischung gut erkennen und die Anforderung an die Mischung in einem Behandlungsbecken im Rahmen der Sanierung wird planbar (Wahl geeigneter Geräte, wie z. B. Bagger mit Sieblöffel, Schnecke, Zwangsmischer oder dergleichen).
- Für die Versuchsdurchführung wird ein Raum mit einer Temperatur um 20 Grad Celsius (Standard-Laborbedingungen) empfohlen. Es kann aber auch ein Temperaturniveau eingestellt werden, wie es bei der Sanierung erwartet wird.
- Zum Schutz vor Verätzungen ist auch im Technikumsmaßstab auf geeigneten Arbeitsschutz zu achten (flüssigkeitsdichte und laugenbeständige Handschuhe, Schutzbrille, Einmalanzug). Bei der exothermen Reaktion der eingesetzten Alkalien ist Gasentwicklung möglich, sodass auf gute Belüftung des Untersuchungsraums geachtet werden muss.
- Dem homogenisierten Boden in den Wannen werden 0,5 bis 3 Gew.-% an Behandlungsmittel zugegeben (je nach der Pufferkapazität des Bodenmaterials). Grundsätzlich muss so viel Alkalie hinzugefügt werden, bis der pH-Wert auf über 13 eingestellt ist. Anschließend wird das Material durchmischt und gewässert.
- Die Reaktion setzt ein, hierbei kommt es erfahrungsgemäß zu einer Erwärmung der Mischung um 5 bis 10 Grad Celsius. Über den Versuchszeitraum wird der pH-Wert kontinuierlich gemessen. Ein mehrmaliges Homogenisieren der Mischung ist erforderlich (auch während der Sanierung), damit eine gleichmäßige Verteilung des Behandlungsmittels sichergestellt ist und von einem annähernd gleichen pH-Wert im gesamten Material ausgegangen werden kann.
- Nach einigen Tagen ist die Reaktion weitestgehend beendet, der pH-Wert sinkt.
- Im Zuge der Versuchsdurchführung kann das Verhalten des Bodens bei der Reaktion mit dem Behandlungsmittel beobachtet werden. Kommt es zur Klumpenbildung, so ist dies ein Hinweis welcher bei der Planung der Sanierung beachtet werden muss (Anpassung bei Zerkleinerung, Mischtechnik und Häufigkeit des Mischens).
- Am Ende des vorgesehenen Versuchszeitraums werden Mischproben aus dem Material entnommen. Auf eine „statistische“ Verteilung der Entnahmestellen in der Wanne ist zu achten. Nach Bestimmung der ETV-Analyten wird der Minderungserfolg bestimmt. Für TNT/ADNT und



RDX ist eine vollständige Minderung zu erwarten. Es sollte ein breites Spektrum an potenziellen ETV und Metaboliten untersucht werden, da diese zum Teil sehr mobil sind.

**Ausschlusskriterium** (neben den in Kapitel 12.1 genannten Ausschlusskriterien) für die Anwendung der AH ist eine ungenügende Minderungsleistung der Kontaminanten in den Vorversuchen. Die Konzentrationen sollten bis in den Bereich der jeweiligen Geringfügigkeitsschwelle gemindert werden können. Sollten für mögliche Metaboliten keine GFS existieren, ist eine Bewertung auf Grundlage des Ausgangsstoffs oder molekular ähnlicher Verbindungen vorzunehmen. Im Einzelfall können in Abstimmung mit der zuständigen Behörde auch höhere Sanierungsziele (Restbelastungen) toleriert werden.

### 12.3 Anforderungen an die Sanierungsdurchführung

Ist die Eignung für den Standort zur Anwendung der AH bestätigt, sind auf Grundlage der in Kapitel 11 genannten Eignungsfaktoren unter anderem folgende Hinweise zu beachten:

- Vor der Anwendung der Alkalischen Hydrolyse ist das Einholen einer wasserrechtlichen Genehmigung erforderlich, da es sich bei den verwendeten Alkalien sowie unter Umständen auch beim behandelten Bodenmaterial um den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen handelt. Sollte die AH flächig Anwendung finden (Einarbeiten der Lauge in den Boden ohne externe Behandlung) ist dies im Einzelfall zu prüfen.
- Das Stoffspektrum für die Erfolgskontrolle und die erforderliche Menge an Behandlungsmittel sind anhand der Ergebnisse aus den Vorversuchen zu ermitteln.
- Es ist die Bodenmenge zu ermitteln, die behandelt werden soll und danach die Dimension des Behandlungsbeckens festzulegen, in dem abschnittsweise der Boden mittels AH behandelt werden soll. Die Breite des Beckens sollte so gewählt werden, dass das Material von den Seiten her noch gut mit einem Bagger zum Durchmischen erreicht werden kann. Die Länge des Beckens kann sich nach dem Platzangebot vor Ort richten.
- Für das Becken hat sich eine um etwa einen Meter eingegrabene Mulde mit Böschungen von maximal 45° Neigung bewährt. Aushubmaterial der Grube kann dabei als Wall um das Becken aufgebaut werden. Der Wall muss standsicher und befahrbar sein, damit ein Bagger zum Mischen des Bodens um das Becken fahren kann. Eignet sich das ausgehobene Bodenmaterial hierfür (auch nach einer eventuellen Bodenverbesserung) nicht, ist es für die spätere Rückverfüllung im Baufeld zu lagern und der Wall aus geeignetem, unbelastetem Bodenmaterial oder Mineralbeton zu errichten. Eine Genehmigung ist hierfür nicht erforderlich.
- Die Sohle des Behandlungsbeckens ist mit mindestens drei Flächenmischproben beweissichernd auf ETV zu untersuchen. Nach Abschluss der Sanierung und Rückbau des Beckens ist die Sohle erneut zu beproben, festgestellte Leckagen sind zu beseitigen.
- Alternativ wären eine Behandlung in dichten Container-Mulden oder mit Zwangsmischer (Estrichmischer) möglich. Diese Alternative ist nur für kleinere Bodenmengen bis maximal 500 m<sup>3</sup> sinnvoll einzusetzen. Je nach Menge des zu behandelnden Bodenmaterials sind für die Alternativen die Anzahl an Mulden oder Zwangsmischer und der Platzbedarf im Sanierungsbereich zu berechnen.

- Je nach Anwendung (Wiedereinbau von ausgehobenen Trichtern oder Material von Sprengfeldern, Aushub von belastetem Bodenmaterial auf einem Produktionsstandort, flächige Behandlung eines Sprengfelds) sind folgende Baumaschinen und Fahrzeuge notwendig:
  - Radlader zum Transport von Bodenmaterial und Behandlungsmittel
  - Bagger (Longfront, Tieföffel) zum Aushub des Bodenmaterials, Durchmischung des behandelten Bodens, Aufbringen der Lauge
  - Bei flächiger Anwendung: Streuwagen und Scheibenegge
  - Siebanlage zur Entfernung von Störstoffen (Reste von Kampfmitteln, Metallteile, Wurzelwerk).
- Die notwendigen Arbeitsschutzmaßnahmen sind zu definieren. Weil die Gefahr des Kontakts mit Sprengstoffen besteht, handelt es sich um Arbeiten in kontaminierten Bereichen. Ergänzend sind Arbeitsschutzmaßnahmen zum Umgang mit den starken Alkalien festzulegen.
- Ein Arbeits- und Sicherheitsplan und eine Arbeitsanweisung sind erforderlich.
- Bei Notwendigkeit einer Kampfmittelräumung ist eine kampfmitteltechnische Begleitung durch den Kampfmittelräumdienst mit Feuerwerkern erforderlich, die eine Befähigung nach § 20 SprengG besitzen. Die Maßnahme ist bei der Gewerbeaufsicht anzumelden. Bei Bedarf sind weitere Behörden einzubeziehen.

## 12.4 Bauablauf

Nach der Baustelleneinrichtung werden folgende Arbeitsschritte in der genannten Reihenfolge durchgeführt.

### Sanierungsvorbereitende Maßnahmen

- Sind für ein Monitoring zusätzliche Grundwassermessstellen erforderlich, sind diese rechtzeitig – vor Beginn der eigentlichen Sanierungsarbeiten – zu ergänzen. Empfohlen werden zwei Messstellen im Zustrom und mindestens drei Messstellen im Abstrom des Sanierungsbereichs.
- Die Messstellen sind zweimal vor Beginn der Bauarbeiten zu beproben.
- Als Untersuchungsumfang werden die Parameter gemäß den Tabellen Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 8 – ggf. ergänzt um standorttypische ETV – empfohlen. Im weiteren Verlauf kann die Anzahl der Untersuchungsparameter gegebenenfalls um die Parameter verringert werden, die dauerhaft im Bereich oder unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenzen liegen.
- Ab Beginn der Sanierung bis zum Abschluss sollte an den relevanten Messstellen ein wöchentliches Monitoring durchgeführt werden. Nach Abschluss der Maßnahme reicht im ersten Jahr ein vierteljährliches Monitoring und im zweiten Jahr ein halbjährliches Monitoring an den relevanten Messstellen aus. Im Einzelfall können aber bei außergewöhnlichen Grundwasserverhältnissen oder Untergrundgegebenheiten angepasste Intervalle erforderlich werden. Details zu den Grundwassermessstellen und für das Monitoring sind mit den zuständigen Behörden vor Ort (z. B. Wasserwirtschaftsamt) im Voraus zu klären.
- Die Aushubbereiche und Behandlungsflächen sind zu definieren, einzumessen und zu markieren. Die Bereiche, in denen Eingriffe in den Boden vorgenommen werden sollen, sind kampfmitteltechnisch zu bewerten und bedarfsweise zu entmunitionieren. Hierbei ist den Empfehlungen der Fachfirma für Kampfmittelbeseitigung zu folgen.

- Der Oberboden aller Bereiche, in denen Bodeneingriffe erfolgen, wird – sofern er unbelastet ist – abgeschoben und am Rand des Sanierungsbereichs zwischengelagert. Das Zwischenlagern soll schonend erfolgen, um die Bodenstruktur so wenig wie möglich zu schädigen. Sollte oberflächennaher Aushub oder Peripheriematerial eines Trichter- oder Sprengfelds nur gering belastet sein, kann dieses möglicherweise ohne weitere Behandlung oder auf einer Kompostunterlage wieder eingebaut werden.
- Im Anschluss erfolgt der Aushub der Schadensbereiche unter Kampfmittelaufsicht. Sind Kampfmittel im Sanierungsbereich vorhanden, wird das Material aushubbegleitend entmunitioniert und gesiebt.
- Das Material wird im oder nahe des Sanierungsbereichs in Form von Mieten zwischengelagert und gegen das Eindringen von Niederschlagswasser geschützt (Folienabdeckung, windsicher).
- Soll die Behandlung nicht in Mulden, sondern in einem Behandlungsbecken erfolgen, wird dieses möglichst nah am Sanierungsbereich in Form einer Grube angelegt, im besten Fall zusätzlich mit einem umgebenden Wall (siehe Kapitel 12.3). Das Becken wird über den Wall hinweg vollständig mit einer verschweißten HDPE-Folie in Deponiequalität (Stärke 2,5 mm) mit einem Schutzvlies (1.200 g/m<sup>2</sup>) als Auflager auf dem Planum ausgekleidet (Abb. 47). Je nach Untergrund muss zum Schutz der Folie noch eine mindestens 30 cm dicke Schicht aus Sand eingebaut werden. Das Anlegen von Zuwegungen aus Mineralbeton, notwendigenfalls auf Geogitter, und die Oberflächenbefestigung der Randwälle zur Vermeidung von erheblichen Bodenverdichtungen kann erforderlich sein.
- Auf der Folie sollte innerhalb des Beckens auf eine Schutzschicht (z. B. Geotextil) verzichtet werden, weil sie das Mischen des Materials behindert.
- Je nach Umfang der Maßnahme kann es erforderlich sein, eine Flächendränage mit Sammlern und Kontrollschächten unter dem Becken einzubauen. Damit ist bei ungünstigen Bodenverhältnissen eine Dichtigkeitsprüfung über die Beprobung von Sickerwasser möglich.
- Das Behandlungsbecken samt Arbeitsraum ist mit einem Bauzaun abzusperren und als Schwarzbereich zu kennzeichnen. Dies folgt den Vorgaben des zu erstellenden Arbeitssicherheitskonzepts.

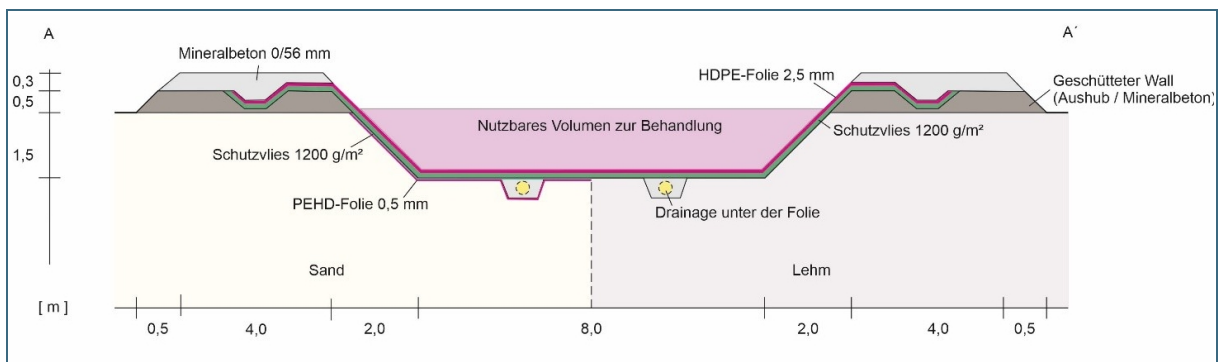


Abb. 47: Schnitt durch ein Behandlungsbecken zur Alkalischen Hydrolyse

## Sanierungsdurchführung

- Das Becken wird mit dem belasteten Bodenmaterial maximal 1,5 m hoch befüllt. Es ist jedoch unbedingt darauf zu achten, dass ein Freibord im Becken verbleibt, der sicherstellt, dass ein regionales Starkregenereignis zuverlässig aufgenommen werden kann, damit es nicht während der Behandlung zum Überlaufen von stark alkalischem Behandlungswasser kommt. Eine Freibordhöhe von 50 cm ist im Allgemeinen ausreichend (Abb. 48).

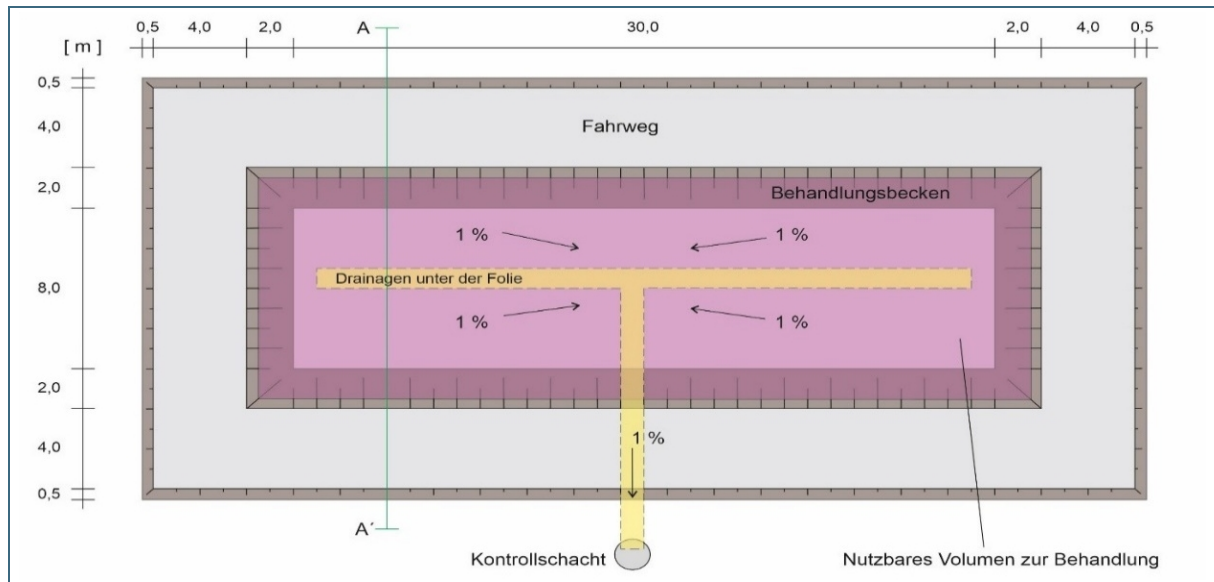


Abb. 48: Schema eines Behandlungsbeckens zur Alkalischen Hydrolyse

- Die Behandlung erfolgt durch periodisches Einbringen des Behandlungsmittels. Das NaOH-,  $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ - oder KOH-Granulat (Granulat ist arbeitsschutztechnisch sicherer als in Pulverform) wird mithilfe eines Baggers in Big Bags über das Behandlungsbecken gehoben und aufgegeben. Die Menge der aufzugebenden Lauge beträgt je nach Ergebnis der Vorversuche etwa 0,5 bis 3 % der zu behandelnden Bodenmenge. Alternativ kann das Behandlungsmaterial über ein Förderband aufgegeben werden, unter Umständen ist eine Siebung zielführend. Die Arbeiten sind unter Einhaltung der notwendigen Arbeitsschutzmaßnahmen (persönliche Sicherheitsausrüstung: flüssigkeitsdichte und laugenbeständige Handschuhe (EN394), Gummistiefel, Einmalschutzanzug, Schutzbrille, FFP2-Maske gegen alkalischen Staub) durchzuführen.
- Die Mischung aus Boden und Lauge wird mit Grundwasser (sofern geeignete Aufschlüsse vorhanden und Entnahme wasserrechtlich genehmigt) oder Oberflächenwasser vermischt. Falls diese Möglichkeit nicht besteht, muss Wasser mittels Tankwagen oder einer temporären Leitung bereitgestellt werden.
- Das kontaminierte Material wird mittels Baggerlöffel (Sieblöffel) vorsichtig homogenisiert und mit dem Wasser aufgeschlämmt, bis eine breiartige Konsistenz entstanden ist (mindestens zwei- bis dreimalige Durchmischung). Das Durchmischen mit dem Baggerlöffel hat zum Schutz der HDPE-Folie „schiebend“ zu erfolgen. Für einen zusätzlichen Schutz kann an der Baggerschaufel eine sogenannte „Zahnschutzleiste“ aus Kunststoff angebracht werden.
- Der pH-Wert wird während der Behandlung in kurzen Intervallen überwacht, bis sich homogen über das Becken hinweg ein Wert größer 13 eingestellt hat. Anschließend ist die Reaktions-

phase abzuwarten (erfahrungsgemäß einige Tage bis zwei Wochen). Es ist mit einer Erwärmung des Materials von 5 bis 10 Grad Celsius zu rechnen. Dem Kontrollschacht zulaufendes Sicker- oder Grundwasser ist mittels pH-Wert-Messung zu prüfen.

- Nach Absinken der Temperaturen im Behandlungsbecken am Ende des Reaktionszeitraums ist das Material (mit einer ausreichenden Menge an Proben) repräsentativ zu beproben und auf die Ausgangskontaminanten und potenzielle Metaboliten zu prüfen. Ist das Sanierungsziel erreicht, kann die Behandlung beendet werden.

### Nacharbeiten

- Da durch die Behandlung mit Lauge das Bodengefüge zerstört und die Bodenfunktionen nachhaltig beeinträchtigt wurden, kann es zu einer Verminderung der Pufferfunktion und ggf. zu einer Mobilisierung von sonstigen Bodeninhaltsstoffen kommen. Das Material ist daher in Absprache mit der zuständigen Behörde auf die relevanten ETV- und Basisparameter zu untersuchen und hinsichtlich des Wiedereinbaus zu bewerten.
- Der pH-Wert des behandelten Materials sollte durch Zugabe von Säuren (z. B. Zitronen- oder Schwefelsäure), geeignetem Bodenmaterial oder Kompost gesenkt werden. Es sollte eine Absenkung auf mindestens einen Wert erfolgen, bei dem eine Schädigung auf Bodenorganismen nicht mehr zu erwarten ist (kurzzeitig  $\text{pH} < 11$  und dauerhaft  $\text{pH} < 9$ ).
- Das Material sollte vor dem Wiedereinbau durch das Einmischen von Kompost oder Torf in eine unschädliche, bodentypische Zusammensetzung überführt werden. Hierbei werden die Bodenfunktionen und das Rückhaltevermögen teilweise wiederhergestellt.
- Das gereinigte Bodenmaterial kann am Ausbauort rückverfüllt und abgedeckt werden. Auch eine Verdichtung ist möglich. Zur Abpufferung austretender alkalischer Sickerwässer kann die Rückverfüllung auf einer Zwischenlage aus Kompost erfolgen. Die Notwendigkeit und Durchführbarkeit dieser Maßnahme sollten geprüft werden.
- Nach Wiedereinbau des behandelten Bodens und dem Rückbau von Folie und Kontrollschacht wird eine Untersuchung der Beckensohle durchgeführt.

## 12.5 Erfolgskontrolle und Überwachung

Eine Erfolgskontrolle wird bei der Anwendung der Alkalischen Hydrolyse prinzipiell sanierungsbegleitend durchgeführt. Die Ausgangskontaminanten müssen zu mehr als 95 % zerstört sein. Im Nachgang sind lediglich weitere Abbauprozesse von potenziellen Metaboliten zu erwarten.

Ist der pH-Wert in ausreichendem Maß gesenkt, ist eine schädliche Veränderung des Grundwassers durch die Sanierung oder durch alkalische Sickerwässer nicht zu besorgen. Ein nachlaufendes Monitoring wie oben beschrieben muss dies aber bestätigen.

Eine Kontrolle des eingebauten Materials auf seinen pH-Wert kann in größeren Abständen erfolgen.

# 13 Handlungsanleitung In-situ-Immobilisierung mittels Kompost

## 13.1 Standortbezogene Eignungsprüfung

Für die Anwendung der IM ist analog zum Verfahren AH vorbereitend die Eignung des Standorts unter Nutzung von Anhang 1 zu prüfen. Wesentlich sind auch hier:

- Klären der geologischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen mit Bodenaufbau bis in relevante Bodentiefe, charakterisierender Geländeschnitt, Bodentyp, Durchlässigkeit, Ausdehnung und Tiefenlage des relevanten Aquifers sowie ggf. auch tiefer liegender Aquifere, wenn eine Beeinflussung nicht sicher ausgeschlossen werden kann und die Prognose von potenziellen Ausbreitungswegen und -geschwindigkeiten für Stoffe im Wasserpfad.
- Klären der Vorflutverhältnisse für Oberflächenabfluss und des unterirdischen Abflusses von Grundwasser aus dem Schadens- bzw. dem Sanierungsbereich.
- Prüfen der Ausschlusskriterien (z. B. Karst-Grundwasserleiter, Nähe zu Wasserschutz- und Heilquellenschutzgebieten, hohe Grundwasserfließgeschwindigkeiten aufgrund hoher  $k_f$ -Werte).
- Abschätzen von Risiken für die Nachbarschaft und für Wassergewinnungsanlagen.
- Prüfung von Auswirkungen auf die zukünftige Nutzbarkeit des Standorts (anzunehmendes Schutzbedürfnis in Abhängigkeit von der planungsrechtlich zulässigen Nutzung, ggf. auch für absehbare höherwertige Nutzungen in der Zukunft, z. B. Wohnbebauung).
- Ermittlung nutzbarer Grundwassermessstellen im Umfeld für das erforderliche Monitoring.
- Vorsorglich sollte stets geprüft werden, ob Belange des Naturschutzes betroffen sind und zusätzliche Maßnahmen erfordern (spezielle artenschutzrechtliche Prüfung, landschaftspflegerischer Begleitplan).
- Ergänzend ist zu prüfen, ob in einem angemessenen Umkreis um den Sanierungsort eine Kompostieranlage betrieben wird, die Kompost in erforderlicher Güte und Menge für das Sanierungsvorhaben liefern kann. Vorversuche zur Eignung des Komposts sind erforderlich.

## 13.2 Vorversuche

Wird eine in-situ-Immobilisierung mittels Kompost auf Grundlage der durchgeführten Eignungsprüfung gemäß Bewertungsmatrix in Anhang 1 als erfolgversprechend eingestuft, sind Vorversuche zur Bestätigung der fallspezifischen Eignung durchzuführen.

Säulenversuche, wie im Rahmen dieses Berichts beschrieben, haben sich als geeignet erwiesen.

Grundsätzlich spielt die Art des Sanierungsbereichs (Anzahl der Sprengtrichter und Aushubbereiche, flächige bzw. flachgründige Sicherung) für die Vorversuche mit dem Kompost keine Rolle. Elementar ist allerdings die Verfügbarkeit von geeignetem Kompost. Abgesehen davon, dass sich vor allem Frischkompost zur Initiierung von Abbauprozessen bei PTV eignet, hat sich Fertigkompost als qualitäts gesichertes Medium für Rückhalt und Metabolisierung von ETV als geeignet herausgestellt. Zu beachten ist die Lagerungsfähigkeit von nur einigen Monaten. Grundsätzlich wird zu folgenden Untersuchungsschritten geraten:

- Aus dem belasteten Sanierungsbereich (Sprengtrichter, Verfüllung) sind mindestens 20 geeignete Bodenproben zu gewinnen, weil stets von einer sehr inhomogenen Schadstoffverteilung ausgegangen werden muss. Zum Erhalt einer Datenbasis werden fünf Entnahmestellen, zwei Tiefenstufen im kontaminierten Bereich sowie Untersuchungen an der Sohle des Schadensbereichs und eine Abgrenzung zum unbelasteten Boden empfohlen.
- Das Verfahren zur Entnahme der Bodenproben ist so zu wählen, dass je Entnahmestelle mindestens 50 Liter an Probenmaterial des kontaminierten Bereichs gewonnen werden können



(z. B. durch Baggerschürfe). Material, das nicht für die Analytik benötigt wird, wird zurückgestellt bzw. für die erforderlichen Vorversuche verwendet. Für die Analytik des unterlagernden natürlichen Bodens werden jeweils ein Liter Probenmaterial als ausreichend erachtet.

- Mittels 2:1-Schütteleluat wird der Gehalt an ETV in allen 20 Bodenproben bestimmt, um das ETV-Spektrum, die Streubreite und ggf. die ETV-Ausbreitung in den Untergrund des Schadensbereichs zu ermitteln. Ergänzend kann die Bestimmung auch mit anderen Wasser-/Feststoffverhältnissen (z. B. 1:1-Wanneneluat) erfolgen.
- Für die Vorversuche ist eine exemplarische Charge (ca. 60 l) eines geeigneten Komposts zu verwenden. (Empfehlung: Rottegrad V, Eingangsmaterial Grünschnitt, Siebung 0-15 mm, DOC um 80 mg/l, AK 254 nm um 40 m<sup>-1</sup>).
- Die Spezifikation des Komposts erfolgt an fünf bis sechs Proben auf der Grundlage des Parameterumfangs in den Tabellen Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 19. Der Kompost wird homogenisiert und für die Untersuchungen werden von den Einzelproben 10:1-Eluate hergestellt, da sich die relevanten Parameter aus diesem Mischungsverhältnis leichter bestimmen und mit den Ergebnissen dieses Berichts vergleichen lassen. Bei günstigen Befunden (siehe oben) schließen sich Eignungstests für das ETV-Spektrum des Schadensfalls an. Hierbei wird die Eignung des Komposts mit Bezug auf die Minderungsleistung ermittelt. Qualitätskriterien für den Kompost, wie sie in der Gütesicherung und der BioAbfV festgelegt sind, sind für den Einbau im Rahmen der Sanierung relevant. Die Kriterien sind seitens des Abfallbehandlungsanlage einzuhalten und nachzuweisen.
- Die spezifischen Eignungstests für den Kompost sollen in Elutionssäulen analog dem Verfahren der aktuellen Untersuchungen durchgeführt werden. Versuche an vier Säulen werden vorgeschlagen. In die Säulen sollen je ca. 2,5 kg an Kompost eingebaut und mit Eluat durchsickert werden, welches aus Bodenmaterial der kontaminierten Bereiche gewonnen wurde.
- Vor Versuchsbeginn sind die Säulen mit deionisiertem Wasser zu spülen, um Einflüsse durch hohe Konzentrationen an gelösten organischen Verbindungen auf die ETV-Analytik zu eliminieren. Gegebenenfalls kann ein ETV-Rückhalt durch eine DOC-bedingte Anhebung der Bestimmungsgrenzen nicht zuverlässig nachgewiesen werden.
- Das Versuchseluat ist mittels 2:1-Elution des Bodens in ausreichender Menge herzustellen. Je Säulenversuch werden mindestens drei Liter Versuchseluat benötigt. Das Eluat ist ggf. bis zum Beginn der Versuche gekühlt und abgedunkelt aufzubewahren.
- Der Kompost wird von Hand verdichtet in die Säulen eingebaut, die Menge kann als Hinweis auf den Volumenbedarf im Sanierungstrichter dienen (in verdichtetem Zustand).
- Die Aufgabe des deionisierten Wassers und der Versuchseluate muss von unten nach oben erfolgen, um Luft im Porenraum des Komposts auszutreiben und präferenzielle Fließwege zu vermeiden. Die Versuchsdurchführung sollte analog den aktuellen Versuchen erfolgen. Proben sind je Säule nach 1 Tag, nach 7 Tagen und nach 14 Tagen zu entnehmen und zu untersuchen.
- Das Eluat aus den Säulen wird auf den Parameterumfang gemäß den Tabelle Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 8, sowie ggf. ergänzt um standorttypische ETV untersucht und es sind die erreichten Minderungsraten zu bestimmen. Nach 14 Tagen sollten die Minderungsraten bei > 95 % liegen.

### 13.3 Anforderungen an die Sanierungsdurchführung

Mit Bezug auf eine wasserrechtliche Genehmigung ist stabilisierter, hygienisierter Fertigkompost bei „bestimmungsgemäßer Anwendung“ als nicht wassergefährdend einzustufen. Für die In-situ-Immobilisierung muss der Kompost jedoch in den Boden eingebracht werden. Dies macht einen Wasserrechtsantrag erforderlich. Im Rahmen des Antrags sind die Ergebnisse der Kompostspezifikation (u. a. die Eluierbarkeit von Schwermetallen und Ammonium), die eingesetzten Mengen sowie die Ergebnisse der Säulentests anzugeben. Die zulässige Tiefe des Einbaus und vor allem der erforderliche Abstand zum Grundwasser sind fallspezifisch mit den zuständigen Behörden abzustimmen.

Die technische Ausstattung für eine Durchführung der IM umfasst im Allgemeinen:

- Bagger mit Tieflöffel und Greifer
- Radlader zum Transport von Bodenmaterial und Kompost
- Ggf. Tankwagen im Fall von Wasserbedarf, falls keine Grundwassermessstelle oder Oberflächengewässer vorhanden ist bzw. keine Genehmigung zur Entnahme von Wasser vorliegt.
- Zur Verdichtung von Kompost und / oder Bodenmaterial werden geeignete Verdichtungsgeräte benötigt.
- Siebanlage zur Entfernung von Störstoffen (Reste von Kampfmitteln, Metallteile, Wurzelwerk)
- Die notwendigen Arbeitsschutzmaßnahmen sind zu definieren. Weil die Gefahr des Kontakts mit Sprengstoffen besteht, handelt es sich um Arbeiten in kontaminierten Bereichen.
- Ein Arbeits- und Sicherheitsplan und eine Arbeitsanweisung sind erforderlich.
- Bei Notwendigkeit einer Kampfmittelräumung ist eine kampfmitteltechnische Begleitung durch den Kampfmittelräumdienst mit Feuerwerkern erforderlich, die eine Befähigung nach § 20 SprengG besitzen. Die Maßnahme ist bei der Gewerbeaufsicht anzumelden. Ob weitere Behörden einzubeziehen sind, ist zu prüfen.

Sollen verfüllte Sprengtrichter mittels IM saniert werden, kann der Trichterinhalt mit der Formel für einen Kegelstumpf errechnet werden:

$$V = \frac{h \cdot \pi}{3} \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2)$$

V = Volumen Trichterinhalt [m<sup>3</sup>]  
 h = Trichtertiefe [m]  
 R = Trichterradius auf Geländeniveau [m]  
 r = Trichterradius an Trichtersohle [m]  
 π = Kreiszahl (3,14159)

Abb. 49:  
Formel zur Berechnung des Trichtervolumens.

Dieses Volumen stellt näherungsweise die Menge an belastetem Boden dar (abzüglich der ausgesiebten Kampfmittel und Metallteile), der wiederverfüllt werden muss. Bedingt durch den Einbau des Komposts entsteht überschüssiges Material, für das unter Umständen weitere Trichter angelegt oder bestehende Trichter erweitert werden müssen.

Für den errechneten Raumbedarf des Komposts kann von einer Verdichtung durch das verfüllte Bodenmaterial von ca. 5 cm bis 10 cm ausgegangen werden (beispielsweise von 30 cm auf 20 cm). Am Beispiel von Marktbergel wurden hier Lagen aus 20 cm Kompost verbaut, in den durchgeführten Rammkernsondierungen waren max. 10 cm im Schichtprofil erkennbar. Je nach Trichtergröße können ca. 100 m<sup>3</sup> an Verdrängungsmassen anfallen.

Für Kompost kann von einer Feuchtdichte von  $0,8 \text{ t/m}^3$  bis  $1 \text{ t/m}^3$  ausgegangen werden. Bei den vorliegenden Untersuchungen wies der Kompost eine Feuchtdichte von  $0,95 \text{ t/m}^3$  auf. Dem entgegen steht eine anzunehmende Dichte des belasteten Bodenmaterials von ca.  $1,8 \text{ t/m}^3$  bis  $2 \text{ t/m}^3$ .

Im Sanierungsbereich muss genügend Fläche für die Zwischenlagerung des Komposts und des Bodenaushubs vorhanden sein. Die notwendigen Bodenumlagerungen und der damit verbundene Platzbedarf sind vorab zu kalkulieren.

Für eine flächige Einbauweise ist zu gewährleisten, dass das gesamte anfallende Sickerwasser die Kompostlage durchläuft. Bei einem Sprengplatz in Langenhagen wurde z. B. der Uferbereich eines Badesees mit einer  $0,2 \text{ m}$  mächtigen Lage aus Kompost und Torf gesichert (Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim (2018)).

### 13.4 Bauablauf

Im Folgenden wird der Bauablauf im Einzelnen für die Sanierung von verfüllten Sprengtrichtern beschrieben. Der Bauablauf folgt bei anderen Einbauweisen (z. B. flächig) prinzipiell den gleichen Handlungsschritten.

#### Sanierungsvorbereitende Maßnahmen

- Vor Beginn der eigentlichen Sanierungsarbeiten sind die ausgewählten Grundwassermessstellen für ein Monitoring ggf. um weitere Messstellen zu ergänzen, die dazu rechtzeitig neu gebaut werden müssen. Empfohlen werden zwei Messstellen im Zustrom und mindestens drei Messstellen im Abstrom des Sanierungsbereichs.
- Die Messstellen sind zweimal vor Beginn der Bauarbeiten zu beproben. Als Untersuchungsumfang werden die Parameter gemäß Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 8 sowie ggf. ergänzt um standorttypische ETV empfohlen. Im weiteren Verlauf kann die Anzahl der Untersuchungsparameter gegebenenfalls um die Parameter verringert werden, die dauerhaft im Bereich oder unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze liegen.
- Ab Beginn der Sanierung bis zum Abschluss sollte an den Abstrommessstellen ein wöchentliches Monitoring durchgeführt werden. Nach Abschluss der Maßnahme reichen im ersten Jahr i. A. ein vierteljährliches Monitoring der relevanten Grundwassermessstellen und im zweiten Folgejahr ein halbjährliches Monitoring aus. Im Einzelfall können aber bei außergewöhnlichen Grundwasserverhältnissen oder Untergrundgegebenheiten angepasste Intervalle erforderlich werden. Details zu den Grundwassermessstellen und für das Monitoring sind mit den zuständigen Behörden vor Ort (z. B. Wasserwirtschaftsamt) im Voraus zu klären.
- Vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen sind die Aushubbereiche / Behandlungsflächen zu definieren, einzumessen und zu markieren. Die Bereiche, in denen Eingriffe in den Boden vorgenommen werden sollen, sind außerdem kampfmitteltechnisch zu bewerten und bedarfsweise zu entmunitionieren. Hierbei ist den Empfehlungen der Fachfirma für Kampfmittelbeseitigung zu folgen.
- Der Oberboden aller Bereiche, in denen Bodeneingriffe erfolgen, wird sofern er unbelastet ist, abgeschoben und am Rand des Sanierungsbereichs zwischengelagert. Das Zwischenlagern soll schonend erfolgen, um die Bodenstruktur so wenig wie möglich zu schädigen. Sollte oberflächennaher Aushub oder Peripheriematerial eines Trichter- oder Sprengfelds nur gering belastet sein, kann dieses ggf. ohne Behandlung bzw. auf einer Kompostunterlage wieder eingebaut werden.
- Im Anschluss erfolgt der Aushub der Schadensbereiche unter Kampfmittelaufsicht.

- Das belastete Bodenmaterial wird aushubbegleitend entmunitioniert und anschließend mittels Siebanlage von Kampfmittelresten und Störstoffen befreit. Der Trichterinhalt wird jeweils an den Trichterrändern aufgehaldet. Bei Verzögerungen im Bauablauf oder angesagten Regenerereignissen sind die Haufwerke mit Folien windsicher abzudecken.
- Die Trichter sind je nach Bodenart und Wassergehalt des Bodens entsprechend den Vorgaben der DIN 4124 zu böschen. Nach dem Aushub wird die Trichtersohle bis zur Signalfreiheit sondiert.
- Sofern es bei starken Niederschlagsereignissen oder Zutritt von Schichtwasser in die geräumten Trichter zu Wasseransammlungen kommt, ist eine Wasserhaltung notwendig. Je nach Stoffkonzentration kann das aus dem Trichter abgepumpte Wasser über einen Kompostfilter oder eine Aktivkohleanlage abgereinigt werden. Das Risiko ist vor der Sanierung abzuschätzen. Ggf. ist ein Wasserrechtsantrag zu stellen.

### Sanierungsdurchführung

- Auf die Trichterbasis wird zunächst eine etwa 0,5 m mächtige Kompostschicht aufgebracht. Danach wird das von Kampfmitteln befreite Bodenmaterial in Schichtdicken von etwa 50 bis 100 cm wieder in die Sprengtrichter eingebaut (vgl. Abb. 50).
- Für die Verdichtung des belasteten Bodenmaterials ist in Abhängigkeit von der Bodenart ein geeignetes Gerät zu wählen. Das eingebaute Material muss eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit besitzen und es soll eine ausreichende Kontaktzeit des Sickerwassers mit dem Kompost gewährleistet sein. Die Verdichtbarkeit bzw. die Durchlässigkeit sind ggf. mit geotechnischen Versuchen zu prüfen. Es wird eine Verdichtung bis 90 % der Proctordichte empfohlen.
- Jede Bodenschicht ist mit einer unverdichteten Kompostlage in einer Schichtstärke von mindestens 20 cm abzudecken. Die Abdeckung der Trichterwandung mit Kompost wird sukzessive mit der Verfüllung hochgezogen, um zu verhindern, dass Stauwasser auf den Bodenschichten ohne Kontakt mit Kompost entlang der Trichterwände versickern kann.
- Ggf. ist es zielführend, den Kompost zuvor zu wässern, um den Einbau zu erleichtern (Erhöhung des Zusammenhalts). Ein schematischer Schnitt durch einen verfüllten Trichter ist in Abb. 50 dargestellt.

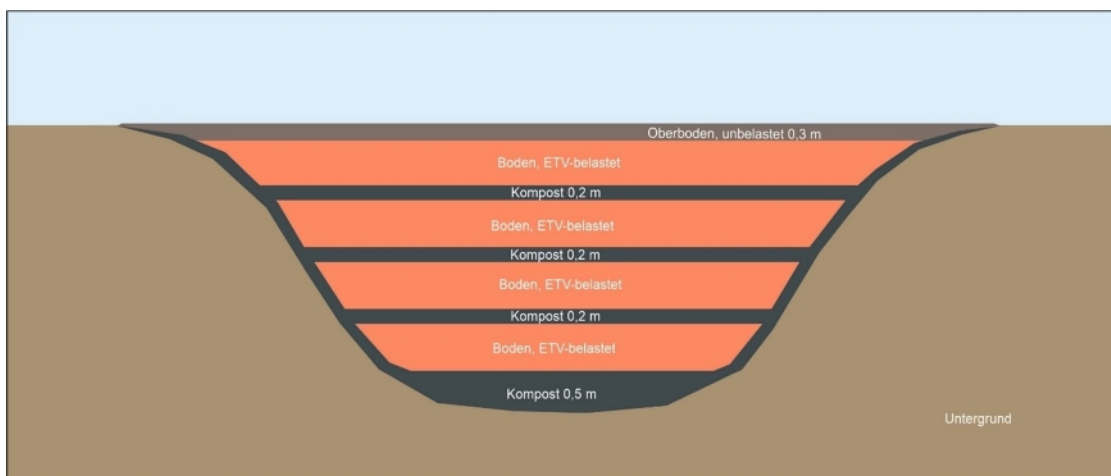


Abb. 50: Schematischer Schnitt durch einen sanierten Sprengtrichter

- Je nach ETV-Spektrum kann es zielführend sein, anteilig Frischkompost mit einzubauen. Bei hohen Konzentrationen an C1, EPU und DPU könnte das ausgehobene Trichtermaterial vor dem lagenweisen Wiedereinbau mit Frischkompost vermischt werden, um Abbauprozesse zu initiieren. Die Wirksamkeit dieser Variante sollte durch Vorversuche belegt sein.
- Alternative Einbaumöglichkeiten (flächig, andere Geometrie des Aushubbereichs, Integration in den Garten- und Landschaftsbau) sind prinzipiell möglich, solange eine ausreichende Kontaktfläche und Kontaktzeit des Sickerwassers mit dem Kompost gewährleistet wird. Dies ist im Einzelfall zu prüfen.

### Nacharbeiten

- Die durch den Einbau des Komposts entstehenden Verdrängungsmassen können in separat angelegten Trichtern bzw. durch Erweiterung von Trichtern untergebracht werden. Die unbelasteten Aushubmassen der „Ausweichtrichter“ können auf die verfüllten Trichter und das Trichterumfeld aufgebracht werden.
- Nach vollständiger Rückverfüllung der Trichter wird der unbelastete Oberboden angedeckt. Das belastete Bodenmaterial muss insbesondere bei landwirtschaftlichen Flächen mit einer mindestens 60 cm mächtigen Schicht an unbedenklichem Material bedeckt sein, um auch für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze einen ausreichenden Schutz zu gewährleisten.

## 13.5 Erfolgskontrolle und Überwachung

Die Erfolgskontrolle zur IM erfolgt über ein begleitendes und nachlaufendes Monitoring wie oben beschrieben. In die Erfolgskontrolle der Sanierung sind neben den ausgewählten Grundwassermessstellen ggf. auch naheliegende Oberflächengewässer (Still- oder Fließgewässer) einzubeziehen.

Grundsätzlich sollten einige der verfüllten Sprengtrichter als Beweissicherungstrichter ausgeführt werden (vergleiche Abb. 51). Bei Einbaualternativen (z. B. flächige Anwendung der IM, andere Geometrie der verfüllten Bereiche) werden geeignete Kontrollschächte empfohlen.

Die Beweissicherungstrichter werden mit Probenahmerohren versehen, die an der Trichtersohle aufsitzen und im unteren Bereich verfiltert sind. Die Filterstrecke sollte mit geeignetem Filterkies umgeben sein und sich komplett innerhalb einer Kompostschicht befinden. Die Probenahmerohre werden je nach Ergiebigkeit und Füllstand mit einer Unterwasserpumpe oder Schöpfgefäßen beprobt. In Abb. 51 ist ein Schnitt durch einen Beweissicherungstrichter mit Probenahmerohr dargestellt.

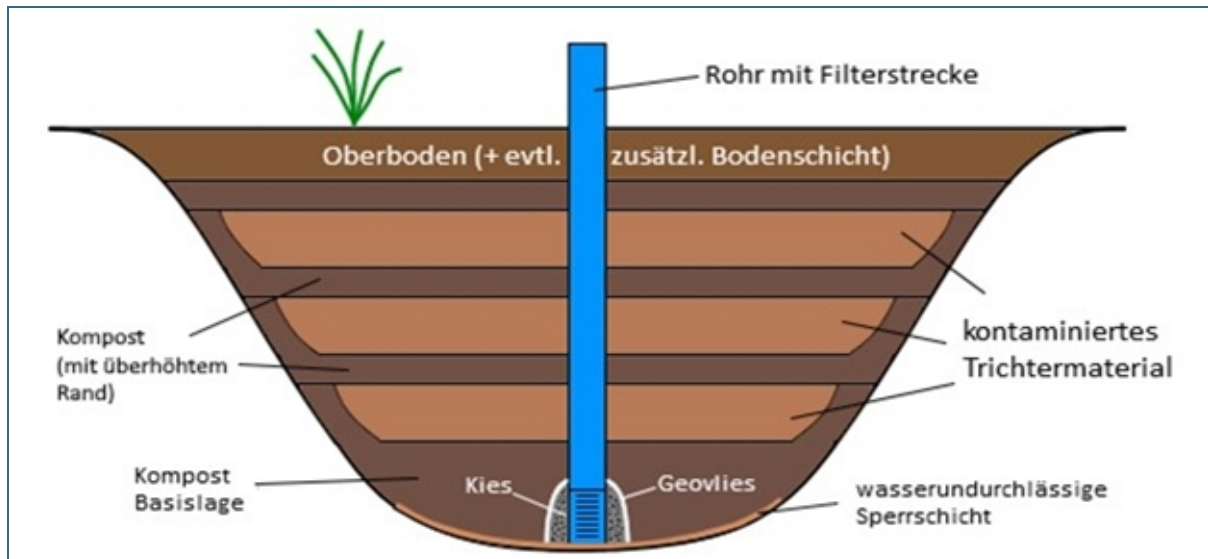


Abb. 51: Schematischer Schnitt durch einen Beweissicherungstrichter

## 14 Zusammenfassung

Aufbauend auf den Ergebnissen früherer Projekte des LfU sowie bereits erfolgten Sanierungsmaßnahmen wurden Laborversuche zur Kompostspezifikation und Minderungsleistung für die in der Vergangenheit schwer minderbaren Pulvertypischen Verbindungen (PTV) N-Ethyl-N-Phenylurethan (EPU), Diphenylurethan (DPU) und Centralit I (C1) – einschließlich der potenziellen Abbauprodukte N-Ethyl-N-Phenylamin (EPA) und Diphenylamin (DPA) – sowie Hexogen (RDX) durchgeführt (Kapitel 7). Mit dem verwendeten Fertigungskompost (Rottegrad V), der in Elutionssäulen eingebaut und mit dotierten Versuchslösungen (100 µg/l je Analyt) beschickt wurde, konnten sowohl RDX als auch EPU, DPU, C1, EPA und DPA innerhalb von vier Stunden zu 100 % gemindert werden.

Die Wirksamkeit für Trinitrotoluol (TNT) und seiner Metaboliten wurde bereits in vorherigen Grundlagenforschungen bestätigt.

Ergänzende Biotests an den Versuchseluaten ergaben keine bzw. nur eine geringe Toxizität für aquatische Organismen, die offensichtlich auf Kompostinhaltsstoffe (hohe Gehalte an gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC)) zurückzuführen ist.

Eine weitere Versuchsreihe mit einem Aktivkohle-Vlies (Kapitel 8), das ebenfalls in den Elutionssäulen mit dotierten Lösungen (50 µg/l je Analyt) durchsickert wurde, ergab eine Minderungsleistung von rund 50 % für die PTV und RDX, was trotz der versuchsbedingten geringen Kontaktzeit von Sekunden bis Minuten ebenfalls ein gutes Minderungsergebnis darstellt. Die Sicherung von Sprengtrichtern mittels Aktivkohlevlies, das die Trichtersohle und -wände auskleidet, stellt somit eventuell ebenfalls eine kostengünstigere und technisch einfach zu realisierende Sanierungsmethode dar.

Mit einer dritten Versuchsreihe (Kapitel 9) wurde die Fragestellung untersucht, ob Sickerwasser, das einen mittels IM sanierten Sprengtrichter durchläuft und hierbei mit hohen Gehalten an DOC beaufschlagt wird, in der Lage ist, ETV aus Sekundärbelastungen unterhalb der Trichtersohle zu mobilisieren. Hinweise auf eine verstärkte Mobilisierbarkeit ergaben sich nicht.

Zusammenfassend hat sich die Eignung von Kompost für die In-situ-Immobilisierung als wirksame Sanierungsmethode für ETV-belastete Böden erneut bestätigt. Die **In-situ Immobilisierung mittels Kompost** lässt für auf Sprengplätzen übliche Konzentrationen eine vollständige Minderung der ETV



erwarten. Nur für einige Pulvertypische Verbindungen ist mit Einschränkungen hinsichtlich Langzeitwirksamkeit und Minderungsleistung in Bezug auf die Eingangskonzentration zu rechnen.

Auf Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse sind die Auswirkungen von stark DOC-beaufschlagtem Sickerwasser auf die Mobilisierbarkeit von ETV unter dem Sanierungsbereich gering. Eine schädliche Veränderung des Grundwassers mit Bezug auf Wasserorganismen durch eine hohe Ammoniumfracht aus dem Sanierungsbereich ist (in Abhängigkeit der Durchlässigkeit des Aquifers) nicht anzunehmen.

Die **Alkalische Hydrolyse** ist primär für Belastungen mit TNT/ADNT und RDX uneingeschränkt geeignet. PTV sind mittels AH tendenziell nicht sanierbar.

Die Wirksamkeit beider Verfahren für einen potenziellen Sanierungsstandort ist mit geeigneten Vorversuchen zu prüfen. Für eine Anwendung im großtechnischen Maßstab unter definierten Qualitätskriterien sind konkrete Planungs- und Handlungsschritte durchzuführen.

Vor Sanierungsbeginn ist neben den Vorversuchen eine standortbezogene Eignungsprüfung durchzuführen, die Kriterien wie das Schadstoffinventar (hier sind für IM und AH verschiedene Eignungen zu beachten) sowie Standortfaktoren (zum Beispiel Bodenbeschaffenheit und Grundwassersituation) enthält. Die Faktoren zu den jeweiligen Eignungsprüfungen sind im Kapitel 11 beschrieben. Eine Bewertungsmatrix ist dem Anhang 1 zu entnehmen.

In Kapitel 12 und Anhang 2 (Handlungsanleitung und Flussdiagramm AH) sowie in Kapitel 13 und Anhang 3 (Handlungsanleitung und Flussdiagramm IM) sind detaillierte Herangehensweisen für die beiden Verfahren beschrieben. Diese beinhalten Angaben zur Sanierungsplanung, Durchführung von Vorversuchen im Rahmen der Eignungsprüfung sowie verfahrenstechnische Vorgaben für die großtechnische Anwendung der AH und der IM.

Klärungsbedarf mit Bezug auf die Auswirkungen und das Emissionspotenzial von sanierten Standorten besteht nach wie vor für das potenzielle RDX-Abbauprodukt Nitrodiazabutanal (NDAB), für das bislang keine Bewertungsgrundlage existiert. Des Weiteren werden Laborversuche zu den potenziellen Abbauwegen von EPU zu EPA sowie von DPU zu DPA als zielführend angesehen. Zur möglichen Eignung von Aktivkohle-beaufschlagten Geotextilen werden ebenfalls weitere Versuche empfohlen.

## 15 Literaturverzeichnis

- AbwV (1997): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) vom 21.03.1997 in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 20. Januar 2022 (BGBl. I S. 87) geändert worden ist.
- AwSV (2017): Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 905), die durch Artikel 256 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.
- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG) vom 17.03.1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25.02.2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist.
- BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- BGK, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. [Hrsg.] (2023): Qualitätsanforderungen Fertigkompost. Dok. 251-006-02. Stand 01.01.2023.
- BioAbfV (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013 (BGBl. I S. 658), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 28. April 2022 (BGBl. I S. 700; 2023 I Nr. 153) geändert worden ist.
- Gemeinde Illesheim [Hrsg.] (2014): Kampfmittelräumung des Sprengplatzes Marktbergel (2011-2014), Abschlussbroschüre.
- IBH, IBH Weimar – Militärische und Rüstungsaltposten GmbH [Hrsg.] (2018): Immobilisierung und Alkalische Hydrolyse – Überprüfung der Langfristwirksamkeit von zwei alternativen Verfahren zur Behandlung ETV-belasteter Böden (behördeninternes Dokument).
- Körner, I. (2008): Stickstoffhaushalt bei der Kompostierung: Bilanzen, Gehalte, Umsetzungs- und Austragsprozesse, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg.
- LAWA, Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [Hrsg.] (2016): Ableitung von Geringfügigkeitschwellenwerten für das Grundwasser, Aktualisierte und überarbeitete Fassung.
- LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2009): Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen - Praxisteil.
- LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2019): Immobilisierung und Alkalische Hydrolyse - Überprüfung der Langfristwirksamkeit von zwei alternativen Verfahren zur Behandlung ETV-belasteter Böden, Kurzbericht - Zusammenfassung der Projektergebnisse.
- LGA, Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH [Hrsg.] (2012a): Ehemaliger Sprengplatz Marktbergel - Sanierung des Sprengfeldes im Zuge der Kampfmittelräumung. Sanierungskonzept (behördeninternes Dokument).
- LGA, Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH [Hrsg.] (2012b): Ehemaliger Sprengplatz Marktbergel – Vorstudie der Sanierung (behördeninternes Dokument).
- LGA, Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH [Hrsg.] (2012c): Sanierung des Sprengstoffbelasteten Bodenaushubs Fa. Planatol, Rohrdorf am Inn (Thansau). Vorversuche zur Bodenreinigung (behördeninternes Dokument).

- LGA, Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH [Hrsg.] (2014): Temporärer Sprengplatz Marktbergel - Fachtechnische Begleitung des Rückbaus und Vorversuch zur Entgiftung mittels Alkalischer Hydrolyse (behördeninternes Dokument).
- SprengG: Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe (Sprengstoffgesetz - SprengG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. September 2002 (BGBl. I S. 3518), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist.
- Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim [Hrsg.] (2018): Altlastenbericht 2018, Altlastenbearbeitung von 2015-2018.
- Stadt Amorbach [Hrsg.] (2018): Ehemaliger US-Sprengplatz Boxbrunn, Kampfmittelräumung trifft Bodenschutz - Kombinierte Methode mit Auflagen BBodSchG.
- TrinkwV: Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV) vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA, Umweltbundesamt: Bekanntmachung der bereits durch die oder auf Grund der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe eingestuftene Stoffe, Stoffgruppen und Gemische gemäß § 66 Satz 1 der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vom 1. August 2017, Version Demo-Version, Banz AT 10.08.2017 B5, Online verfügbar unter <https://www.bundesanzeiger.de/pub/de/amtliche-veroeffentlichung?3>, zuletzt geprüft am 18.03.2024.
- WHG (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31.07.2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 12 des Gesetzes vom 20.07.2022 (BGBl. I S. 1237) geändert worden ist.

## Anhang 1

### Checklisten für die Anwendbarkeit

Tab. 32: Bewertungsmatrix zur Eignungsprüfung für alternative Behandlungs- und Sanierungsmöglichkeiten von ETV-belasteten Böden.

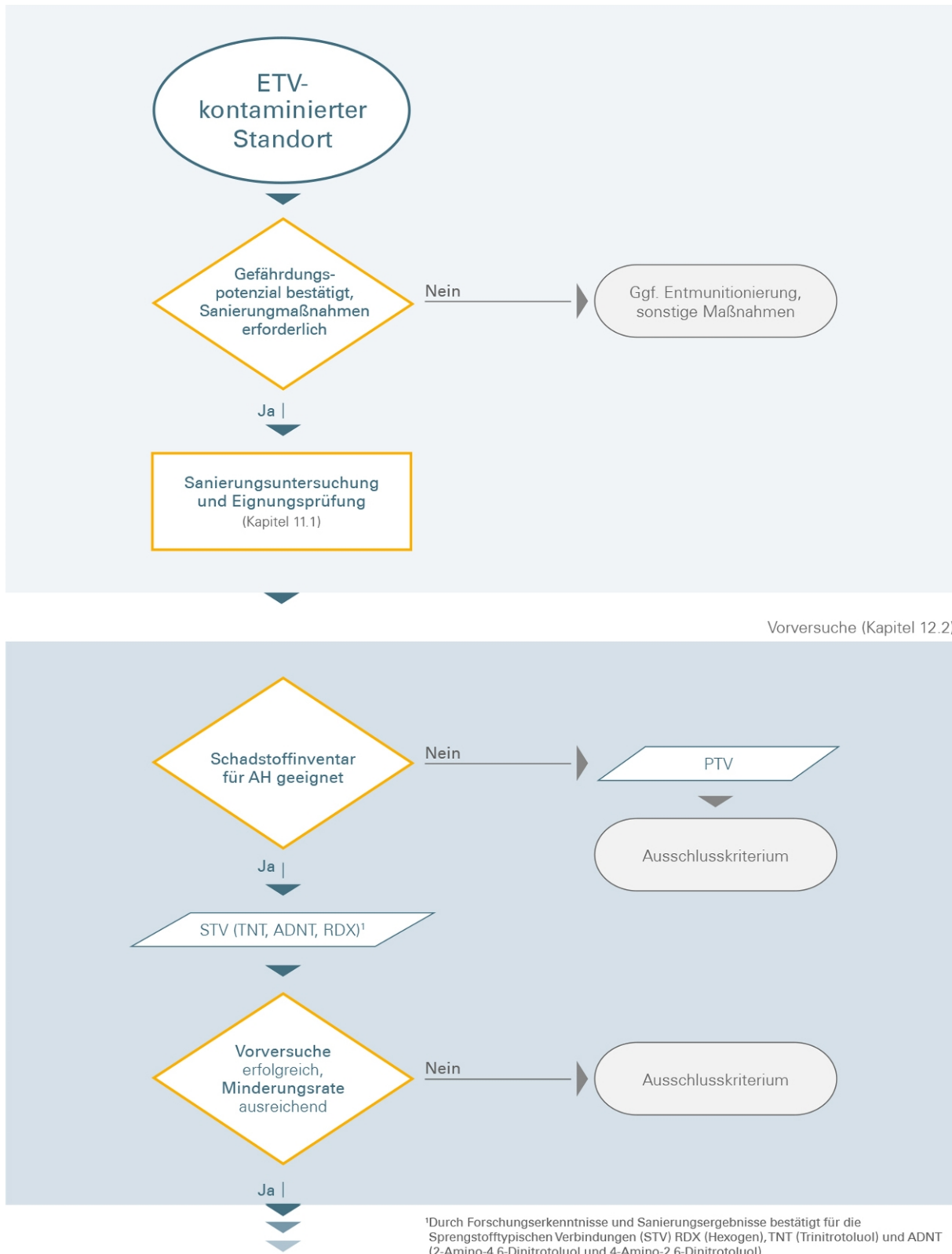
Legende: „+“: Verfahren ist geeignet; „o“: geeignet mit Einschränkungen, Eignungsprüfung erforderlich; „-“: Verfahren ist hier ungeeignet oder ausgeschlossen

Einflussfaktoren	Alkalische Hydrolyse	Immobilisierung mittels Kompost
<b>Schadstoffinventar</b>		
STV (TNT/ADNT, polare Nitroaromaten)	+	+
RDX	+	+
PTV (C1, EPU, DPU)	-	o
RDX + STV	o	+
RDX + PTV	-	o
RDX + STV + PTV	-	o
<b>Ausgangskonzentrationen</b>		
< 100 µg/l	+	+
100 bis 1.000 µg/l	+	+
1.000 bis 10.000 µg/l	+	o
<b>Standortfaktoren</b>		
Nähe zu Wasser- oder Heilquellenschutzgebieten	-	o
Grundwasserentnahmen im Umfeld (z. B. landwirtschaftliche Bewirtschaftung)	o	o
<b>Durchlässigkeit</b>		
Schwach durchlässig ( $k_f < 10^{-5}$ m/s)	o	+
Durchlässig ( $k_f > 10^{-5}$ m/s)	+	+
<b>Aquifer</b>		
Porengrundwasserleiter	+	+
Karst- oder Kluft-Grundwasserleiter	-	-
<b>Abstandsgeschwindigkeit</b>		
langsam (mm bis cm pro Tag)	+	+
schnell (dm bis m pro Tag)	+	o
<b>Abstand der Sohle des Schadensbereichs zum Grundwasser</b>		
<b>a) bei <math>k_f</math>-Wert <math>&gt; 10^{-4}</math> m/s</b>		
Schaden reicht in die gesättigte Zone	-	-
Schaden reicht in Schwankungsbereich	-	-
< 5 m Abstand	-	o
> 5 m Abstand	o	o
<b>b) bei <math>k_f</math>-Wert <math>10^{-4}</math> bis <math>10^{-6}</math> m/s</b>		
Schaden reicht in die gesättigte Zone	-	-
Schaden reicht in Schwankungsbereich	-	-
< 2 m Abstand	o	o
> 2 m Abstand	o	o
<b>c) bei <math>k_f</math>-Wert <math>&lt; 10^{-6}</math> m/s</b>		
Schaden reicht in die gesättigte Zone	-	-
Schaden reicht in Schwankungsbereich	o	o
< 2 m Abstand	o	o
> 2 m Abstand	o	o
<b>Verfügbare Arbeitsfläche im Sanierungsbereich</b>		
Schadensfläche x 5	+	+
Schadensfläche x 3 und kleiner	o	o

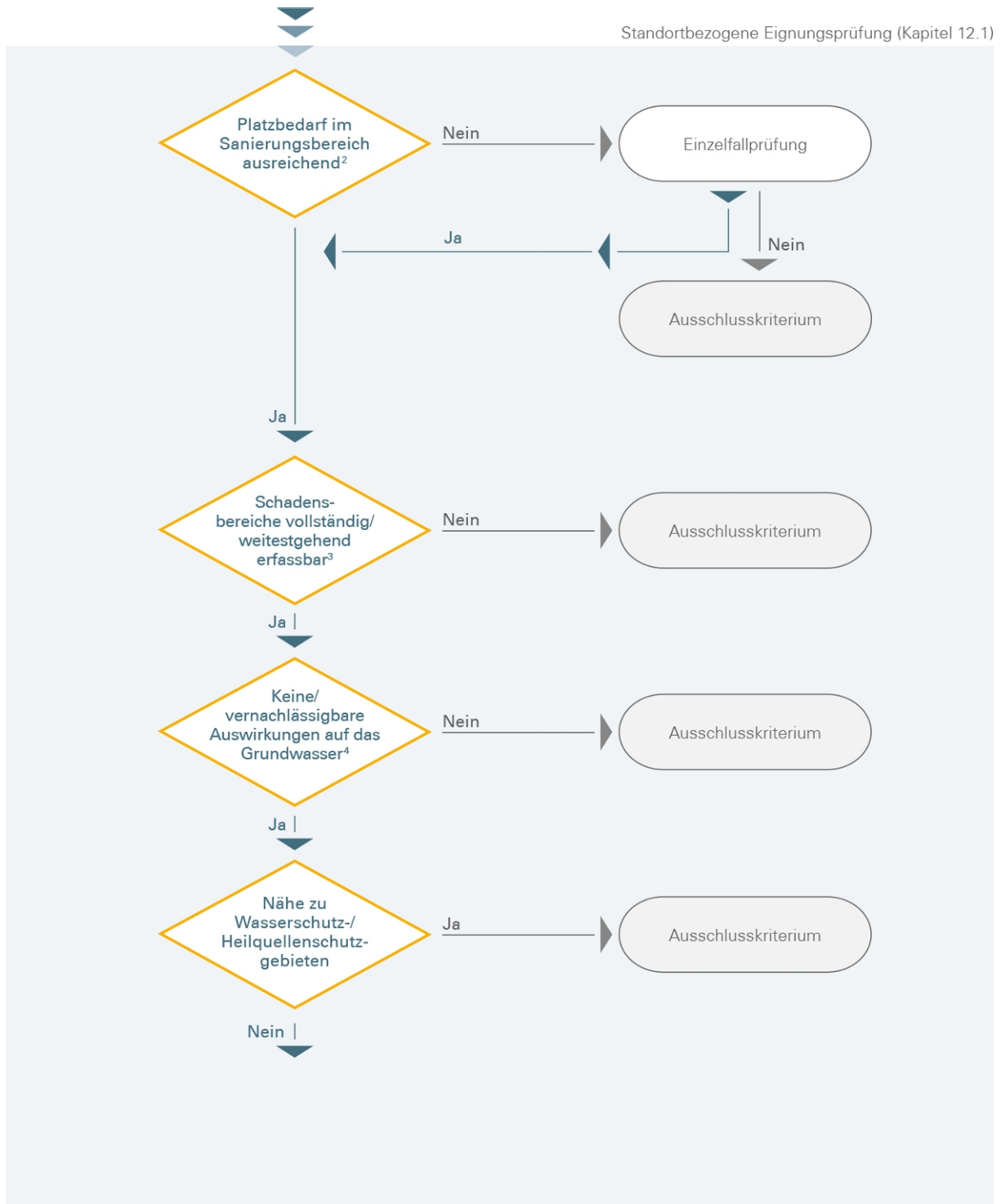
Tab. 33: Checkliste für die großtechnische Anwendung

Parameter	Alkalische Hydrolyse	In-situ Immobilisierung mittels Kompost
Eignungsprüfung	in Verbindung mit Tabelle 29 des Berichts	in Verbindung mit Tabelle 30 des Berichts
Vorversuche	zur Minderungsleistung	zur Minderungsleistung des verfügbaren Komposts
Materialanforderungen	Alkalienform, z. B. Trockengranulat	Anforderungen an den Kompost: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompost aus Grüngut</li> <li>• Rottegrad V</li> <li>• Siebung Obergrenze 15 mm</li> <li>• DOC um 80 mg/l (10:1-Eluat)</li> <li>• AK 254 nm um 40 m<sup>-1</sup></li> </ul>
Verfügbarkeit	Mengenermittlung der notwendigen Alkalien	Mengenermittlung von geeignetem Kompost Anlieferung des Komposts im Sanierungszeitraum absichern
Arbeitsschutz-technische Anforderungen	z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbeits- und Sicherheitsplan,</li> <li>• Schutzausrüstung</li> </ul>	z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbeits- und Sicherheitsplan,</li> <li>• Schutzausrüstung</li> </ul>
Technische Durchführbarkeit	z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Platzbedarf,</li> <li>• Baufahrzeuge</li> </ul>	z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Platzbedarf,</li> <li>• Baufahrzeuge</li> </ul>
Rechtliche Anforderungen	z. B. wasserrechtliche Erlaubnis <ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissionsabschätzung des sanierten Bodenmaterials,</li> <li>• ggf. Wasserhaltung</li> </ul>	z. B. wasserrechtliche Erlaubnis <ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissionsabschätzung des sanierten Bodenmaterials,</li> <li>• ggf. Wasserhaltung</li> </ul>
Nachbehandlung	Absenkung des pH-Wertes	-
Nachsorge	z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfolgskontrolle,</li> <li>• pH-Wert-Messungen</li> </ul>	z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfolgskontrolle,</li> <li>• Monitoring</li> </ul>

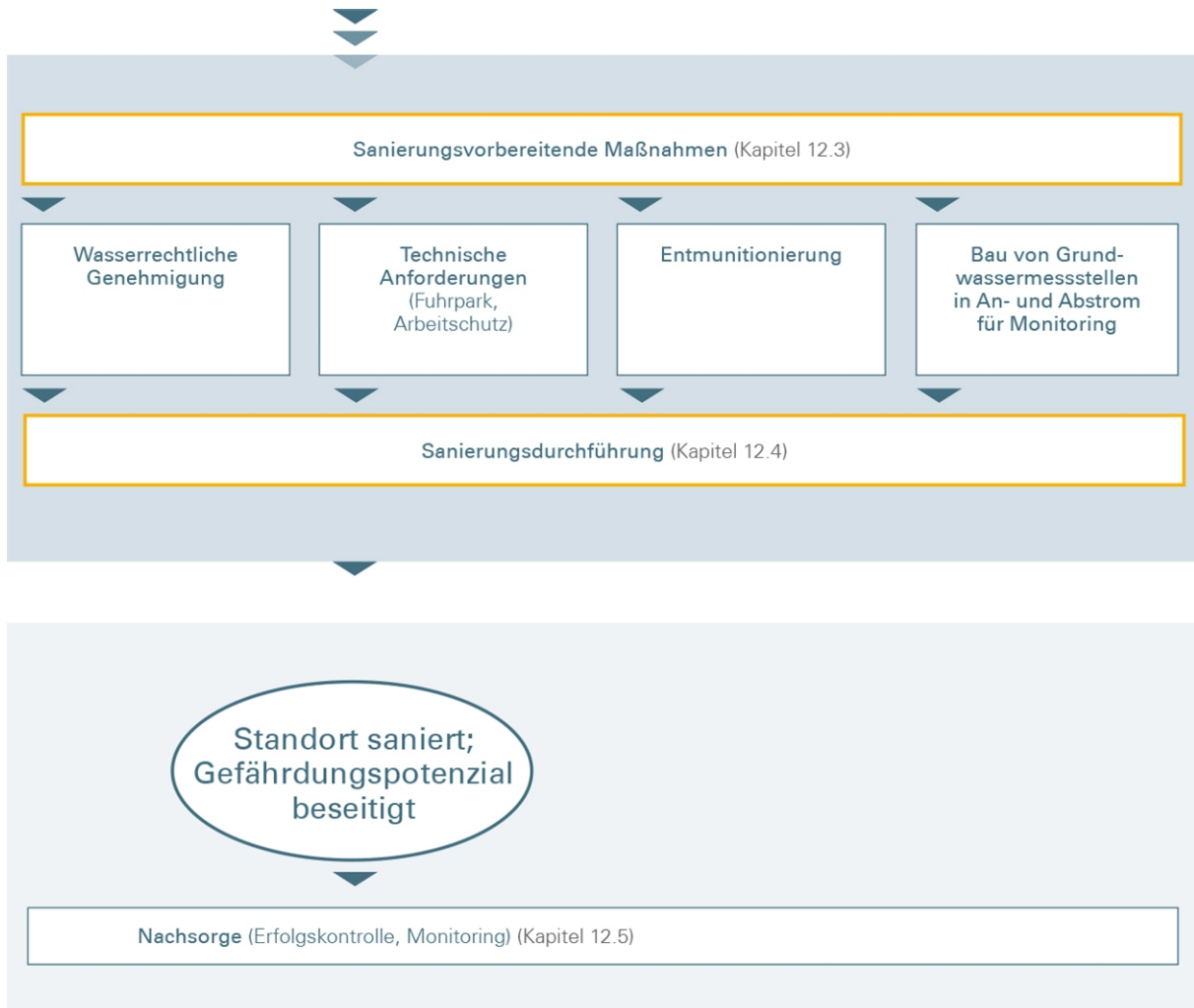
## Anhang 2 Flussdiagramm zur Anwendung der Alkalischen Hydrolyse auf einem ETV-belasteten Standort



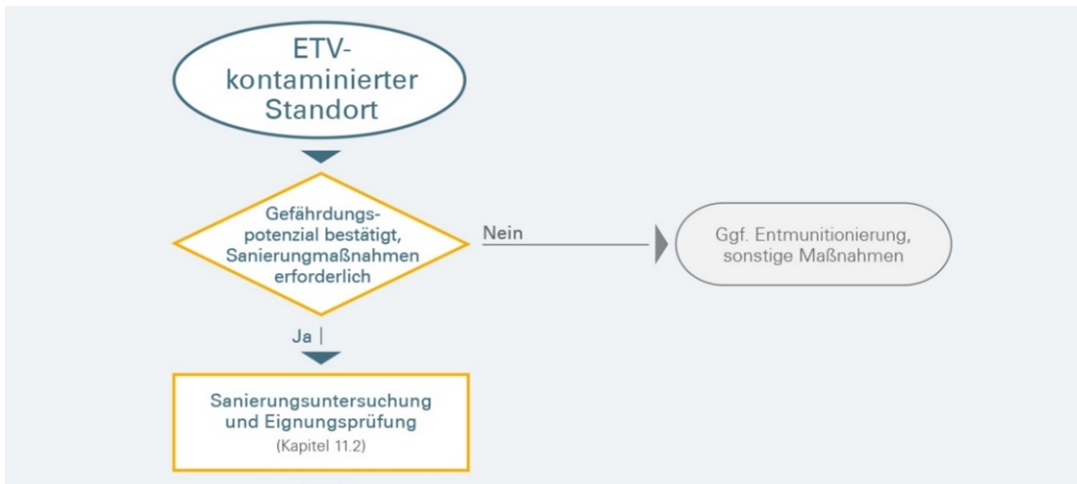




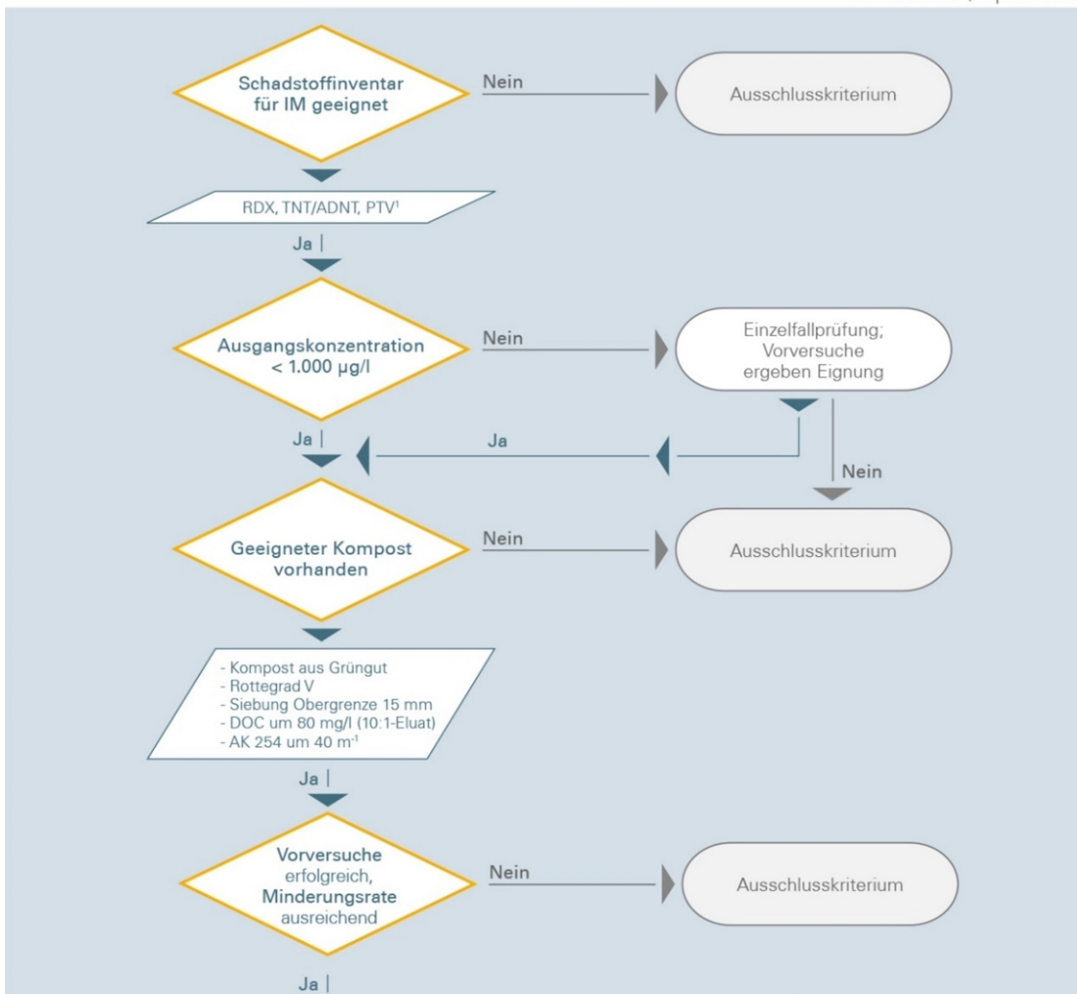
<sup>2</sup>Geeignet: Verfügbare Fläche ca. 5x Schadensbereich  
<sup>3</sup>Grundwasserflurabstand, Schadensausdehnung in ungesättigter oder gesättigter Bodenzone und im Grundwasserschwankungsbereich  
<sup>4</sup>Aquifer (Porengrundwasserleiter, Karst- oder Klüftgrundwasserleiter), Abstandsgeschwindigkeit



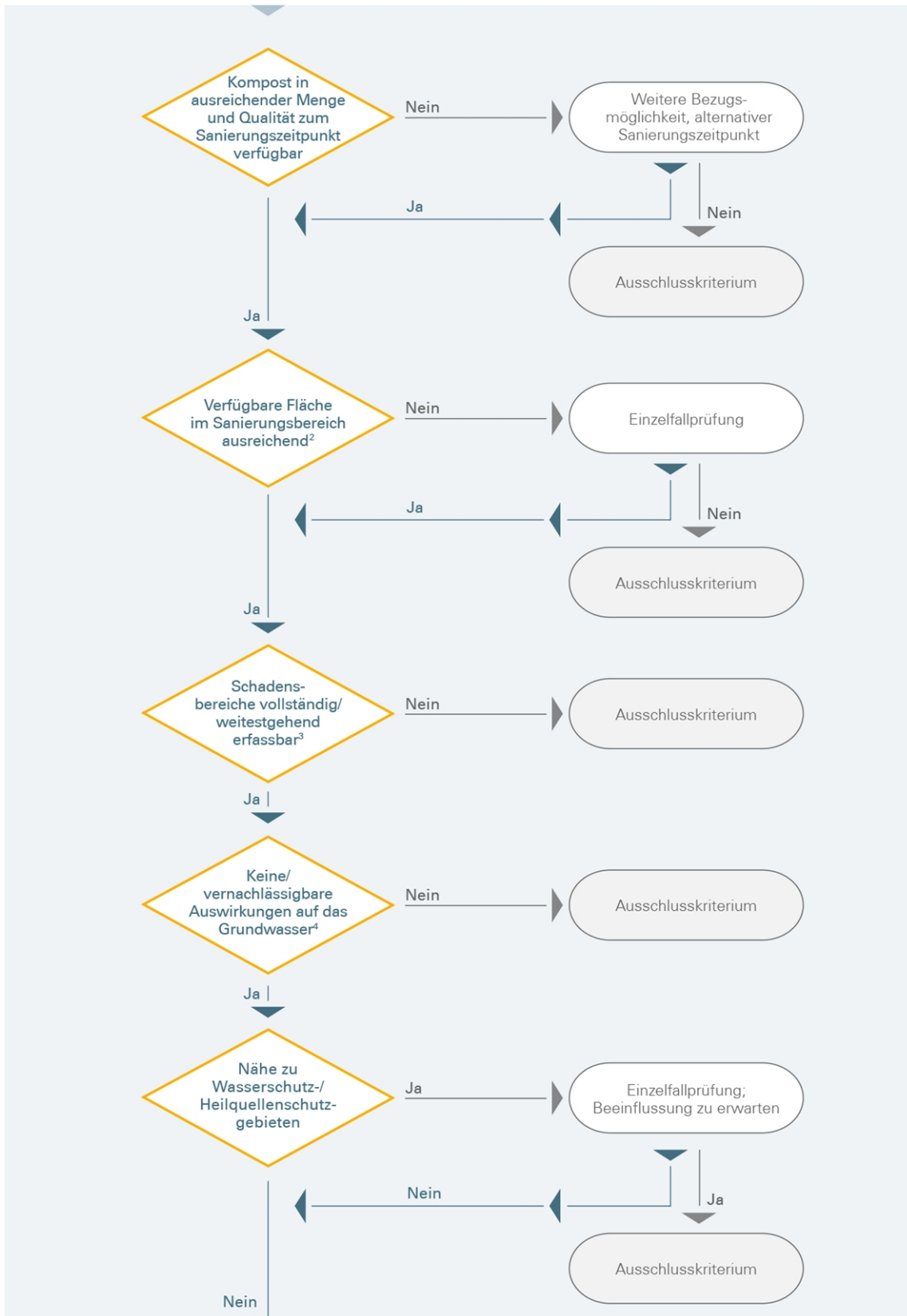
### Anhang 3 Flussdiagramm zur Anwendung der Immobilisierung mittels Kompost auf einem ETV-belasteten Standort



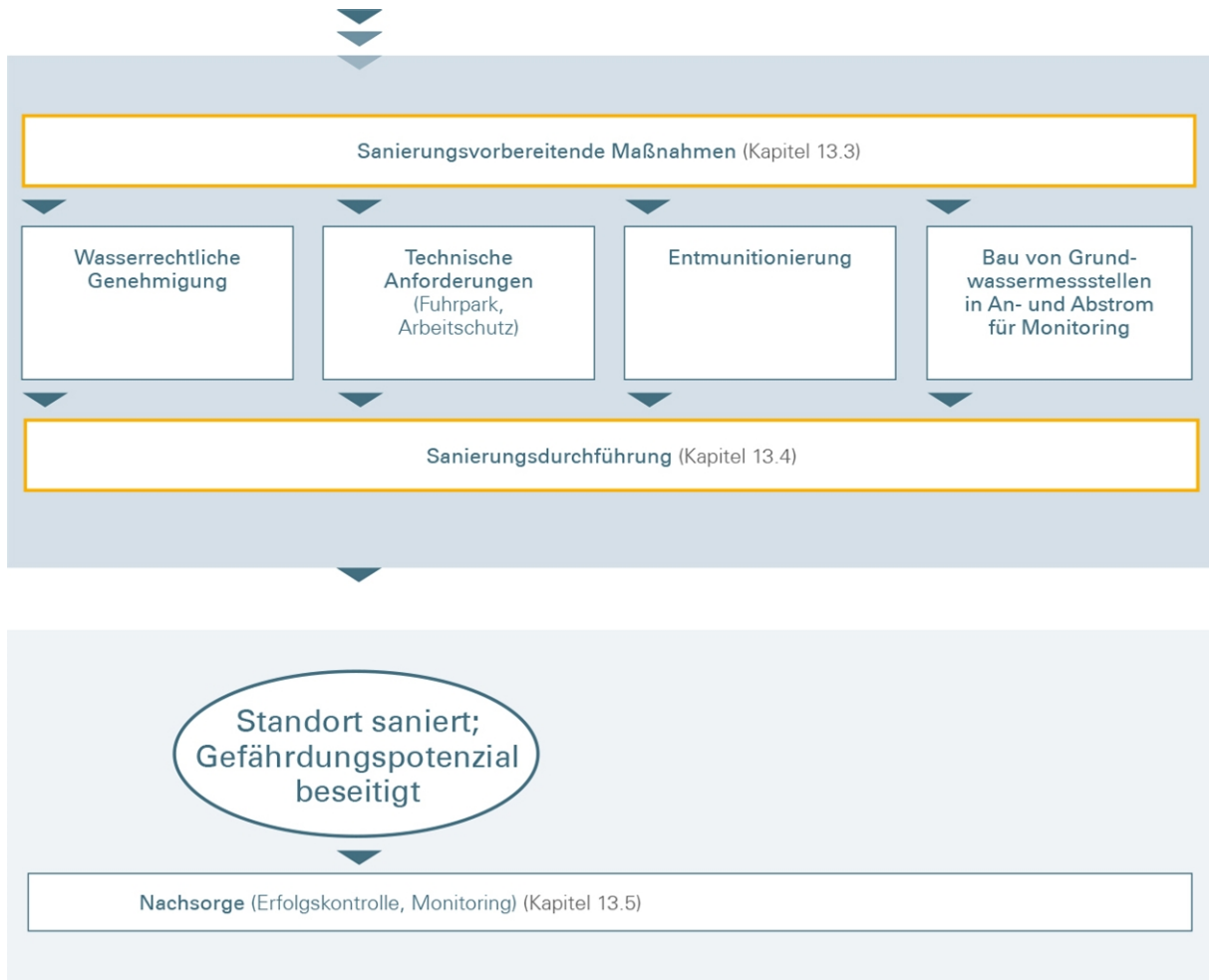
Vorversuche (Kapitel 13.2)



<sup>1</sup>Durch Forschungserkenntnisse und Sanierungsergebnisse bestätigt für die Sprengstofftypischen Verbindungen (STV) RDX (Hexogen), TNT (Trinitrotoluol) und ADNT (2-Amino-4,6-Dinitrotoluol und 4-Amino-2,6-Dinitrotoluol) sowie für die Pulvertypischen Verbindungen (PTV) C 1 (Centralit I), EPA (N-Ethyl-N-Phenylamin) und EPU (N-Ethyl-N-Phenylurethan)



<sup>2</sup>Geeignet: Verfügbare Fläche ungefähr 5 x Schadensbereich  
<sup>3</sup>Grundwasserflurabstand, Schadensausdehnung in ungesättigter oder gesättigter Bodenzone und im Grundwasserschwankungsbereich  
<sup>4</sup>Aquifer (Porengrundwasserleiter, Karst- oder Klufgrundwasserleiter), Abstandsgeschwindigkeit





Eine Behörde im Geschäftsbereich  
Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz

