



Grundlagenermittlung

Verfahren zur Sanierung von Boden- und Grundwasserkontaminationen durch sprengstoff- und pulvertypische Verbindungen

Übersicht zu bisher durchgeführten
Behandlungsverfahren aus Forschungsvorhaben
und praktischen Anwendungen



altlasten



Grundlagenermittlung

Verfahren zur Sanierung von Boden- und Grundwasserkontaminationen durch sprengstoff- und pulvertypische Verbindungen

Übersicht zu bisher durchgeführten
Behandlungsverfahren aus Forschungsvorhaben
und praktischen Anwendungen

Impressum

Verfahren zur Sanierung von Boden- und Grundwasserkontaminationen durch sprengstoff- und pulvertypische Verbindungen

Herausgeber:

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

Konzept/Text:

LfU: Dr. Martin Biersack und Mira Reller

Redaktion:

LfU: Mira Reller und Dr. Martin Biersack
LfU: Katharina Stroh

Bildnachweis:

Abb. 1: LfU (Seite 7)
Abb. 2: LfU (Seite 7)
Abb. 3: LfU (Seite 7)
Abb. 4: Umweltbundesamt (Seite 14)
Abb. 5: LfU, Mira Reller (Seite 17)
Abb. 6: IBH Weimar (Seite 20)
Abb. 7: Gibbs geologen + ingenieure GmbH & Co. KG, Deichslerstr. 25, 94089 Nürnberg (Seite 34)

Stand:

August 2021

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 Wahlwerbenden 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 erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Konventionelle Bodensanierungsverfahren	8
2.1	Deponierung	8
2.2	Thermische Verfahren (ex-situ)	9
2.3	Oberflächenabdichtung	9
2.4	Basisabdichtung	10
2.5	Hydraulische Sicherung	10
3	Innovative („alternative“) Bodenbehandlungsverfahren	12
3.1	Immobilisierung	13
3.2	Alkalische Hydrolyse	19
3.3	Bodenwäsche	21
4	Forschungsprojekte zur Behandlung von STV-Kontaminationen	24
4.1	Forschungsprojekte Bodenbehandlung	26
4.1.1	Slurry-Verfahren	26
4.1.1.1	Anaerob-aerobes Bodensuspensionsverfahren	26
4.1.1.2	Phytoslurry	26
4.1.2	Kompostierung, Bioremediation	27
4.1.2.1	Anaerob-aerobes Kompostierungsverfahren (Fa. Umweltschutz Nord)	27
4.1.2.2	Dynamisches Beet-/Mietenverfahren (Fa. Plambeck ContraCon)	27
4.1.2.3	Untersuchung zu Composting (USA, Fa. BSI Environmental, Inc.)	28
4.1.2.4	Festphasensanierung – Solid Phase Bioremediation (USA, Fa. Grace, Canada, Inc.)	28
4.1.3	Weißfäulepilzverfahren (DE, Fa. AWIA Umwelt)	28
4.1.4	„BioREx“: Biologische Low-Cost-Behandlung von sprengstoffkontaminierten Böden	29
4.1.5	Phytoremediation	30
4.1.6	Niedrigtemperaturverfahren – Thermische Desorption	30
4.1.7	Chemisches Reduktionsverfahren	31
4.1.8	Chemisches Oxidationsverfahren	31
4.1.9	Immobilisierung von sprengstoffbelasteten Böden mittels Torf	31
4.1.10	Alkalische Hydrolyse	31

4.1.11	Monitored Natural Attenuation	32
4.2	Forschungsprojekte Behandlung wässriger Phasen	33
4.2.1	Constructed Wetland	33
4.2.2	STV-Entfernung mittels Adsorptionsmaterialien	34
4.2.2.1	Aktivkohle	34
4.2.2.2	RGS-Polymere	35
4.2.3	Photochemischer Abbau	36
4.2.3.1	Photolyse	36
4.2.3.2	UV-Oxidation	36
4.2.4	Chemische Reduktion	36
4.2.5	Chemische Oxidation	37
4.2.6	Einsatz von Pilzen zur Reinigung von Hexogen-kontaminierten Wässern	38
5	Tabellarische Zusammenfassung der Verfahrensergebnisse	38
5.1	Zusammenfassung und Ergebnisse bisheriger Forschungsvorhaben	38
5.2	Zusammenfassung bisher angewandter Sanierungsverfahren	42
6	Erkenntnisse und Empfehlungen	44
7	Literatur	46

Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wird der derzeitige, dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) bekannte Kenntnisstand hinsichtlich der wesentlichen Verfahren zur Behandlung von Boden- und Grundwasserkontaminationen durch sprengstoff(STV)- und pulvertypische(PTV) Verbindungen bei Rüstungsaltslasten vorgestellt. Dies bezieht sich auf Erkenntnisse aus Deutschland und den USA. Die summarisch als explosivstofftypische Verbindungen (ETV) bezeichneten Substanzen stellen aufgrund ihrer hohen Toxizität und der relativ guten Wasserlöslichkeit eine Umweltgefahr dar und erfordern in der Regel Sanierungsmaßnahmen. Zur Behandlung entsprechend kontaminierter Böden kommen als Standardverfahren in erster Linie Bodenaushub mit anschließender Verbrennung oder Deponierung zur Anwendung. Kontaminiertes Grundwasser wird meist mittels Aktivkohle gereinigt.

Neben diesen konventionellen Sanierungsverfahren bestehen innovative Ansätze, für die sich nach derzeitigem Kenntnisstand und in Abhängigkeit der Schadstoffzusammensetzung ein realistisches Anwendungspotenzial bei der Sanierung von Rüstungsaltslasten abzeichnet. Hervorzuheben sind hier vor allem die Bodenwäsche, sowie die Immobilisierung mit Kompost (IM) und die Alkalische Hydrolyse (AH), die bei Sanierungsmaßnahmen bereits zur Behandlung entsprechend kontaminierter Böden eingesetzt wurden. Die Anwendungsfälle werden im Bericht vorgestellt. IM und AH waren außerdem Gegenstand eines vom LfU durchgeführten Forschungsprojektes am Standort ehem. Sprengplatz Marktbergel (BY). Für STV zeigte die Immobilisierung mit Kompost gute Ergebnisse. Weitere potenzielle Behandlungsmöglichkeiten waren Bestandteil verschiedener Forschungsvorhaben. Alle dem LfU zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichts bekannten Forschungsverfahren zur Sanierung von entsprechend kontaminierten Böden bzw. wässrigen Phasen sowie die jeweils ermittelten Ergebnisse werden in diesem Bericht zusammen mit den möglichen Einsatzbereichen in komprimierter Form beschrieben.

Sanierungsmaßnahmen auf ETV-kontaminierten Standorten sind in der Regel durch eine Kampfmittelräumung (KMR) begleitet. Letztere führt meist zu einer erheblichen Reduzierung des makroskopisch greifbaren Emissionspotenzials an Sprengstoffen und Pulvern in der kontaminierten Fläche, weshalb die KMR – neben der Abwehr von Gefahren für die öffentliche Sicherheit – zusätzlich einen wichtigen Bestandteil des Sanierungsprozesses auf Rüstungsaltslasten darstellt.

1 Einleitung

Einen bedeutenden Anteil der bisher in Bayern erhobenen Rüstungsalblastverdachtsstandorte stellen Sprengplätze im Sinne von „Massenvernichtungsplätzen für Munition durch Sprengen“ dar. Zur zielgerichteten und einheitlichen Bearbeitung von Sprengplätzen in Bayern wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) im Jahr 2009 die „Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen“ veröffentlicht [1]. Für die überwiegend mit explosivstofftypischen Verbindungen (im Nachfolgenden „ETV“ genannt) kontaminierten Flächen ist in der Regel eine hohe Bearbeitungspriorität gegeben. ETV können in sprengstofftypische (STV) und pulvertypische (PTV) Verbindungen unterteilt werden. Zu Ersteren zählen z. B. 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT), Aminodinitrotoluole (ADNT), Hexogen (RDX) und Nitropenta (PETN); zu den PTV zählen z. B. Centralit 1 (C1), Diphenylurethan (DPU) und Ethylphenylurethan (EPU).

Aktuell sind im Altlasten-, Bodenschutz- und Dateninformationssystem (ABuDIS) des LfU rund 80 Rüstungsalblastverdachtsflächen der Kategorie „Sprengplatz“ zugeordnet. Acht Flächen sind als Altlast eingetragen. Bei den meisten Sprengplätzen wurde ein klarer kurz- oder mittelfristig erforderlicher Sanierungsbedarf festgestellt. Die konventionell für die Sanierung kontaminierter Böden eingesetzten Verfahren (Aushub und Deponierung bzw. Verbrennung der kontaminierten Böden) ist meist mit hohen Kosten verbunden. Im Rahmen der erforderlichen Sanierungsplanung mit Variantenstudie und Kostenaufstellung wird deshalb vermehrt auch geprüft, inwieweit eine Gefahrenabwehr der ETV-Kontamination mit neuen und kostengünstigeren Verfahren möglich ist (sogenannte „Alternative“ oder „innovative“ Verfahren). Als erfolgversprechende Alternativen werden derzeit die Behandlungsverfahren „Immobilisierung mittels Kompost (IM)“, „Alkalische Hydrolyse“ sowie die Bodenwäsche diskutiert. Diese Verfahren zeichnen sich durch eine relativ einfache Anwendung sowie im Vergleich mit der Deponierung bzw. Verbrennung deutlich geringeren Behandlungskosten aus.

Im vorliegenden Bericht wird ein Überblick über die in verschiedenen Projekten untersuchten oder bereits angewandten alternativen Verfahren gegeben. Diejenigen Verfahren, welche nach derzeitigem Kenntnisstand als erfolgversprechend zur Behandlung von ETV-Kontaminationen in Böden und wässrigen Phasen einzustufen sind, werden detailliert vorgestellt. Die betrachteten Sanierungsverfahren kamen in Deutschland und den USA bereits zur Anwendung bzw. waren Bestandteil von Forschungsvorhaben oder sanierungsvorbereitenden Untersuchungen. Stoffspezifischen Anwendungsgrenzen und Einschränkungen, insbesondere der aktuell favorisierten Behandlungsverfahren, werden aufgezeigt und Empfehlungen für den Anwendungsfall gegeben.

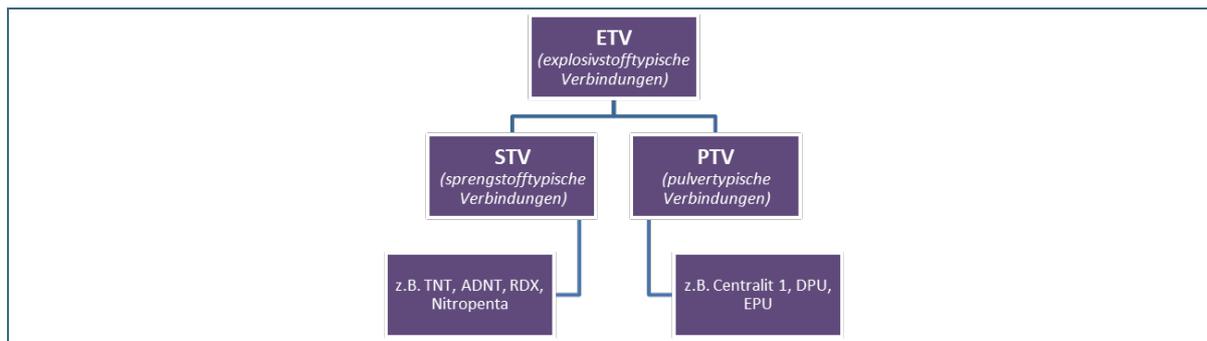


Abb. 1: Einteilung ausgewählter ETV.

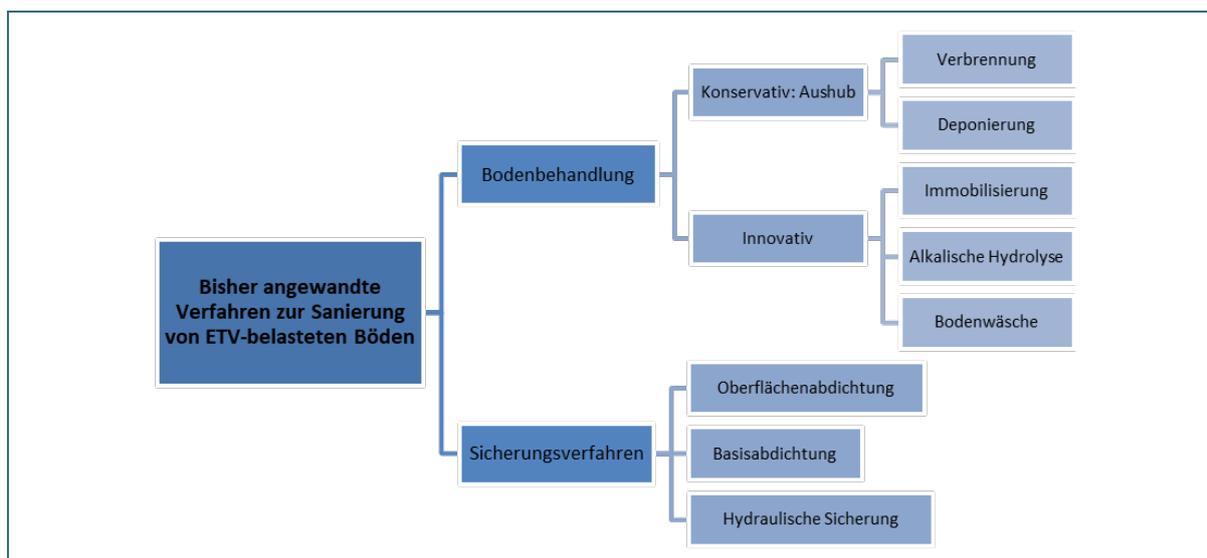


Abb. 2: Bisher angewandte Verfahren zur Behandlung ETV-belasteter Böden

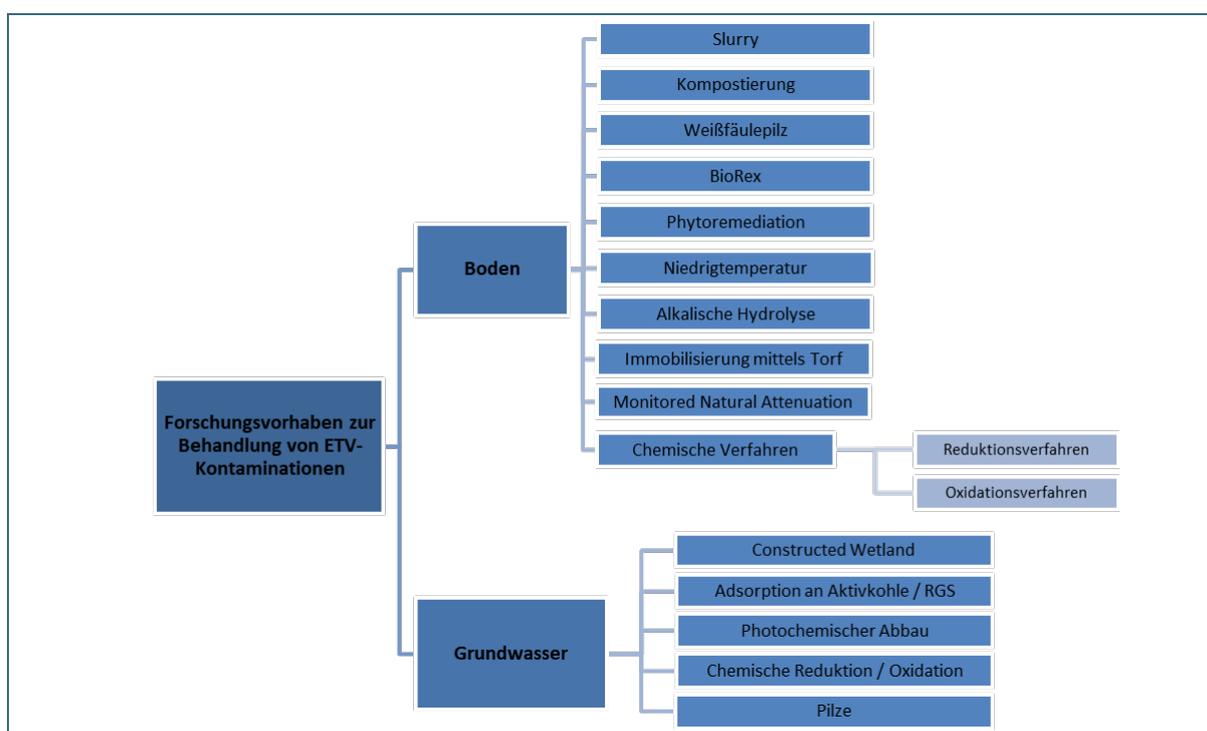


Abb. 3: Forschungsvorhaben zur Behandlung von ETV-Kontaminationen

2 Konventionelle Bodensanierungsverfahren

Im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen bei Rüstungsaltslasten kamen in der Vergangenheit bevorzugt konventionelle Dekontaminations- oder Sicherungsverfahren zur Anwendung. In erster Linie waren dies

- a) Aushub mit anschließender Deponierung,
- b) Aushub mit anschließender Verbrennung sowie
- c) Sicherungsverfahren.

Die ehemaligen großen TNT-Werke des 2. Weltkriegs (*Stadtallendorf(Hessen) / Hessisch Lichtenau(Hessen) / Clausthal-Zellerfeld(Nieders.)*) waren die ersten Standorte in Deutschland, an denen die genannten Verfahren zur Behandlung der Böden zur Anwendung kamen. Allerdings waren diese Sanierungsverfahren mit hohen Kosten verbunden.

Neben den vorgenannten Behandlungsverfahren wandte man in Deutschland bei der Sanierung von Rüstungsaltslasten bisher außerdem die Oberflächenabdichtung, den Aushub und Wiedereinbau auf einer Basisabdichtung (mit Sickerwasserfassung und -behandlung) sowie hydraulische Sicherungsmaßnahmen an. Diese Sanierungsmöglichkeiten unterscheiden sich von der Deponierung insofern, als dass sie den kontaminierten Boden direkt vor Ort bzw. in-Situ vor Auswaschung oder Weiterverbreitung der Schadstoffe sichern. Die Deponierung findet meist ex-situ statt.

Die jeweiligen Verfahren werden nachfolgend – teilweise mit Anwendungsbeispiel – vorgestellt.

2.1 Deponierung

Bei der Deponierung kommt es zu keiner Behandlung des Bodens im wörtlichen Sinn. Vielmehr wird der belastete Boden durch Beseitigung dem natürlichen Stoffkreislauf entzogen und gesichert abgelagert. Die Deponierung hat entsprechend den Vorgaben der Deponieverordnung (DepV) zu erfolgen. Boden darf nur deponiert werden, wenn er bestimmte Grenzwerte einhält und alle Anforderungen an die jeweilige Deponieklasse erfüllt. Die Zuordnung zu den Deponieklassen wird durch die Art des Bodens sowie die Höhe der vorhandenen Belastung bestimmt.

In Deutschland gibt es fünf Deponieklassen:

- **DK 0:** für nicht gefährliche „Inertabfälle“¹ (insbesondere Boden, untergeordnet Bauabfälle),
- **DK I:** für nicht gefährliche und gefährliche Abfälle (z. B. Bodenaushub, Bauabfälle, KMF, Asbest),
- **DK II:** für nicht gefährliche **und** gefährliche Abfälle (z. B. Bauabfälle, Straßenaufbruch, Aschen),
- **DK III:** für gefährliche Abfälle: Sonderabfälle, die oberirdisch abgelagert werden können,
- **DK IV:** für gefährliche Abfälle: Sonderabfälle, die unterhalb der Erdoberfläche abgelagert werden müssen (z. B. Filterstäube).

¹ Inertabfälle sind Abfälle, die keinen wesentlichen physikalischen, chemischen oder biologischen Veränderungen unterliegen. Inertabfälle lösen sich nicht auf, sind nicht brennbar und bauen sich nicht biologisch ab. Sie beeinträchtigen andere Materialien, mit denen sie in Berührung kommen, nicht in einer Weise, die zu einer Umweltbeeinträchtigung führen oder sich negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken könnte. Ihre Auslaugbarkeit ist gering und der Schadstoffgehalt sowie die Ökotoxizität des Sickerwassers müssen unerheblich sein.

Parameter wie z. B. explosivstofftypische Verbindungen, für die in der DepV keine Zuordnungswerte genannt sind, werden durch länderspezifische Vorgaben der Fachbehörden geregelt. Um die Ablagerung auf einer niedrigeren Deponieklasse zu ermöglichen, kann die Schadstoffbelastung ggf. durch eine vorgeschaltete Bodenbehandlung reduziert werden. Gut geeignet ist hierfür zum Beispiel eine Bodenwäsche (siehe Kapitel 3.3).

Weitere Informationen:

- [LfU-Deponie-INFO-Merkblatt 1 „Mineralische Deponieabdichtungen“](#) [2] oder
- [LfU-Deponie-INFO-Merkblatt 7 „Hinweise zum Vollzug der DepV“](#) [3]

2.2 Thermische Verfahren (ex-situ)

Bei der thermischen Bodenbehandlung gibt es mittlerweile ebenfalls Alternativen zur klassischen, „direkten“ Verbrennung. So können Schadstoffe bei der sog. pyrolytischen Verbrennung durch Erhitzung des Bodens in die Gasphase überführt und anschließend durch Kondensation oder Nachverbrennung entfernt werden (siehe auch Kapitel 4.1.6).

Die **Vorteile** einer Komplettverbrennung bestehen darin, dass diese für nahezu alle Bodenarten und die meisten Schadstoffe geeignet ist – mit Ausnahmen bei Schwermetallen. Geeignete Schadstoffe können bis zur vollständigen Entfernung abgebrannt werden.

Nachteilig ist der hohe Energiebedarf, das Anfallen von Rauchgasreinigungsrückständen sowie hohe Kosten, die im Wesentlichen durch die hohen Verbrennungstemperaturen und die Rauchgasreinigung verursacht werden. Die tatsächlichen Behandlungskosten sind abhängig von Feuchteanteil, Art und Höhe der Kontamination sowie der Zusammensetzung des Bodens.

2.3 Oberflächenabdichtung

Oberflächenabdichtungen zur Sicherung von Rüstungsaltslasten erfolgen in der Regel in Anlehnung an die Vorgaben der Deponieverordnung (DepV). Durch das Abdichten kontaminierter Bereiche gegen Zutritt von Oberflächenwasser kann ein weiterer Schadstoffaustrag (z. B. TNT, Hexogen) mit dem Sickerwasser in das Grundwasser weitgehend ausgeschlossen werden. Da das Schadstoffpotenzial im abgedichteten Bereich langfristig erhalten bleibt, ist nicht mit einem signifikanten Schadstoffabbau im Untergrund zu rechnen.

Zur Ausführung der Oberflächenabdichtung stehen folgende Varianten zur Verfügung:

1. Bentonit-Matten,
2. Kunststoffdichtungsbahn (KDB),
3. mineralische Dichtung (auch einsetzbar als Dichtwand, siehe nachfolgendes *Fallbeispiel*),
4. Bitumendichtung.

Da zur Erfolgskontrolle der Abdichtung i. d. R. ein kontinuierliches und zeitlich unbegrenztes Grundwassermonitoring durchzuführen ist, fallen hier **zusätzliche Kosten** an.

Weitere Informationen bieten das LfU-Deponie-INFO-Merkblatt 1 „Mineralische Deponieabdichtungen“ von LfU und LANUV 2009 [2] sowie das LfU-Deponie-INFO-Merkblatt 7 „Hinweise zum Vollzug der DepV“ (LfU 2015) [3].

Fallbeispiel: Eine mineralische Dichtung in Kombination mit einer Dichtwand kam auf dem Standort der *Heeresmunitionsanstalt Feucht* zur Anwendung.

Das Gelände der Muna Feucht wurde ab 1946 von der Staatlichen Erfassungsstelle für öffentliches Gut (StEG) als Delaborierungs- und Entschärfungsstelle genutzt. Während dieser Arbeiten ereigneten sich mehrere Explosionsunfälle und Waldbrände, die zu einer großflächigen Verbreitung von chemischen Kampfstoffen wie Lost und Clark I auf dem Gelände führten [4]. Aufgrund der hohen Explosionsgefahr durch noch im Boden vorhandene Munition kam auf einem der beiden Sprengfelder eine mineralische Oberflächenabdichtung zur Anwendung. Gegen seitwärts einströmendes Grundwasser wurde der Bereich in den Jahren 2006 bis 2009 mit teils 30 Meter tiefen Dichtwänden (Schlitzwände) eingefasst. Im Untergrund schließt eine natürlich vorhandene Tonschicht den Bereich ab. Das Gelände ist weiträumig umzäunt und mit einem Betretungsverbot versehen. [5] [6]

Die Schadstoffgehalte im Grundwasser werden mittels Beprobungen der vorhandenen Brunnen laufend kontrolliert. Ein signifikanter Rückgang der Schadstoffgehalte konnte jedoch bisher nicht nachgewiesen werden. [7]

2.4 Basisabdichtung

Bei der Sanierung von Altlasten kann die Basisabdichtung sowie die Sammlung und Reinigung des kontaminierten Sickerwassers in Anlehnung an die Vorgaben der Deponieverordnung (DepV) erfolgen. Die technischen Ausführungsmöglichkeiten der Basisabdichtung entsprechen weitgehend denen der Oberflächenabdichtung.

Nach Aushub und Entmunitionierung wird das belastete Material auf der Basisabdichtung abgelagert. Die Schadstoffe werden durch Niederschläge ausgewaschen und im kontaminierten Sickerwasser behandelt, so dass der Standort nach dem kompletten Schadstoffaustrag als saniert angesehen werden kann. Je nach Belastungsgrad kann die passive Auswaschung von STV-kontaminierten Böden jedoch viele Jahrzehnte fortbestehen und zusätzliche Kosten verursachen.

Fallbeispiel: Auf einem Übungssprengplatz auf dem *Truppenübungsplatz Wildflecken* wird diese Sanierungsvariante erfolgreich angewandt. Die Reinigung der kontaminierten Sickerwasser erfolgt in einem „Constructed Wetland“ (vgl. Kap. 4.2.1).

2.5 Hydraulische Sicherung

Die hydraulische Sicherung dient der vollständigen Erfassung des abströmenden kontaminierten Grundwassers durch z. B. Entnahmebrunnen oder Drainagegräben. Das gesammelte Grundwasser wird anschließend meist über Aktivkohle gereinigt. Die Kosten sind von der Größe des Standortes, der Mächtigkeit des Grundwasserleiters und der zu reinigenden Grundwassermenge abhängig. Bei der Errichtung einer reaktiven Wand erfolgt die Abreinigung in situ.

Fallbeispiel: Eine hydraulische Sicherung wird auf dem ehemaligen *TNT-Werk in Stadtallendorf* durchgeführt, da dort auch nach der Sanierung der Hauptschadstoffquellen erhebliche Restmengen an Sprengstoff (> 100 t TNT) mit verhältnismäßigen Mitteln nicht saniert werden konnten und im Untergrund verbleiben mussten. Um eine Kontamination der nahegelegenen überregionalen Wasserversorgung zu verhindern, wird der Grundwasserabstrom großräumig erfasst und abgereinigt. Durch die Anpassung der Entnahmemengen von hydraulischer Sicherung und Trinkwasserbrunnen wird ein Zustrom des belasteten Grundwassers zu den Brunnen der Wasserversorgungsanlage verhindert und die Ausbreitung der Grundwasserkontamination über den Bereich der Rüstungsalblast hinaus minimiert. Die hydraulische Sicherung ist essentiell für die Sanierung des Bodens vor Ort. Seit Inbetriebnahme der Sicherungsanlage im Mai 1995 wurden bis Ende 2019 insgesamt rund elf Mio. m³ Wasser abgereinigt. Dabei wurden insgesamt 2.221,8 kg STV aus dem Grundwasser entfernt. Aus einem weiteren Sanierungsbereich („TRI-Halde“) wurden seit 1984 bis Ende 2019 zusätzliche 4.267 kg STV

durch die hydraulische Sicherung entfernt. Die Trinkwasserversorgung war zu keinem Zeitpunkt gefährdet. Der Zeitbedarf für den kompletten Schadstoffaustrag über Niederschläge und die Grundwasseranierung wird auf mehr als 250 Jahre geschätzt. [8]

3 Innovative („alternative“) Bodenbehandlungsverfahren

Als innovative Methoden für rüstungsspezifische organische Schadstoffparameter werden aktuell die Behandlungsverfahren Bodenwäsche, Immobilisierung (IM) durch Torf oder Kompost und alkalische Hydrolyse (AH) als Sanierungsvarianten vorgeschlagen. Für die beiden letztgenannten Verfahren liegen mittlerweile Anwendungsbeispiele vor. Diese werden in den Kapiteln 3.1 und 3.2 vorgestellt. Die Verfahren gelten als mögliche Alternativen zu den vorgenannten konventionellen Verfahren, da sie relativ kostengünstig sind und aufgrund der erreichbaren Schadstoffminderung in der Regel die Wiederverwertung des Bodens vor Ort ermöglichen.

Anwendungsbeispiele Immobilisierung:

- 1) **Ehem. Luftmunitionsanstalt Lengler (Nds.) / Sprengplatz:**
Kampfmittelräumung und Sanierung mittels Kompost. [9][10]
- 2) **Ehem. Sprengplatz Marktbergel (BY):**
Vorversuche für die Sanierung des Sprengplatzes Marktbergel – Immobilisierung von sprengstoffbelasteten Böden mittels Kompost (2012) [11][12][13]
- 3) **Ehem. Sprengplatz Boxbrunn (BY):**
Kampfmittelräumung und Sanierung mittels STV-Immobilisierung durch lageweisen Komposteinbau. [14]
- 4) **Ehem. Sprengplatz Rattelsdorf (BY):**
Kampfmittelräumung und Sanierung mittels STV-Immobilisierung durch lageweisen Komposteinbau. [15]
- 5) **Ehem. Sprengplatz am Silbersee, Langenhagen (Nds.):**
Kampfmittelräumung und Wiedereinbau des Bodens auf einer Drainage- und Kompostschicht. [64]

Anwendungsbeispiele Alkalische Hydrolyse:

- 1) **Ehem. Sprengplatz Marktbergel (BY):**
Temporärer Sprengplatz Marktbergel – Fachtechnische Begleitung des Rückbaus und Vorversuch zur Entgiftung mittels alkalischer Hydrolyse (2014) [16]
- 2) **Ehem. TNT-Werk Thansau (BY):**
Entgiftung von 350 m³ TNT-kontaminierten Bodenhaushubs mittels Alkalischer Hydrolyse (2018). [17]

In den USA wurden seit Beginn der 1990er Jahre durch die US-Army umfangreiche Forschungsarbeiten zu alternativen Behandlungsverfahren STV-belasteter Böden durchgeführt. Erläuterungen hierzu finden sich in Kapitel 4. Drei Verfahren zeigten sich dabei jedoch als besonders effektiv und wurden bereits in konkreten Fällen eingesetzt. Derzeit am häufigsten zum Einsatz kommen neben der standardmäßigen Verbrennung die Kompostierung (Verfahrensprinzip ähnlich der Immobilisierung) sowie die Bodenwäsche (Machbarkeitsstudie *MMR-Übungsplatz in Massachusetts*, siehe Kapitel 3.3) [18]. Die Alkalische Hydrolyse kam in den USA bisher auf dem Standort *Volunteer AAP* im Großmaßstab zur Behandlung von rund 90.000 t Boden zum Einsatz [19]. Auch auf dem *MMR-Übungsplatz* in Massachusetts wurden inzwischen größere Mengen Boden mit diesem Verfahren behandelt [20].

Nach aktuellen Berichten des *US-Army Engineer Research and Development Centers (ERDC)* soll die alkalische Hydrolyse künftig als Standardbehandlungsverfahren für US-Übungseinrichtungen implementiert werden [21]. Dies betrifft Schießbahnen, Handgranatenwurfplätze und etwa 100 Spreng- und Brandplätze, welche die US-Army derzeit betreibt.

Die Behandlung von mit STV belasteten Grundwässern wird in den USA nahezu ausschließlich mittels Aktivkohlebehandlung durchgeführt. Mittlerweile fanden jedoch auch Tests mit alternativen Verfahren statt (z. B. reaktive Wände, Fentons Reagens).

Die nachfolgenden Unterkapitel gehen mit Fallbeispielen auf die Wirkmechanismen der oben genannten Behandlungsverfahren **Immobilisierung**, **Alkalische Hydrolyse** sowie der **Bodenwäsche** ein und zeigen deren Vor- und Nachteile auf.

3.1 Immobilisierung

Unter dem Begriff **Immobilisierung** in Zusammenhang mit STV versteht man die Festlegung der Schadstoffe in der Huminstoffmatrix eines organischen Materials (Humifizierung). Die Wirkweise beruht auf dem Prinzip der Kompostierung (vgl. Forschungsprojekte zu Kompostierung, Kap. 4.1.2: Kompostierung, Bioremediation). Während bei der Kompostierung jedoch die benötigte organische Matrix durch Verrottung erst erzeugt werden muss, wird bei der Immobilisierung organisches, bereits verrottetes Material unter den kontaminierten Boden gemischt bzw. mit diesem in Verbindung gebracht.

Das Wirkprinzip für TNT beruht auf den bei der Reduktion von 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) entstehenden Aminodinitrotoluolen (ADNT: 2-Amino-4,6-Dinitrotoluol / 4-Amino-2,6-Dinitrotoluol) und deren irreversiblen Bindung durch chemische Prozesse an die organische Matrix. In Abb. 4 wird am Beispiel der anaerob/aeroben Kompostierung die Humifizierung von TNT veranschaulicht.

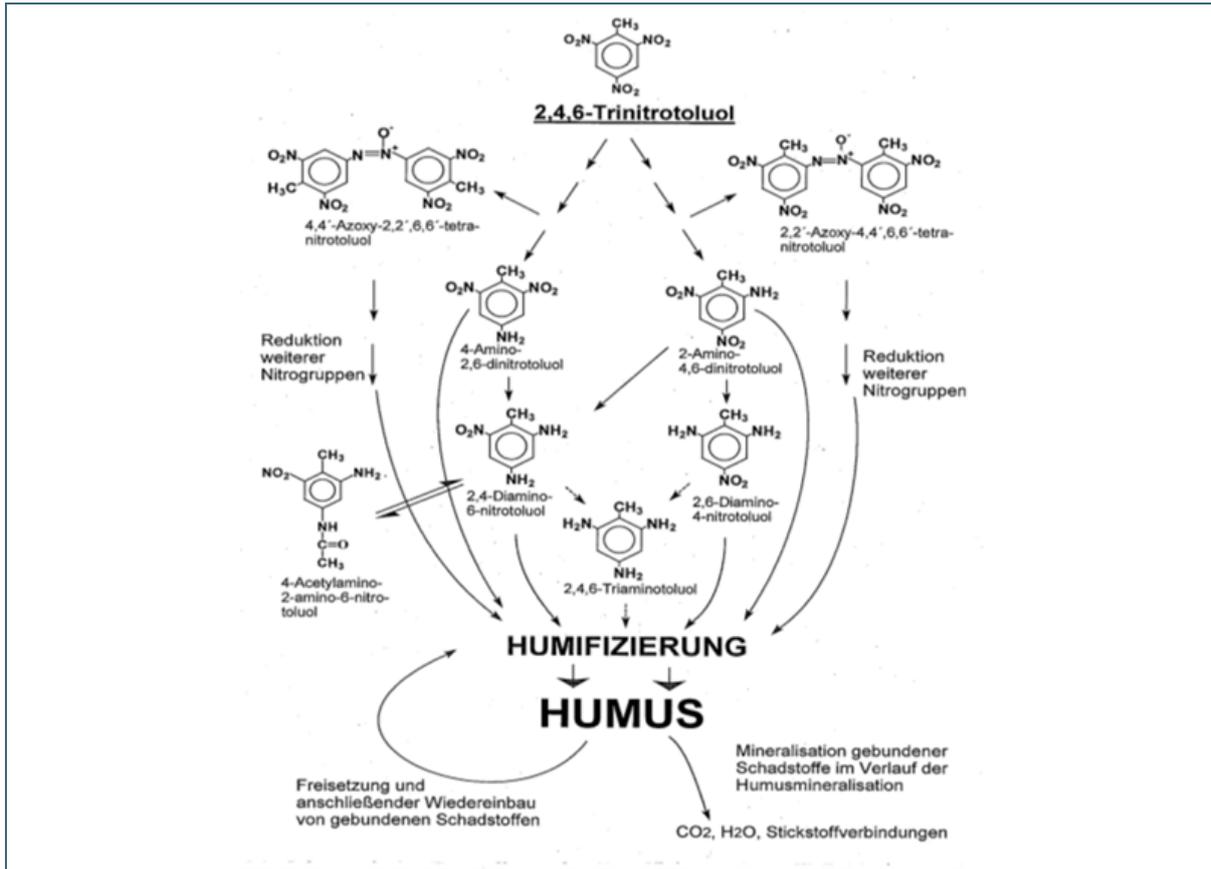


Abb. 4: Humifizierung von TNT, nach [22]

Als **geeignete organische Materialien** haben sich solche mit einem hohen Gehalt an natürlichen organischen Makromolekülen erwiesen (v. a. Huminstoffe: Huminsäuren, Fulvosäuren und Humine aus dem Abbau von Pflanzenresten im Boden). Dies macht Materialien wie z. B. Kompost, Torf oder junge Braunkohle zu idealen Adsorbentien für STV, wobei die Anwendung von Kompost² in Bezug auf ihre Nachhaltigkeit die zu bevorzugende Variante darstellt.

Die Immobilisierung von STV durch die Zugabe von Kompost, Torf oder ähnlichen Substanzen ist durch folgende Prozesseigenschaften gekennzeichnet:

- Erhöhung der Sorptions- bzw. Pufferkapazität des Bodens;
- Verlängerung des Zeitraumes für biotische / abiotische Reduktion von TNT zu ADNT (anaerob);
- Sorption der STV an Huminstoffen;
- Verringerung der mit dem Sickerwasser transportierten STV-Fracht durch Adsorption der STV an Huminstoffe („Festlegung“).

In der ungesättigten Bodenzone laufen reduktive und oxidative Prozesse häufig gleichzeitig ab; ggf. ist zur Beschleunigung der Reduzierung des TNT zu ADNT eine vorgeschaltete Bodenbehandlung unter anaeroben Bedingungen erforderlich. Die in natürlichen Böden partiell vorhandenen anaeroben Bereiche sollten aber meist bereits ausreichen, um TNT in ADNT zu überführen und ADNT anschließend

² In Kompostierungsanlagen werden Komposte mit verschiedenen Rottegraden hergestellt (von Rohkompost über Frischkompost zu Fertigungskompost: Rottegrade I bis V). Bislang können für die Immobilisierung aufgrund fehlender Erfahrungswerte keine Empfehlungen zur Verwendung eines bestimmten Rottegrades oder spezieller Zusammensetzungen gegeben werden. Bei Anwendung der IM muss dies stets im Einzelfall über Voruntersuchungen getestet werden.

irreversibel an die organische Bodenmatrix zu binden. Nach [23] genügt für diesen Vorgang bereits ein Gehalt an organischem Kohlenstoff ($C_{org.}$) von 3 % in der Bodenmatrix.

Problematisch für Hexogen: Der Abbau von Hexogen führt zu den charakteristischen Zwischenprodukte Methylendinitramin (MEDINA) und Nitrodiazabutanal (NDAB). MEDINA ist instabil in Wasser, NDAB wird dagegen nur bei extrem alkalischen (pH 12) bzw. sauren (pH 3) Bedingungen zersetzt. Der Verbleib bzw. der weitere Abbau von NDAB ist bisher nicht geklärt [24].

Mögliche Varianten der Durchführung der Immobilisierung bzw. Humifizierung:

Variante 1

Direkte Beimischung von organischem Material unter den belasteten Boden. Hierzu wird dem STV-kontaminierten Bodenaushub über einen Zwangsmischer organisches Material untergemischt und die Mischung anschließend rückverfüllt.

Variante 2

Aushub der belasteten Bodenmatrix mit anschließender lageweisen Rückverfüllung mit organischem Material.

In Deutschland gibt es zu Immobilisierungsverfahren kaum Untersuchungen. Arbeiten im Rahmen des KORA-Projektes³ haben jedoch gezeigt, dass mit steigendem TOC-Gehalt des Bodens eine zunehmende Immobilisierung von TNT stattfindet, dies führt zu einer Abnahme der mit dem Sickerwasser transportierten TNT-Fracht. Das Landesamt für Umwelt führte außerdem ein Forschungsprojekt zur Langfristwirksamkeit unter anderem der In-situ-Immobilisierung mittels Kompost durch („Alternative Sanierungsverfahren STV-kontaminierter Böden“ - Laufzeit 2015-2018) [25]. Vor allem für die Immobilisierung von STV mittels Kompost lieferte das Projekt positive Ergebnisse. Die Austräge der pulvertypischen Verbindungen Centralit 1 (C1), Diphenylurethan (DPU) und Ethyl-phenylurethan (EPU) konnten durch Kompost zwar deutlich, aber nicht vollständig reduziert werden.

Fallbeispiele zur Anwendung der Immobilisierung

Nr. 1: Lenglern: Ehem. Luftmunitionsanstalt / Sprengplatz: Kampfmittelräumung und Sanierung mittels Kompost [9] [10]

Auf einer Fläche nördlich der ehemaligen *Luftmunitionsanstalt (LMA) Lenglern* (Niedersachsen) befindet sich ein ehemaliger Sprengplatz, auf dem britische Einheiten in den Nachkriegsjahren Lagermunition der LMA vernichteten. Durch die Sprengungen entstanden 30 Sprengtrichter, die jedoch nicht wieder rückverfüllt wurden.

Aufgrund von Kampfmittelfunden erfolgte im Vorlauf zu forstwirtschaftlichen Maßnahmen eine Entmunitionierung der Fläche (einschließlich der Trichter). Das abgeschobene/ausgehobene Material wurde zunächst auf Mieten abgelegt. Die Separation der Kampfmittel erfolgte dann im Zuge der Rückverfüllung der Böden.

Nach entsprechenden Vorarbeiten wurde für den Standort als geeignete und durchzuführende Maßnahme zur Gefahrenabwehr die Immobilisierung mittels Kompost vorgeschlagen. In Vorversuchen mit Standortproben wurde festgestellt, das TNT/ADNT, RDX und PETN durch den verwendeten Kompost bereits nach einer Kontaktzeit von 4 Stunden vollständig zurückgehalten werden und weder mit Wasser noch mit Methanol extrahierbar waren.

³ KORA: „Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Böden und Grundwässer“ - Förderschwerpunkt des BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), Laufzeit 2000–2008. Enthält acht Themenverbände mit dem übergreifenden Thema „Natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen“.

Zum Erreichen der zuvor festgelegten Sanierungsziele für 24.000 m³ Boden wurden in erster Linie folgende Maßnahmen durchgeführt:

Trichtersicherung durch Kompostlagen: Selektiver Wiedereinbau des bei der Kampfmittelräumung ausgekofferten Bodenmaterials in die Trichter. In Abhängigkeit von der Belastung des jeweiligen Haufwerkes erfolgte der Einbau mit oder ohne Zwischenlagen aus Kompost.

Oberflächenwassersanierung durch Kompostrigolen: Fassung des in den Trichterbereichen und in den Einbauflächen des Bodenmaterials aus der Kampfmittelräumung entstehenden (ggf. belasteten) Oberflächenwassers in Absetzgräben mit photolytischer/mikrobiologischer Aktivität und nachgeschalteten Gräben mit Kompost (sog. Rigolen). Endreinigung des Wassers in Wetlands (bepflanzte Kiesfilter) sowie in einem Absetzteich vor Einleitung in den Vorfluter.

Nach Abschluss der genannten Maßnahmen erfolgte ein zunächst zweijähriges Monitoring, jeweils nach intensiven Niederschlägen. Hierfür stehen vier Beweissicherungstrichter mit entsprechenden Beweissicherungsrohren sowie eine Grundwassermessstelle zur Verfügung. Erste Untersuchungen der in den Rigolen und Gräben gefassten Sickerwässer zeigen vereinzelt noch Überschreitungen der vorgegebenen Sanierungszielwerte; im Ablauf zum Vorfluter werden die Zielwerte eingehalten.

Nr. 2: Marktbergel: Immobilisierung von sprengstoffbelasteten Böden mittels lageweisen Komposteinbau in Sprengtrichter

Für die bodenschutzrechtlich erforderliche Sanierung der 40 Sprengtrichter (einschließlich Sprengfeld) auf dem *Sprengplatz Marktbergel* (BY) wurden im Rahmen einer Vorstudie [11] [12] die alkalische Hydrolyse sowie die Immobilisierung mittels Kompost als mögliche Sanierungsverfahren vorgeschlagen. Diese favorisierten Verfahren wurden anschließend im Labormaßstab in verschiedenen Ausführungsvarianten geprüft [13]. Basierend auf den Laborergebnissen und der vor Ort vorliegenden Schadstoffmatrix (überwiegend TNT) wurde für die Immobilisierung der STV der lagenweise Einbau von Kompost angewandt.

Die Sanierung fand im Jahr 2013 im Zuge der Kampfmittelräummaßnahme statt. Hierfür wurde zunächst der relativ gering belastete Oberboden des Sprengfeldes bis 0,3 m u. GOK abgezogen, seitlich gelagert und anschließend über eine Siebanlage mit Magnetabscheider von Munitionsresten und -splittern gereinigt. Anschließend wurden die einzelnen Sprengtrichter durch schichtweisen Aushub des Bodens beräumt und die vorgefundenen Kampfmittel geborgen. Nach Freigabe der geräumten Trichter erfolgte der lagenweise Rück- bzw. Wiedereinbau des zuvor ausgehobenen Trichtermaterials mit Zwischenlagen aus Kompost. Abschließend wurde auch der ursprüngliche Mutterboden auf dem ehemaligen Sprengfeld unter Einmischung von Kompost (zur Sorption ggf. noch vorhandener STV) flächig wieder aufgebracht.

Zur Beweissicherung stehen fünf Grundwassermessstellen und zwei mit Sickerwasserentnahmerohren ausgestattete Beweissicherungstrichter zur Verfügung. Die bisher vorliegenden Grundwasseruntersuchungen lassen noch keine signifikanten Auswirkungen auf die ETV-Belastungen im Grundwasser erkennen. Die Hexogenkonzentrationen bewegen sich nach wie vor im Bereich des Geringfügigkeitsschwellenwertes (1 µg/l), vereinzelt sind auch Aminodinitrobenzoesäuren (TNT-Abbauprodukte) in geringen Konzentrationen nachweisbar.

Der in der ungesättigten Bodenzone angelegte Beweissicherungstrichter weist im Sickerwasser keine sprengstofftypischen Verbindungen auf, jedoch sind hier die pulvertypischen Verbindungen C1, DPU und EPU nachweisbar. Der durch Kompost nur unvollständige Rückhalt dieser Verbindungen wird durch die Erkenntnisse des LfU-STV-Projektes „Alternative Sanierungsverfahren STV-kontaminierter Böden“ verifiziert [25].

In dem in der gesättigten Bodenzone angelegten Beweissicherungstrichter waren neben deutlich erhöhten Hexogenkonzentrationen auch Aminodinitrotoluole (TNT-Abbauprodukte) im Bereich der Geringfügigkeitsschwellenwerte (0,2 µg/l) und C1 nachweisbar. Da hier zumindest in den im Grundwasser liegenden Bodenschichten kein ausreichender Kontakt der mobilisierten ETV mit dem Kompost stattfindet, werden hier deutlich höhere Schadstofffrachten mit dem bzw. ins Grundwasser ausgetragen. Ein signifikanter Einfluss auf die umliegenden Grundwassermessstellen lässt sich jedoch aktuell nicht erkennen.



Abb. 5:
In einem Baggerschurf ist der lageweise Einbau der Kompostschichten zu erkennen (ehem. SP Marktbergel).

Nr. 3: Boxbrunn: Kampfmittelräumung und STV-Sanierung auf einem ehem. US-Sprengplatz [14]

Von Mai 2016 bis Februar 2018 wurde auf dem ehemaligen *US-Sprengplatz Boxbrunn* (BY) eine Kampfmittelräumung durchgeführt. Aufgrund der Nutzungshistorie lag eine schädliche Bodenveränderung durch Explosivstofftypische Verbindungen (ETV) vor. Hauptkontaminanten im Bereich der insgesamt 32 Sprengtrichter waren TNT/ADNT sowie die Pulverzusatzstoffe C1, DPU und EPU. Erhebliche Nachweise der ETV im Sickerwasser einiger Trichter belegten die Mobilität der Schadstoffe, so dass von einer Grundwassergefährdung auszugehen war.

Die erforderliche Sanierung erfolgte mittels Immobilisierung durch Kompost. Ähnlich dem zuvor genannten IM-Anwendungsbeispiel in Marktbergel, wurde auch hier das belastete Bodenmaterial der Sprengtrichter ausgehoben, von Kampfmitteln befreit und anschließend mit Zwischenlagen aus Kompost wieder in die Trichter eingebaut. Zwei Trichter wurden als Beweissicherungstrichter ausgebaut. Hierfür wurden sie mit Probenahmerohren versehen. Das begleitende Monitoring an Sprengtrichtern und Oberflächenwasser wurde im September 2019 abgeschlossen.

Die Ergebnisse zeigen, dass pulvertypische Verbindungen nur unzureichend an Kompost zurückgehalten werden bzw. daraus kontinuierlich und zum Teil in Konzentrationen deutlich über den Geringfügigkeitsschwellenwerten wieder freigesetzt werden können.

Nr. 4: Rattelsdorf: Kampfmittelräumung und Sanierung eines ehem. Sprengplatzes mittels STV-Immobilisierung durch Kompostkontakt [15]

Auf dem ehemaligen *Sprengplatz Rattelsdorf* (BY) nördlich von Bamberg wurde von Mai 2018 bis Oktober 2019 eine Kampfmittelräumung durchgeführt. Bodenschutzrechtliche Untersuchungen hatten außerdem ergeben, dass in den Rückfüllmaterialien der insgesamt 25 Sprengtrichter eine schädliche Bodenveränderung durch STV mit Auswirkungen auf den Wirkungspfad Boden – Grundwasser vorliegt.

Wie in den Beispielen zuvor erfolgte die Sanierung mittels Immobilisierung durch Wiedereinbau des entmunitionierten, STV-kontaminierten Bodenmaterials mit Zwischenschichten aus Kompost. Dabei wurden rund 1.640 Tonnen an Kompost (etwa 66 Tonnen je Trichter) verbaut. In zwei Beweissicherungstrichtern wird der Erfolg der Maßnahme durch die Beprobung von Sickerwasser an der Trichtersohle in einem zweijährigen Monitoring überprüft.

Bereits in den ersten Monitoringergebnissen waren die TNT-Konzentrationen im Vergleich zu den Eluatproben aus dem Rückfüllmaterial von rund 100 µg/l auf unterhalb der Bestimmungsgrenze gesunken. Ähnlich stellt sich die Situation auch bei den übrigen hier relevanten ETV (Hexogen, Dinitrotoluole, Diphenylamin, Dinitroanilin, Aminodinitrobenzoesäure und Centralit 2) dar.

Nr. 5: Langenhagen: Ehemaliger Sprengplatz am Silbersee [64]

Auf dem ehemaligen *Sprengplatz am Silbersee in Langenhagen* (Niedersachsen) kam im Rahmen der Bodensanierung ebenfalls Kompost zur Anwendung. Der Silbersee bei Langenhagen ist ein Bade- und Freizeitsee, an dessen südlichem Ufer ein etwa 4.400 m² großes Areal wegen Rüstungsaltlasten in Folge der ehemaligen Nutzung als Sprengplatz für den Zutritt abgesperrt war. Im Zuge einer Umgestaltung und Vergrößerung des Freizeitgeländes sollte auch der Bereich des ehemaligen Sprengplatzes einer Nutzung zugeführt werden. Für die hierfür im Vorfeld notwendige Sanierung kam – als Ergebnis einer Variantenstudie – der Wiedereinbau des ausgehobenen und entmunitionierten Bodens zur Anwendung. Der Abtrag des Bodens fand bis zur Oberkante des Grundwassers statt. Die Bodenmassen, die für einen Wiedereinbau aufgrund ihrer Schadstoffzusammensetzung nicht geeignet waren, wurden auf einer Deponie entsorgt bzw. in einer Bodenbehandlungsanlage gereinigt. Geeignetes Bodenmaterial wurde auf einer mehrsträngigen Drainage mit überlagernder Sand- und nachfolgender Kompostschicht wieder eingebaut. Der Kompost diente zur Immobilisierung von eventuell mit dem Sickerwasser austretenden STV-Restbelastungen. Die Oberfläche wurde mit einer Grabesperre gesichert und mit unbelastetem Sand bzw. einer Grasnarbe überdeckt.

Fazit Immobilisierung mittels Kompost („IM“)

Bei Sanierungsmaßnahmen auf ETV-kontaminierten Standorten wird durch die in der Regel sanierungsbegleitende Kampfmittelräumung (KMR) ein erheblicher Anteil des makroskopisch greifbaren Emissionspotenzials an Sprengstoffen und Pulvern aus den kontaminierten Flächen entfernt. Nach derzeitigen Kenntnisstand können durch die Kombination „KMR+IM“ die von ETV ausgehenden Gefahren für das Grundwasser deutlich reduziert, im Einzelfall sogar weitgehend beseitigt werden. Da das Verfahren jedoch relativ neu ist (z. B. Sanierung in Marktbergel 2013, anschließendes LfU-Monitoring-Projekt zur Überprüfung der Langfristwirksamkeit (2015 bis 2018) [25]) gibt es bezüglich der Verwendung von Kompost als Immobilisat keine Daten zur langfristigen Wirksamkeit des Verfahrens, welche über einen Zeitraum von fünf Jahren hinausgehen. Damit verbunden sind fehlende Kenntnisse zum dauerhaften chemischen und biologischen Verhalten des Kompostes im Boden. Seine stoffliche Entwicklung im verbauten Zustand und hierdurch induzierte mögliche Freisetzungsprozesse sind aktuell nicht untersucht.

Die Monitoringergebnisse der bisher durchgeführten Sanierungsmaßnahmen sowie Untersuchungen des Landesamtes für Umwelt weisen außerdem darauf hin, dass pulvertypische Verbindungen (z. B. C1, EPU und DPU) durch den Kompost auch nach längerer Kontaktzeit nicht vollständig zurückgehalten, aber zumindest deutlich reduziert werden. Die mögliche Reelution pulvertypischer Verbindungen in signifikanten Konzentrationen sind dabei als möglicher Ausschlussgrund für dieses Verfahren zu berücksichtigen. Ob bei ausreichenden Kontaktzeiten ein Abbau der PTV im Kompost erfolgt und welche Abbauprodukte dabei entstehen ist derzeit noch nicht hinreichend geklärt. Weiterhin sind hinsichtlich der DOC-Einträge in das Grundwasser und die ggf. dadurch verursachten Folgeprozesse (z. B. Freisetzung anorganischer Schadstoffe) noch Fragen offen.

Bezüglich der verfahrenstechnischen Umsetzung fehlen zum einen derzeit noch Vorgaben zu den erforderlichen Vorversuchen, um daraus die optimale verfahrenstechnische Variante am jeweiligen Standort ermitteln zu können. Zum anderen existieren derzeit keine hinreichend detaillierten Vorgaben zur Verfahrensausführung (z. B. notwendige/zulässige Schichtstärken für Kompost bzw. rückverfüllten Boden, Vorgaben zu Verdichtung, Sicherung der Sohl- und Randbereiche), zum Dokumentationsumfang (z. B. lagegenaue Einmessung(GPS), Schichtfolgen und Mächtigkeit) und zum Kontroll- und Überwachungsumfang (z. B. Umfang der Beweissicherung, Dauer des Monitorings).

Je nach Schadstoffzusammensetzung zeichnet sich für die IM ein realistisches Anwendungspotenzial für die Zukunft ab. Eine uneingeschränkte Empfehlung für das Verfahren kann jedoch aufgrund der zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes noch vorhandenen Wissensdefizite von Seiten des LfU nicht ausgesprochen werden. Im begründeten Einzelfall und unter Berücksichtigung der jeweiligen Standortbedingungen und sanierungsrelevanten Parameter ist eine Anwendung unter Auflagen jedoch denkbar. Dazu zählen unter anderem belastbare Vorversuche mit entsprechend positiver Ergebnislage zur Wirksamkeit vor Ort, eine umfassende dauerhafte Überwachung sowie die Erarbeitung einer Rückfalloption. Weiterhin wird eine einschlägige sachverständige Begleitung sowie die Einbindung technisch-wissenschaftlichen Sachverständs dringend empfohlen. Die verfahrenstechnischen Grundlagen und die verfahrenstechnischen Umsetzungsschritte sind im Rahmen der Sanierungsvorbereitung detailliert darzulegen.

3.2 Alkalische Hydrolyse

Unter **Hydrolyse** versteht man im Allgemeinen die Spaltung einer chemischen Verbindung durch Reaktion mit Wasser. Ob die Hydrolyse besser im sauren oder basischem Milieu funktioniert, hängt vom zu spaltenden Ausgangsprodukt ab. Die Hydrolyse von STV findet im stark alkalischen Bereich statt.

Durch Zugabe von z. B. Natronlauge NaOH oder gelöschtem Kalk $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und Wasser wird im Boden ein stark alkalisches Milieu erzeugt, durch welches eine Hydrolyse der Nitroaromaten (z. B. TNT) und Nitramine (z. B. Hexogen) stattfindet. Für eine effektive Wirkung sollte der pH-Wert erfahrungsgemäß mindestens 11 betragen. Hexogen kann mit diesem Verfahren nahezu vollständig mineralisiert werden. Bei TNT findet eine Transformation zu nicht mehr toxischen Verbindungen statt, welche mikrobiologisch abbaubar sind. Die Vorgänge sind stark vom eingestellten pH-Wert und der Temperatur abhängig. Unter Umständen können toxische Kondensationsprodukte entstehen, außerdem erhöht sich die Löslichkeit einiger Schwermetalle im Boden bei pH-Werten > 12 .

Fallbeispiele zur Anwendung der Alkalischen Hydrolyse

Nr. 1: Marktbergel: Sanierung eines temporären Sprengplatzes

Im Rahmen der in Kapitel 3.1 beschriebenen Sanierung des oben bereits erwähnten *Sprengplatzes Marktbergel* (BY) wurde zur Vernichtung der geborgenen, jedoch nicht transportfähigen Munition auf einer naheliegenden Brachfläche ein temporärer Sprengplatz eingerichtet. Zur Sprengung kamen überwiegend Panzergranaten mit insgesamt rund 200 kg Hexogengehalt. Trotz sachgerechter Ausführung der Sprengungen wurden zum Teil sehr hohe Hexogenbelastungen in Bodenproben aus den zum Sprengschutz errichteten Erdwällen („Kernbereich“) sowie in geringerem Ausmaß auch im Umfeld („Peripheriebereich“ = Umkreis zur Sprengstelle bis max. 50 m Radius) festgestellt. TNT und ADNT waren nur im unmittelbaren Sprengbereich und in deutlich geringeren Konzentrationen nachweisbar. Eluatuntersuchungen (Wasser-/Feststoffverhältnis 1:1) ergaben für Hexogen Konzentrationen im Bereich einiger hundert bis einiger zehntausend $\mu\text{g/l}$. Hochgerechnet auf den Gesamtbereich ergab sich eine Rückstandsmenge an Hexogen von etwa 1 kg, dies entspricht einer Rückstandsquote von 0,5 %. Diese Quote lag deutlich über den in der Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen [1] angenommenen Anteil von 0,1 %.

Der erheblich belastete Boden aus dem Kernbereich des temporären Sprengplatzes wurde in einem Umkreis von etwa 20 m um die Sprengstelle oberflächlich abgeschoben (rund 600 m³) und vor Ort in abgedeckten Mieten zwischengelagert. Mit dem insgesamt nur schwach belasteten Boden aus dem Peripheriebereich wurde ebenso verfahren (Materialkubatur rund 1.370 m³).

Im Herbst 2014 wurde der abgeschobene Boden aus dem Kernbereich vor Ort in einem mit HDPE-Folie abgedichteten Becken einer alkalischen Hydrolyse unterzogen. Hierzu wurde das zuvor in Mieten gelagerte kontaminierte Bodenmaterial chargenweise mit insgesamt 20 t pelletiertem Natriumhydroxid (NaOH) in das Becken gefüllt und nach Wasserzugabe mittels eines Baggers homogenisiert. Bereits nach 7 Tagen waren in den entnommenen Proben Hexogen und dessen primären Abbauprodukte (Mononitroso(MNX)-, Dinitroso(DNX)- und Trinitroso(TNX)-derivate) nicht mehr nachweisbar. Eine erneute Beprobung nach insgesamt 2 Wochen Behandlungszeit erbrachte ebenfalls keinen Schadstoffnachweis [26].

Der so behandelte Boden des Kernbereichs wurde mit dem nur gering belasteten, nicht behandlungsbedürftigen Boden aus dem Peripheriebereich vermischt, um den pH-Wert abzusenken und anschließend vor Ort zwischen zwei Kompostlagen flächig wieder eingebaut. Da der Boden beim Wiedereinbau noch erhöhte pH-Werte aufwies, wurden nachfolgend regelmäßige Kontrollen des pH-Wertes im Boden durchgeführt, bis eine dauerhafte Abnahme des pH-Wertes unter 10 nachzuweisen war.

Während eines von 2015 bis 2018 laufenden Forschungsprojektes des LfU [25] wurde der Standort einer Nachuntersuchung unterzogen. Hierzu wurden tiefendifferenzierte Bodenproben entnommen und anhand von Eluat (W/F = 1:1) auf ETV untersucht. Zusätzlich wurde im Schurf zutretendes Grundwasser beprobt. Die Analysen ergaben, dass weder im wiederverfüllten Bereich und in der unterlagernden Bodenschicht noch im dem im Probeschurf zutretenden Grundwasser ETV oder die Hexogenabbauprodukte MNX, DNX und TNX nachweisbar waren.



Abb. 6:
Zugabe von NaOH zum mit RDX kontaminierten Bodenmaterial (ehem. SP Marktbergel, 2014)

Nr. 2: Thansau: Vor-Ort-Sanierung von TNT-belastetem Aushub durch Alkalische Hydrolyse [17]

Während des 1. Weltkriegs wurde am *Standort Thansau* (BY) TNT (2,4,6-Trinitrotoluol) hergestellt; die anfallenden Abwässer wurden über Absetzbecken abgeleitet. Das betroffene Gelände wird bis heute als Produktions- bzw. Industriestandort genutzt. Bei Baumaßnahmen im Jahr 2011 fielen 540 m³ behandlungsbedürftiger, TNT-belasteter Boden an.

Vorversuche zur Anwendung der AH führten bei niedrigen Ausgangskonzentrationen von rund 500 mg TNT/kg zu einem vollständigen Abbau von TNT und DNT. Sehr hohe Ausgangskonzentrationen mit bis zu 50.000 mg TNT/kg ergaben aber zum Teil hohe Restbelastungen an Trinitrophenol (TNP) und

Dinitrophenol (DNP) im behandelten Boden, die auch unter den vorliegenden stark alkalischen Bedingungen nicht weiter abgebaut wurden. Die Ursachen hierfür konnten nicht ermittelt werden. Deshalb wurden etwa 290 m³ extrem hoch kontaminierter Boden einer thermischen Verwertung zugeführt. Die verbliebenen 350 m³ wurden 2018 vor Ort in einem temporären Behandlungsbecken mittels Alkalischer Hydrolyse entgiftet. Die Ausgangsgehalte an TNT lagen bei 235 mg/kg im Feststoff bzw. 56.500 µg/l im Eluat. Nach zwei Wochen waren TNT und Spuren von DNT nur noch im Bereich der Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenzen feststellbar. Die Alkalische Hydrolyse führte zu einer nahezu vollständigen Abreinigung der vorhandenen Nitroaromaten.

Nach Abschluss der Entgiftungsphase wurde das Becken zurückgebaut. Der pH-Wert im sanierten Bodenmaterial wurde durch Zugabe von Schwefelsäure wieder abgesenkt und anschließend mit 80 Tonnen Kompost vermischt, um die TNT- und DNT-Restspuren mittels Immobilisierung an Kompost zu entfernen.

Das anfallende Sickerwasser unterhalb der sanierten Fläche wird von drei Drainagen gefasst und einem Sammelschacht zugeleitet.

Fazit Alkalische Hydrolyse

Die Alkalische Hydrolyse (AH) kann aufgrund der stoffspezifischen Einschränkungen (ungeeignet für Nitropenta und die pulvertypischen Verbindungen C1, DPU und EPU) nicht uneingeschränkt empfohlen werden; sie wird daher eher speziellen Einzelanwendungen vorbehalten bleiben. Zudem kommt es bei der AH durch die starke pH-Wert-Anhebung zu nachteiligen Auswirkungen auf den Boden und die Bodenbiologie, die nachfolgend Maßnahmen zur Anhebung des pH-Wertes sowie zur Wiederherstellung der Bodenfunktion erforderlich machen.

Darüber hinaus ist hier zu berücksichtigen, dass beim alkalischen Hexogen-Abbau – ähnlich wie in aeroben Bereichen auch bei der IM – unter Umständen mit Nitrodiazabutanal (NDAB) die Bildung eines sogenannten „dead-end“-Produktes möglich ist. Zwar wurde für NDAB im Wasser unter extrem alkalischen (pH 12) Bedingungen eine Zersetzung nachgewiesen [24], über dessen Verbleib in mittels AH behandelten Böden liegen jedoch bislang keine Informationen vor.

Anwendungshinweise zur Alkalischen Hydrolyse sind im Kapitel 4.1.10 dargestellt.

Bei Anwendung des Verfahrens im Einzelfall gelten die für die Immobilisierung mittels Kompost getroffenen Aussagen analog.

3.3 Bodenwäsche

Bei Bodenwaschverfahren werden durch Eintrag von mechanischer Energie an Bodenpartikeln anhaftende Schadstoffe abgetrennt. Diese haften fester und anteilig in größeren Mengen an feinkörnigen als an größeren Bodenbestandteilen. Durch die Bodenwäsche werden Schadstoffe demnach überwiegend in die Feinanteile des Bodens und in das Waschwasser verlagert. Diese Aufkonzentrierung im Feinkorn und im Waschwasser führt zu einer Volumenreduktion des weiter zu behandelnden Bodens. Das Verfahren ist nicht grundsätzlich für eine bestimmte Art von Schadstoffen geeignet, sondern von der Art der Schadstoffbindung an Bodenpartikel abhängig. Das schadstoffbelastete Waschwasser sowie der in der Regel hochbelastete Feinkornanteil werden abgetrennt und separat behandelt.⁴

⁴ Weiterführende Informationen zur Bodenwäsche auf den [Seiten des LfU](#) (Aufruf: 30.04.2021)

Die Bodenwäsche kann „on-site“ oder „off-site“ in einer Waschanlage durchgeführt werden, in der Waschbedingungen, Dauer und Intensität des Mischens sowie die Rate des Waschwasseraustausches optimal eingestellt werden können. Der Boden wird dabei durch mechanisches Rühren (z. B. mit einem Schwertmischer) oder Umwälzen mit Wasser vermischt. Durch Zugabe von Grobschotter beim Waschvorgang kann der Abrieb und die mechanische Zerkleinerung der Partikel (z. B. auch Sprengstoffbrocken) erhöht und so die Lösungsrate für ETV optimiert werden. Das Waschwasser muss kontinuierlich ausgetauscht und von der Schwebfracht befreit bzw. von den gelösten ETV gereinigt werden.

Wie bei den meisten Verfahren sind auch bei Anwendung der Bodenwäsche zur Ermittlung der erforderlichen Waschkdauer und Bestimmung der Frequenz des Wasseraustausches Vorversuche unabdingbar [27]. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Lösungsrate temperaturabhängig ist und durch die eingebrachte mechanische Energie, d. h. durch die Mischintensität des Boden-Wasser-Gemisches beeinflusst wird.

Als ein möglicher Nachteil der Bodenwäsche bei ETV-Belastungen ist anzuführen, dass sie bisherigen Erkenntnissen zufolge nur bei gering belasteten Böden und nur als Reinigungsvorstufe geeignet zu sein scheint. Die Hauptmenge des löslichen Schadstoffpotenzials kann durch dieses Verfahren zwar sehr wahrscheinlich aus dem Boden entfernt werden, jedoch ist die Behandlung bei Vorhandensein größerer Sprengstoffbrocken möglicherweise nicht bis zur vollständigen Entfernung der STV durchführbar.

Mikrobiell unterstützte Bodenwäsche

An der *Universität Oldenburg* wurde 1998 eine mikrobiell unterstützte Bodenwäsche entwickelt. Dem Waschwasser wurde unter anaeroben Bedingungen Melasse zugesetzt, um den mikrobiellen Abbau zu stimulieren. Mit dieser Behandlungsweise konnten TNT und seine Reduktionsprodukte zu 98 % aus hoch kontaminierten Böden (2.500 mg/kg TNT) entfernt werden [28]. Die anfallenden Waschwässer müssen einer weitergehenden Behandlung zugeführt werden. Trotz der erfolgreichen Versuche fand eine Umsetzung in die Praxis nicht statt.

Fallbeispiele Bodenwäsche

Nr. 1: Bodenwäsche am MMR Übungsplatz (USA)

Die US-Army begann ab den 90er Jahren mit der Suche nach alternativen Sanierungsverfahren zur Behandlung STV-kontaminierter Böden und Grundwässer. Ausschlaggebend hierfür war ein Deponierungsverbot unbehandelter kontaminierter Böden.

Im Jahr 2000 wurden auf dem Standort *Massachusetts Military Reservation (MMR-Übungsplatz, jetzt: Joint Base Cape Cod / JBCC)* alternative Bodenbehandlungsverfahren untersucht. Um eine Reduzierung der zu behandelnden STV-kontaminierten Bodenmenge zu erreichen, wurde der vorgesehenen Behandlung eine Bodenwäsche vorangestellt [29]. Mit relativ einfacher Technik wurden dort Böden gereinigt, die in geringem Umfang durch Hexogen und Perchlorat kontaminiert waren. Im Ergebnis war festzustellen, dass nach Durchführung der Bodenwäsche als Vorbehandlung keine STV mehr im Boden nachzuweisen waren. Als mögliche Ursache wurde angeführt, dass einzelne Sprengstoffpartikel durch den entstehenden Abrieb während der Nassabsiebung in kleinere Körner aufgebrochen wurden und diese sich schnell im Wasser lösten. Weiterhin wurde angenommen, dass dadurch der Hauptanteil an STV entfernt und ein geringerer Anteil wahrscheinlich erst durch den Waschvorgang befähigt wurde, sich an der organischen Matrix anzulagern. Durch Optimierung des Waschvorgangs konnte das weiter zu behandelnde Bodenvolumen um 75 % bis 95 % (max. bis 98 %) reduziert werden [28] [29]. Weiterführende Informationen und Berichte zum Grundwasser-Forschungsprojekt am Joint Base Cape Cod unter <http://jbcc-iagwsp.org/> (Zugriff am 30.04.2021)

Nr. 2: LHMA Hambüren

4.000 t Boden aus der *Lufthauptmunitionsanstalt (LHMA) Hambüren/Niedersachsen* wurden 1997/1998 mittels Bodenwäsche behandelt. Die Waschrückstände wurden in einer Anlage in den Niederlanden verbrannt. [30]

Nr. 3: In-situ Bodenwäsche (soil flushing) in Stadtallendorf (2011)

Im Zuge der Variantenbetrachtung zur Sanierung der *Rüstungsaltnlast Stadtallendorf/Hessen* wurde im Rahmen eines Pilotversuchs eine kombinierte Bodenbehandlung aus Bodenwäsche, Heißdampf-Filtration und thermischer Behandlung entwickelt. Eine großtechnische Umsetzung erfolgte aufgrund veränderter Rahmenbedingungen sowie aus finanziellen Gründen letztendlich nicht [31, Seiten 166 ff.]. Im Bereich einer ehemaligen Ablagerungshalde des Standorts wurde 2011 eine in-situ Bodenwäsche durchgeführt. Durch Infiltration von Wasser über eine bestehende Gasdrainage wurde belastetes Porenwasser, das mit bis zu 320.000 µg/L an Nitroaromaten kontaminiert war, mobilisiert. Über Brunnen wurde das eingespeiste Wasser zusammen mit dem belasteten Grundwasser wieder abgepumpt und anschließend über Aktivkohle gereinigt. [30]

Fazit Bodenwäsche

- Die Bodenwäsche ist eine relativ kostengünstige Sanierungsvariante, wobei zusätzliche Kosten für die erforderliche Nachbehandlung der Abwässer berücksichtigt werden müssen. Eine Aufkonzentrierung der Waschwässer kann z. B. durch Umkehrosmose oder Nanofiltration erreicht werden.
- Prinzipiell besteht die Möglichkeit, die Bodenwäsche im Vorfeld einer weiterführenden Bodenbehandlung (z. B. Kompostierung, Immobilisierung mittels Kompost) zur Reduzierung der zu behandelnden STV-kontaminierten Bodenmenge durchzuführen oder sie einer Deponierung vorzuschalten.
- Mit Einsatz der Bodenwäsche kann die Schadstoffmenge an ETV in gering belasteten Böden stark reduziert werden. Bei hoch belasteten Böden ist die Reinigungsleistung deutlich geringer.

4 Forschungsprojekte zur Behandlung von STV-Kontaminationen

Die Behandlung von Boden- und Grundwasserverunreinigungen mit sprengstofftypischen Verbindungen ist weltweit bisher hauptsächlich in den USA, in Kanada und Deutschland im Rahmen von Forschungsvorhaben bzw. Sanierungsmaßnahmen untersucht worden. Zahlreiche Projekte wurden zur Entwicklung kostengünstigerer und leistungseffektiverer Verfahren finanziell gefördert. Allerdings sind die Untersuchungsergebnisse der durchgeführten Forschungsvorhaben und Sanierungen nicht in jedem Fall für die Öffentlichkeit zugänglich.

Das deutsche Umweltbundesamt (UBA) beauftragte ab 1990 mehrere Forschungsprojekte zu diesem Thema, die Ergebnisse wurden im Jahr 2003 abschließend in digitaler Form zusammengestellt und können als CD beim UBA angefordert werden. Seither erfolgte keine Datenaktualisierung und die aktive Bearbeitung im Bereich Rüstungsaltposten seitens des UBA wurde eingestellt.

Ein (bundes-)länderübergreifender Erfahrungsaustausch zum Umgang mit STV findet derzeit nur über den Fachausschuss C4 „Rüstungsaltposten und Kampfmittel“ des Ingenieurtechnischen Verbandes für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA) statt. Entsprechende Fachveranstaltungen, z.B. durch die Deutsche Feuerwerker Ausbildungs- und Beratungsgesellschaft mbH (DFAB GmbH), stellen ebenfalls eine Austauschplattform dar.

Hintergrundinformationen zum Umweltverhalten von STV sowie den potenziellen Abbauprodukten können dem Anhang 2.7 der „Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen“ [32] entnommen werden.

► Die bedeutendsten in Deutschland durchgeführten Forschungsprojekte sind nachstehend genannt, die jeweiligen Verfahren werden in den Folgekapiteln ausführlicher beschrieben.

- 1) **1990–1999: MOSAL: „Modellhafte Sanierung von Altlasten“** [31] S. 166–170
 - Untersuchung kombinierte Sanierung Bodenwäsche/Heißdampf/Thermische Reststoffbehandlung
 - Durchgeführt am Beispiel des TNT-Sanierungsprojektes Stadtallendorf / Hessen
- 2) **1996–2000: „Leitfaden Biologische Verfahren zur Bodensanierung“** [22]
 - Großprojekt, 14 wissenschaftliche Einrichtungen und 12 Unternehmen waren an insgesamt 42 Einzelprojekten beteiligt
 - Untersuchung/Erprobung alternativer, biologischer Sanierungsverfahren;
 - Durchgeführt u. a. auf dem Gelände der WASAG in Torgau/Elsnig (Sachsen) sowie am Werk Tanne bei Clausthal-Zellerfeld (Nieders.)
 - TNT-Sanierung mittels: Slurry-Verfahren, Kompostierung bzw. Immobilisierung, Weißfäulepilzverfahren
 - RDX-Sanierung mittels: Pilzen
- 3) **2000–2002: BioRex-Verfahren: „Biologische Low-Cost-Behandlung von sprengstoffkontaminierten Böden“** (IABG) [33] [34]
 - Erprobung eines Kompostierverfahrens
 - Durchgeführt im Zuge der Sanierung Kleinkötz

- 4) **2000–2006: KORA:** Themenverbund 5: „**Natürliche Schadstoffminderung (MNA) bei sprengstofftypischen Verbindungen**“ (IABG, BMBF-Förderschwerpunkt) [23]
 - KORA: „Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden“
 - Durchgeführt in den TNT-Werken Stadtallendorf (KORA-Teilvorhaben MONASTA/2008) und Clausthal Zellerfeld sowie im RDX-Werk Torgau/Elsnig
 - Untersuchung zu natürlichen Schadstoffminderungsprozessen
- 5) **2011: LBEG-Forschungsvorhaben (Nds.):** „Versuche zur Immobilisierung von sprengstoffbelasteten Böden mittels Torf – Sprengplatz Niedersachsen“

► **Auch die US-Army** begann ab den 1990er-Jahren mit der Suche nach alternativen Sanierungsverfahren zur Behandlung STV-kontaminierter Böden und Grundwässer. Ausschlaggebend hierfür war ein Deponierungsverbot für unbehandelte kontaminierte Böden in den USA.

Bedeutende Projekte in den **USA**:

- 1) **MMR: Massachusetts Military Reservation** („MMR-Übungsplatz“, jetzt umbenannt in Joint Base Cape Cod bzw. JBCC)
Im Jahr 2000 sollten auf dem Standort alternative Bodenbehandlungsverfahren untersucht werden. Um eine Reduzierung der zu behandelnden STV-kontaminierten Bodenmenge zu erreichen, wurde der vorgesehenen Behandlung eine Bodenwäsche vorangestellt. Näheres zur Bodenwäsche ist dem Kapitel 3.3 zu entnehmen.
- 2) **ITEP: „Innovative Technology Evaluation Programm“**, Camp Edwards, Massachusetts [35]
In der Machbarkeitsstudie wurden nachfolgend genannte Verfahren unter Vorgabe von Sanierungszielwerten für Hexogen/RDX (0,12 mg/kg) und TNT (0,25 mg/kg) untersucht. Die Sanierung erfolgte dabei in zwei unterschiedlichen Testläufen: Die Verfahren wurden jeweils mit und ohne vorgeschalteter Bodenwäsche durchgeführt.
 - Composting (Kapitel 4.1.2)
 - Festphasensanierung: Solid Phase Bioremediation (Kapitel 4.1.2.4)
 - Niedrigtemperaturverfahren: Low Temperature Thermal Desorption / Destruction (LTTD) (Kapitel 4.1.6)
 - Chemisches Reduktionsverfahren: Chemical Reduction (Kapitel 4.1.7)
 - Chemisches Oxidationsverfahren: Chemical Oxidation (Kapitel 4.1.8).
- 3) **ER1155:** Von 2000 bis 2006 erfolgte im Rahmen des US-Army Großprojektes „ER1155“ die Klärung von Eintragsursachen von STV auf Übungsplätzen [36]. Anschließend begann die Suche nach kostengünstigen Bodenbehandlungsverfahren mit dem vorrangigen Ziel, ein in-situ-Verfahren zu entwickeln, welches sich mit Instandhaltungsmaßnahmen auf Übungseinrichtungen kombinieren lässt. Hierbei erwiesen sich die Immobilisierung [37] [38] und die alkalische Hydrolyse [39] [21] als prinzipiell geeignet.

4.1 Forschungsprojekte Bodenbehandlung

Bisher hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zur Bodenbehandlung bei ETV-Kontaminationen untersuchte Verfahren:

- Slurry-Verfahren (anaerob-aerobes Bodensuspensionsverfahren und Phytoslurry) (Kap. 4.1.1)
- Kompostierung und Bioremediation (Kap. 4.1.2)
- Weißfäulepilzverfahren (Kap. 4.1.3)
- „BioRex“ (Kap. 4.1.4)
- Phytoremediation (Kap. 4.1.5)
- Niedrigtemperaturverfahren – Thermische Desorption (Kap. 4.1.6)
- Chemisches Reduktionsverfahren (Kap. 4.1.7)
- Chemisches Oxidationsverfahren (Kap. 4.1.8)
- Immobilisierung mittels Torf (Kap. 4.1.9)
- Alkalische Hydrolyse (Kap. 4.1.10)
- Monitored Natural Attenuation (Kap. 4.1.11)

In Bezug auf TNT beruhen die meisten der genannten Verfahren auf dem Prinzip der **Humifizierung** der Schadstoffe, also der Festlegung der Metabolite ADNT an die Huminstoffe des organischen Materials in Form nicht-extrahierbarer Rückstände. Aufgrund der Reaktionsschritte wird eine irreversible Fixierung angenommen, ein vollständiger Abbau des Schadstoffs im Boden erfolgt jedoch nicht (siehe auch Abb. 4).

4.1.1 Slurry-Verfahren

Die Bezeichnung „Slurry-Verfahren“ oder „Bioslurry“ bezieht sich auf Verfahren, bei denen die Sanierungsschritte in einer Bodensuspension ablaufen (von engl. „Slurry“ = Suspension). Diesem Boden/Wassergemisch werden Co-Substrate (z. B. Glukose, Saccharose oder Melasse) als Elektronendonatoren und ggf. weitere Nährstoffe zugesetzt.

4.1.1.1 Anaerob-aerobes Bodensuspensionsverfahren

Beim Anaerob-aeroben Bodensuspensionsverfahren (getestet am *Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik*) wurden einer Bodensuspension in der **anaeroben Phase** leicht oxidierbare Kohlenstoffquellen (Glucose oder Saccharose) zugegeben, um eine cometabolische Reduktion der Nitrogruppen der sprengstofftypischen Verbindungen herbei zu führen. Die Fermentationsprodukte wurden in der nachgeschalteten **aeroben Phase** weiter mineralisiert; dabei werden unter anderem reduzierte TNT-Metabolite (z. B. 2,4-Dinitrotoluol/DNT) in die organische Bodenmatrix eingebunden und somit immobilisiert.

- ✓ Schadstoffreduktionen über 99 % bei STV-Hauptkontaminanten TNT, 2,4-DNT und Hexogen möglich.

4.1.1.2 Phytoslurry

Beim Sanierungsverfahren „Phytoslurry“ werden speziell geeignete Pflanzen mit kontaminiertem Grund- bzw. Oberflächenwasser oder mit einer Bodensuspension in einem Behälter **aufgeschlämmt**. Einige Pflanzen, wie z. B. das brasilianische Tausendblatt (*Myriophyllum aquaticum*), echter Spinat (*Spinicia oleracea*) oder der braune Senf (*Brassica juncea*), sind mittels bestimmter Enzyme („Nitroreduktasen“) besonders befähigt, TNT über ADNT zu verschiedenen, größtenteils unbekannten polaren

Metaboliten umzuwandeln. Ein Teil der Transformationsprodukte wird in die Pflanzenmatrix eingelagert, die restlichen Verbindungen bleiben in Lösung. Das langfristige Gefahrenpotenzial der gebundenen Rückstände ist ungeklärt. Eine Mineralisierung wird mittels Phytosurries nicht erreicht und Hexogen ist im Vergleich zu TNT mit diesem Verfahren offensichtlicher schlechter abzureinigen.

! derzeit noch unausgereiftes Verfahren.

! derzeit nicht empfehlenswert.

4.1.2 Kompostierung, Bioremediation

Das grundlegende Verfahrensprinzip besteht darin, dass, ähnlich dem anaerob-aeroben Bodensuspensionsverfahren (Kap. 4.1.1.1), in einer ersten anaeroben Stufe durch die Applikation leicht verwertbarer Substrate eine Reduktion der STV zu reaktiven Zwischenprodukten erfolgt, die sukzessive durch aerobe Verfahrensschritte in der Humusfraktion des Bodens festgelegt werden. Die Nachbehandlung dient zum einen dem biologischen Abbau überschüssiger organischer Verbindungen, zum anderen der Förderung des Humifizierungsprozesses, so dass ein Einbau der Kontaminanten in die im Boden vorhandenen Huminstoffe stattfindet.

4.1.2.1 Anaerob-aerobes Kompostierungsverfahren (Fa. Umweltschutz Nord)

Mit diesem Verfahren sollte am Standort des ehemaligen Sprengstoffwerkes „Werk-Tanne“ in Clausthal-Zellerfeld (Nieders.) die humifizierende Dekontamination sprengstoffbelasteter Böden in einem anaerob/aerob-Verfahren getestet werden. Durch Zugabe leicht verwertbarer Substrate erfolgt eine Reduktion sprengstofftypischer Verbindungen und durch den aeroben Verfahrensschritt die sukzessive Festlegung der reaktiven Zwischenprodukte in der Huminstofffraktion des Bodens. Die Erprobung sollte

- a. zeigen, für welche Bereiche die Verfahren anwendbar sind,
- b. die Wirtschaftlichkeit der biologischen Verfahren nachweisen sowie
- c. die Qualität der Verfahren in Bezug auf Prozessführung und Endprodukt (hier: der gereinigte Boden) ermitteln (in Verbindung mit einer zentralen Erfolgskontrolle).

Durch die eingesetzte Aufbereitungstechnologie wurden im Boden vorhandene Schadstoffaggregate, welche nur begrenzt über die Oberfläche einem biologischen Abbau zugänglich sind, mechanisch zerstört. Ziel der weiteren Großversuche war es, durch die Reduktion des Substrateinsatzes eine unter ökonomischen Gesichtspunkten noch effizientere Verfahrensführung zu ermöglichen. Auch durch einen von 36 Gew.% auf 16 Gew.% reduzierten Substratanteil konnten, mit vergleichbarer Schadstoffabbaukinetik, Endwerte von < 5 mg Nitroaromaten/kg TS erreicht werden [22]. TNT konnte bis unter die Nachweisgrenze abgereinigt werden. Die verbleibenden Nährstoffgehalte können die weitere Verwendung des Bodenmaterials erschweren und ggf. eine längere Nachreifedauer des behandelten Bodens erforderlich machen [40].

4.1.2.2 Dynamisches Beet-/Mietenverfahren (Fa. Plambeck ContraCon)

Ziel des Vorhabens war die maßstabsgerechte Erprobung des von der Plambeck ContraCon GmbH gemeinsam mit der Universität Marburg entwickelten anaerob/aeroben „dynamischen Mietenverfahren zur Immobilisierung von Nitroaromaten“ am Standort „Werk-Tanne“.

Die Konzentration des organischen Substrats war während der vorangegangenen Verfahrensentwicklung minimiert worden, um die bodenphysikalischen Eigenschaften möglichst wenig zu verändern und somit die Verwertungsmöglichkeiten des behandelten Bodens nicht einzuschränken. Im Rahmen der Bodenbehandlung konnte die Konzentration des dominanten Schadstoffes Trinitrotoluol im Boden um

99,9 % gesenkt werden; nachweisbare Nebenprodukte entstanden nicht. Es kann von einer Bodendetoxifizierung durch Humifizierung gesprochen werden [22]. Untersuchungen zur Nachhaltigkeit der Schadstofffestlegung deuten auf eine ausgeprägte Stabilität der gebildeten Produkte hin [40].

- ✓ Senkung der TNT-Konzentration im Boden um 99,9 %.

4.1.2.3 Untersuchung zu Composting (USA, Fa. BSI Environmental, Inc.)

Das Kompostierungsverfahren am Standort *Massachusetts Military Reservation (MMR)* wurde mit gewaschenen und ungewaschenen kontaminierten Böden in Behandlungsreaktoren durchgeführt. Mittels Nährstoffzugabe (organische Substanz: z. B. Cranberry-Maische oder Hackschnitzel) wurde die Vermehrung der ursprünglich vorhandenen Bodenorganismen, die befähigt sind STV umzusetzen und abzubauen, angeregt [35]. Das Mischungsverhältnis von Boden zu organischer Substanz betrug 30 % zu 70 %. Die Verweilzeit von gewaschenem Boden betrug zwölf Tage, die des ungewaschenen Bodens 45 Tage.

- ✓ Erfolgreiche TNT-Reduktion bei gewaschenen Böden.
- ! Nicht erfolgreich bei ungewaschenen Böden.
- ! für Hexogen wurden der Sanierungszielwert (0,12 mg/kg) nicht erreicht.

4.1.2.4 Festphasensanierung – Solid Phase Bioremediation (USA, Fa. Grace, Canada, Inc.)

Im Innovative Technology Evaluation Programm (ITEP) zur Überprüfung geeigneter Sanierungsverfahren für Kontaminationen am *MMR-Übungsplatz in Massachusetts* wurde die Festphasensanierung im Labormaßstab getestet. Dem gewaschenen als auch dem ungewaschenen kontaminierten Boden wurde das Produkt DARAMEND®⁵ (pflanzlicher Zusatzstoff in Form von zerkleinertem Pflanzenmaterial) in der Größenordnung von 2 % zugesetzt. Mittels dieses organischen Nährstoffzusatzes wurde die Sauerstoffzehrung im Boden verstärkt, wodurch sich schließlich anoxische Bedingungen einstellen. Ferner erfolgte die Zugabe von 0,2 % Eisenpulver und Calciumoxid zur Optimierung von Redoxpotenzial und pH-Wert [41]. Hierbei lagerte der kontaminierte Boden in Mieten, die mit Plastikfolie abgedeckt, jedoch nicht durchmischt wurden.

- ! Bei der Festphasensanierung war kein Reaktionsweg feststellbar, der zu einer Mineralisierung des TNT führen könnte. Eine Minderung der ETV im Boden bis unter die Sanierungszielwerte konnte in einem von zwei ähnlichen Experimenten festgestellt werden.
- ! Die Festphasensanierung kann als Teilbehandlungsschritt nach einer Bodenwäsche angewandt werden [41].

4.1.3 Weißfäulepilzverfahren (DE, Fa. AWIA Umwelt)

Das Weißfäulepilzverfahren zeichnet sich durch besonders bodenschonende Sanierungseigenschaften aus; dem Boden werden nur geringe Mengen an Fremdsupstrat zugegeben und die Temperatur erhöht sich während der Behandlung nur kurzfristig.

Das Verfahren wurde am Rüstungsaltsstandort „*Werk Tanne*“ in *Clausthal-Zellerfeld* durch die Firma AWIA Umwelt (ehem. WISSTRANS Umwelt) getestet. Ziel war es, mit Hilfe des Weißfäulepilzes *Stropharia Rugosoannulata* das Gefährdungspotenzial von TNT durch eine möglichst vollständige Mineralisierung im Boden zu reduzieren. Die Ergebnisauswertung des Projektversuchs ergab, dass sich ab TNT-Konzentrationen von 2 g/kg toxische Effekte auf den eingesetzten Weißfäulepilz ergeben und

⁵ DARAMEND®: Produkt der Fa. PeroxyChem (USA)

dass die Mineralisierung im Boden durch dieses Verfahren vernachlässigbar gering ist. Die aerobe Behandlung führte jedoch zu einer Immobilisierung des mit ^{14}C markierten TNT⁶, wobei 86 % der ^{14}C -Aktivität in Form nicht-extrahierbarer Rückstände im Boden gebunden wurden. Eine Mineralisierung erfolgte nur zu 2–3 % [42].

- ✓ Keine Remobilisierung der Schadstoffe
- ! Nur geringe Schadstoffmineralisierung.

Kombination aus Kompostierungs- und Weißfäulepilzverfahren (DE, Fa. WISSTRANS Umwelt GmbH) [40]

In einem weiteren Versuch wurde ein einstufiges Mietenverfahren für den biologischen Abbau von Amino- und Nitroaromaten mit Hilfe von Pilzen getestet. Die technischen Arbeitsziele des Projektes waren:

- a. die Anzucht der Pilze in großen Mengen,
- b. das Homogenisieren des Bodens,
- c. die Einarbeitung des Pilz-/Stroh-Substrates in den Boden,
- d. sowie die Belüftung und Bewässerung großer Bodenmengen.

Ein wesentlicher Bestandteil des Projektes war die umfassende analytische Kontrolle des Sanierungsverlaufes mit chemischen und ökotoxikologischen Methoden. Es konnte gezeigt werden, dass durch ein aerobes Pilzverfahren die STV-Gehalte bis auf niedrige Restkonzentrationen reduziert werden können. Begleituntersuchungen belegen die Einbindung der metabolisierten STV in das Bodenmaterial [40], eine Remobilisierung erfolgt auch unter worst-case-Bedingungen nur in sehr geringem Ausmaß [42].

- ✓ Besonders bodenschonend: Die Qualitätsverbesserung des kontaminierten Bodens durch die Behandlung mit Weißfäulepilzen wurde durch verschiedene ökotoxikologische Testmethoden bestätigt.

4.1.4 „BioREx“: Biologische Low-Cost-Behandlung von sprengstoffkontaminierten Böden

In diesem F&E-Vorhaben wurde ein biologisches „low-cost“-Sanierungsverfahren zur Reinigung von gering bis mittel mit Sprengstoffen kontaminierten Böden entwickelt und in einer Machbarkeitsstudie auf dem Standort der *ehemaligen Luftwaffenmunitionsanstalt Kleinkötz* durchgeführt.

Das Verfahrensprinzip beruht auf der Induzierung des anaeroben STV-Abbaus durch die Aktivierung eines in Bodenorganismen (Bodenpilze, aerobe Bakterien) natürlich vorkommenden Enzymkomplexes. Hierzu werden die Milieubedingungen im Boden durch Zugabe einer Nährstofflösung (Stickstoffverbindungen und ggf. Spurenelemente) auf eine für die Enzyymbildung optimale Zusammensetzung eingestellt. Wenn nötig wird zur Aufrechterhaltung des anaeroben STV-Abbaus eine Kohlenstoffquelle (z. B. Dextrose) zugegeben. Während der nachfolgenden aeroben Phase (herbeigeführt durch Durchmischung, z. B. mittels Bodenfräse) findet die Schadstoffumwandlung zu Aminosäuren, Zellsubstanz und Kohlendioxid durch autochthone Mikroorganismen statt.

⁶ ^{14}C -Markierung: Isotopenmarkierung – Gezielter Einbau eines stabilen oder radioaktiven Isotopes (z. B. ^{14}C im Austausch zu ^{12}C) in organische oder anorganische Moleküle zur Nachverfolgung bestimmter Reaktionsabläufe und -mechanismen.

Die sehr inhomogene Schadstoffverteilung der STV im Boden führte im Hinblick auf Probenahme und Analytik zu erheblichen Problemen. Aufgrund der geringen zeitlichen und örtlichen Dichte des Probenahmerasters waren nur statistisch nicht eindeutig abgesicherte Aussagen möglich.

- ✓ Im Zeitraum der Versuche mittels Enzymaktivierung wurde eine Stoffumwandlung der beiden Substanzen TNT und Hexogen zu weniger toxischen Metaboliten festgestellt [33] [34]
- ! Eine Mineralisierung von TNT und Hexogen konnte hingegen wissenschaftlich nicht belegt werden.

4.1.5 Phytoremediation

Im Rahmen des KORA-Projekts „*Natürliche Schadstoffminderung bei sprengstofftypischen Verbindungen*“ [23] wurden neben der Klärung analytischer Fragestellungen auch Untersuchungen zur Aufnahme von TNT und Hexogen in krautigen Pflanzen sowie in Laub- und Nadelgehölzen durchgeführt.

Die Phytoremediation beruht auf Wechselwirkungen zwischen Pflanzen, Sonnenlicht, Bakterien und Sediment. Pflanzen sind zu einer schnellen Akkumulation und Umwandlung von TNT befähigt, allerdings können durch den Umwandlungsprozess unbekannte toxische Metabolite gebildet werden, die in der Pflanze verbleiben. Infolgedessen können Schadsymptome an Pflanzen hervorgerufen werden. Weiterhin ist zu beachten, dass keine Mineralisierung des TNT erzielt wird.

Bei den Untersuchungen zur STV-Aufnahme in krautige Pflanzen sowie in Laub- und Nadelgehölzen wurde festgestellt, dass sich Nadelgehölze gegenüber STV am tolerantesten zeigten. Sie sind befähigt, erhebliche Mengen an STV aufzunehmen und in Abhängigkeit von der Art der STV in verschiedenen Pflanzenteilen zu akkumulieren.

Hexogen wird von Pflanzen vergleichsweise langsamer aufgenommen als TNT und zu polaren und unbekanntem Verbindungen abgebaut, die ebenfalls in der Pflanze verbleiben. Hierbei ist die Entstehung von toxischen Metaboliten nicht auszuschließen und deren Verbleib in der Pflanze noch ungeklärt. Die Mineralisierung von Hexogen ist gering.

- ! Das Sanierungsverfahren der Phytoremediation ist aufgrund problematischer Funktionsweise, ungeklärter STV-Eliminierung und dem Ausbleiben der Entgiftung für die Sanierung STV-kontaminierter Wässer und Böden bisher nicht geeignet.

Zusätzlich zu den oben genannten Untersuchungen wurde die Phytoremediation durch ¹⁴C-TNT-Aufnahme durch Gehölze außerdem im Rahmen des Forschungsverbundes „*Biologische Verfahren zur Bodensanierung*“ – Verbundvorhaben 3 „*Biologische Sanierung von Rüstungsaltslasten*“ [43] untersucht (Teilvorhaben 3.6: *Freilandversuche zur TNT-Dekontamination und [¹⁴C]-TNT-Aufnahme durch Gehölze*). Innerhalb des Projektes wurden bodenschonende und biologische Sanierungstechniken erarbeitet. Hauptziel war es, das Phytoremediationspotenzial für sprengstofftypische Verbindungen bei Bäumen zu untersuchen (Dendromediation). Der Freilandnachweis der Dendromediation erfolgte bei allen getesteten Gehölzen durch Bioindikation des Wachstums und chemisches Sickerwasser-Monitoring. Im Ergebnis gelang in Laub- und Nadelgehölzen der Nachweis der vollständigen [¹⁴C]-TNT-Inkorporation bzw. TNT-Metabolisierung zu bisher unbekanntem Metaboliten.

4.1.6 Niedrigtemperaturverfahren – Thermische Desorption

Dieses Verfahren wurde auf dem Übungsplatz der Massachusetts Military Reservation unter dem Titel „*Low Temperature Thermal Desorption / Destruction (LTTD) – TerraTherm*“ erforscht. Bei der thermischen Desorption wurden gewaschene und ungewaschene kontaminierte Böden jeweils langsam auf

die Temperaturstufen 200 °C, 250 °C und 350 °C erhitzt und für 24 Stunden bei der jeweiligen Temperatur belassen. Die Schadstoffe wurden entweder thermisch zersetzt oder in die Gasphase überführt und abgesaugt [35].

- ✓ Die thermische Desorption erwies sich bei gewaschenen als auch ungewaschenen Böden bei Temperaturen ≥ 250 °C als wirkungsvoll, da eine effektive Abnahme der Schadstoffkonzentrationen nachgewiesen werden konnte.

4.1.7 Chemisches Reduktionsverfahren

Beim chemischen Reduktionsverfahren wurden dem gewaschenen kontaminierten Boden (Boden-Wasser-Gemisch) null-wertiges Eisen, Essigsäure und Aluminiumsulfat-Lösung in der Summe von 5 % hinzugefügt [41]. Durch die Oxidation von Eisen und die Freisetzung von Wasserstoff wird eine Reduktion der organischen Stoffe erreicht. Die Zugabe von Eisen und Aluminiumsulfat erwies sich als besonders wirksam. Inwiefern eine Mineralisierung stattfand, wird im Bericht nicht beschrieben. Das chemische Reduktionsverfahren sowie das nachfolgend beschriebene Oxidationsverfahren wurden auf dem Übungsplatz der Massachusetts Military Reservation durchgeführt.

- ✓ Mittels „Chemischer Reduktion“ konnten die Zielwerte bei zuvor mittels Bodenwäsche behandelten Böden erreicht werden.

4.1.8 Chemisches Oxidationsverfahren

Beim chemischen Oxidationsverfahren wurden dem gewaschenen kontaminierten Boden *Fentons Reagents* (1–4 % Wasserstoffperoxid sowie Eisensulfat) zugesetzt. In diesem Fall wirkt Sauerstoff als Oxidationsmittel für die organischen (Schad-)Stoffe.

- ! Mittels „Chemischer Oxidation“ konnten die Zielwerte auch bei vorbehandelten (gewaschenen) Böden nicht erreicht werden.

4.1.9 Immobilisierung von sprengstoffbelasteten Böden mittels Torf

Die Verwendung von Torf als Adsorptionsmaterial wurde in Deutschland bisher nur in Vorversuchen an einem **Sprengplatz in Niedersachsen** geprüft. Die Ergebnisse der 2011 durchgeführten Versuche zeigen, dass im vorliegenden Fall durch eine vollständige Vermischung des Bodens mit Torf ein besserer STV-Rückhalt erzielt werden konnte als durch einen lagenweisen Einbau des Torfs [44].

4.1.10 Alkalische Hydrolyse

Die alkalische Hydrolyse wird bereits seit etwa 2001 in den USA intensiv auf ihre Anwendbarkeit zur Reinigung sprengstoffbelasteter Böden geprüft. Sie soll dort künftig zur Behandlung von STV-belasteten Böden von Sprengstoffwerken, Schießbahnen und Sprengplätzen eingesetzt werden, eine entsprechende Arbeitshilfe liegt vor [45].

Das Verfahrensprinzip beruht auf der Anhebung des pH-Werts im Boden in den stark alkalischen Bereich und der damit verbundenen chemischen Zerstörung der Sprengstoffe. Der Fokus der alkalischen Hydrolyse lag bisher auf der Sanierung von TNT und Hexogen; eine Klärung der Abbauege war trotz intensiver Forschung bisher noch nicht möglich.

Zur pH-Wert-Anhebung wird dem kontaminierten Bodenaushub gelöschter Kalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) oder Natronlauge (NaOH) zugegeben und das Gemenge anschließend dosiert bewässert und durchmischt. Effektive Abbauraten wurden bei einem pH-Wert von $> 11,5$ festgestellt. Der Kalkbedarf ist abhängig von der lokalen Bodenzusammensetzung. Entsprechend der oben genannten Arbeitshilfe [45] ist mit einem durchschnittlichen Kalkbedarf von etwa 1 % bezüglich der zu behandelnden Bodenmenge zu rechnen. Bei erhöhten Temperaturen (60 °C bzw. 80 °C) wurden für TNT akzeptable Abbauraten auch

bei geringeren pH-Werten beobachtet. Mikrobiologische Abbauprobungen mit wässrigen Hydrolysaten ergaben in diesem Fall zudem keine Hinweise auf toxische Wirkungen der entstandenen Abbauprodukte. [46]

Bei Anwendung der AH ist Folgendes zu beachten:

- Bei pH-Werten < 10,5 kombiniert mit Normaltemperatur (20 °C) besteht die Gefahr, dass bei ADNT keine Ringspaltung stattfindet und dass aus TNT verschiedene Kondensationsprodukte entstehen, die möglicherweise toxisch sind und mikrobiologisch nicht weiter abgebaut werden können.
 - pH-Werte > 12,5 führen möglicherweise zu einer erhöhten Löslichkeit einiger Schwermetalle.
 - In trockenen/austrocknenden Böden gehen die Abbauraten deutlich zurück.
 - Nach der Behandlung des Bodens muss der pH-Wert ggf. durch Zugabe von Neutralisationschemikalien wieder in den ursprünglichen pH-Bereich überführt werden, um die Bodenfunktionalität wiederherzustellen.
 - Für mit PETN (Nitropenta) oder pulvertypischen Verbindungen (z. B. Diphenylharnstoffderivate: Centralite und Akardite) verunreinigte Böden ist das Verfahren nicht geeignet [13]. Laborversuche lassen vermuten, dass diese Verbindungen im alkalischen Bereich sogar verstärkt freigesetzt werden.
- ✓ Durch die alkalische Hydrolyse wird Hexogen weitgehend mineralisiert.
 - ✓ TNT wird zu kleineren, nicht mehr toxischen Verbindungen transformiert, welche zum Teil mikrobiologisch weiter abbaubar sind.
- ! Nicht geeignet für mit PETN (Nitropenta) oder pulvertypischen Verbindungen (z.B. Diphenylharnstoffderivate: Centralite und Akardite) belastete Böden.

4.1.11 Monitored Natural Attenuation

Im Rahmen des KORA-Themenverbundes 5 „Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei sprengstofftypischen Verbindungen“ [23] wurden am Standort Stadtallendorf in Hessen Untersuchungen zur Effektivität von NA-Prozessen durchgeführt. Von Vorteil bei NA-Prozessen ist dabei der Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden, da die STV in erster Linie daran gebunden werden. Dadurch werden Transportvorgänge verlangsamt und die Verweilzeiten in der biologisch aktiven Bodenzone werden erhöht.

Über einen Zeitraum von fünf Jahren wurde der natürliche Rückhalt und Abbau von Nitroaromaten am Standort mittels Batch- und Säulenversuche sowohl in der ungesättigten als auch in der gesättigten Bodenzone eingehend untersucht. Aufgrund des geringen Humusgehalts in der ungesättigten Bodenzone ist die Rückhaltekapazität des Bodens an diesem Standort gering. Die Mächtigkeit dieser Zone beträgt allerdings bis zu 50 Meter, sodass ein erhebliches Volumen an anorganischer Matrix und Porenraum für die Retardation zur Verfügung steht.

Für Mononitrotoluole konnten Minderungseffekte in relevanten Größenordnungen und für Dinitrotoluole in geringer Form nachgewiesen werden. TNT wurden bis zu 20 % in Aminodinitrotoluole (ADNT) umgewandelt. Polare STV wie die 2,4-Dinitrobenzoesäure und 2,6-Dinitrobenzoesäure erwiesen sich als persistent; konzentrationsmindernde Effekte ergaben sich nur durch Verdünnung (Dispersion). Die

für den Rüstungsstandort Stadtallendorf durchgeführten Untersuchungen zum natürlichen Rückhalt und Abbau von Nitroaromaten und die daraus abgeleiteten Handlungskonzepte sind in einem Abschlussbericht veröffentlicht. [47]

Vergleichbare Untersuchungen wurden auch am ehemaligen Rüstungsstandort *Clausthal-Zellerfeld* zum Rückhalt von TNT in belasteten Oberböden und am Standort *Torgau/Elsnig (Sachsen)* zum Rückhalt von Nitroaromaten und Hexogen in der gesättigten Zone durchgeführt.

4.2 Forschungsprojekte Behandlung wässriger Phasen

Zur Reinigung STV-kontaminierter Grund- und Oberflächenwässer wurden bisher folgende Sanierungsverfahren untersucht:

- Constructed Wetland (Kap. 4.2.1)
- Adsorption an Aktivkohle und RGS-Polymere (Kap. 4.2.2)
- Photochemischer Abbau: Photolyse und UV-Oxidation (Kap. 4.2.3)
- Chemische Reduktion (Kap. 4.2.4)
- Chemische Oxidation (Kap. 4.2.5)
- Hexogen-Abbau durch Pilze (Kap. 4.2.6)

4.2.1 Constructed Wetland

Als Constructed Wetlands werden einfach zu errichtende und mit relativ geringem Aufwand zu unterhaltende passive Behandlungssysteme zur biologischen Wasserreinigung bezeichnet. Die Sanierung STV-kontaminierter Grund- und Oberflächenwässer mittels Constructed Wetland wird seit 2002 auf einem Übungssprengplatz des *Truppenübungsplatzes Wildflecken* angewandt [48]. Durch den Einsatz des Constructed Wetland konnte eine deutliche STV-Abbauleistung in den gesammelten Sickerwässern nachgewiesen werden. Am *Truppenübungsplatz Grafenwöhr* kommt das Verfahren ebenfalls zum Einsatz.

In den oben genannten Fällen fließt das belastete Wasser zunächst über eine mit reaktivem Eisen gefüllte Behandlungseinheit. An der Eisenoberfläche findet eine abiotische Reduktion der Nitrogruppen statt. Anschließend wird das so vorbehandelte Wasser einem offenen Becken zugeführt, welches mit sandig-kiesigem Substrat befüllt und mit Sumpfpflanzen bepflanzt ist (Filterwirkung). Die reduzierten Nitroaromaten werden während der horizontalen Durchströmung dieses Filters an die organische Matrix der Bepflanzung gebunden und können dort ggf. weiter metabolisiert werden. Hexogen wird zum einen durch die Reaktion mit Eisen aus der Wasserphase entfernt [49] bzw. unter reduzierenden Bedingungen zum Großteil mineralisiert [50]. Für die am Umwandlungsprozess beteiligten Mikroorganismen ist die kontinuierliche Zugabe von Nährstoffen (z.B. Melasse) erforderlich, da in den Constructed Wetlands Verbindungen wie z. B. TNT und Hexogen nur cometabolisch⁷ abgebaut werden. Durch die Kombination von chemischer Reduktion und mikrobiologischer Transformation findet ein effektiver Rückhalt der STV statt. In Abb. 7 ist der funktionelle Aufbau eines Constructed Wetland dargestellt.

⁷ *Cometabolismus*: mikrobieller Abbau von Substanzen, die selbst nicht als Kohlenstoff- oder Energiequelle für das mikrobielle Wachstum verwertbar sind und mit Hilfe eines Wachstumssubstrats umgesetzt werden (primär zur Wachstumsermöglichung der Mikroorganismen).

Die hydraulische Verweilzeit im Constructed Wetland kann in Abhängigkeit der vorliegenden STV-Belastung über das hydraulische Gefälle gesteuert werden.

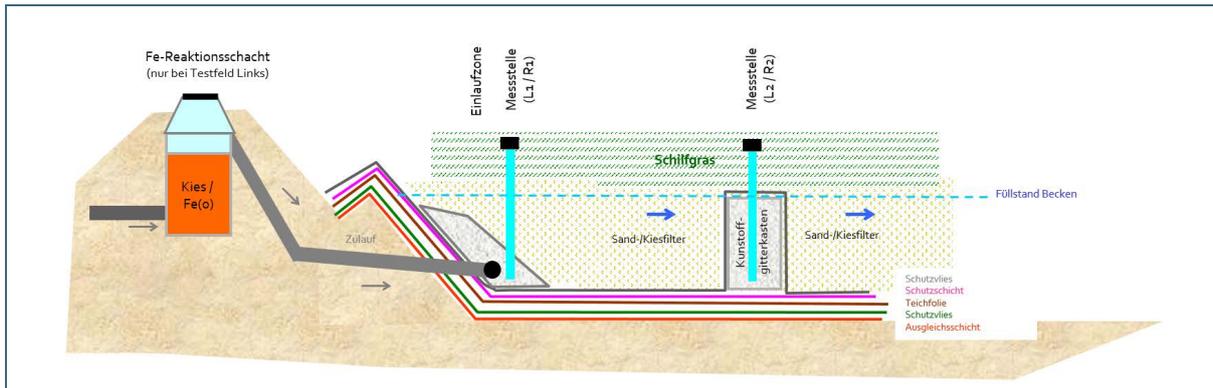


Abb. 7: Funktioneller Aufbau einer Wasserreinigungsanlage "Constructed Wetland".

- ✓ Aufgrund der bisher vorliegenden Erfahrungen ist festzustellen, dass Constructed Wetlands nachweislich zur Behandlung von mit STV belasteten Wasser geeignet ist.
- ✓ Hydrogeologische Randbedingungen sind für den erfolgreichen Einsatz des Verfahrens ausschlaggebend und im Vorfeld zu prüfen.

Nach einer ähnlichen Anordnung können STV-kontaminierte Grundwässer auch mittels einer durchlässigen reaktiven Wand, die mit nullwertigem Eisen befüllt ist, behandelt werden (siehe Chemisches Reduktionsverfahren in Kapitel 4.1.7).

4.2.2 STV-Entfernung mittels Adsorptionsmaterialien

Ein weiteres Verfahren zur Reinigung STV-kontaminierter Grund- und Oberflächenwässer ist der Einsatz von Adsorptionsmaterialien, an welche die STV gebunden werden. Als Adsorption bezeichnet man die Anreicherung von Stoffen aus Fluiden an der Oberfläche eines Festkörpers (=Adsorbens bzw. Adsorbtionsmittel). Die Reinigungsleistung steigt mit Zunahme der Grenzfläche zwischen Fluid und Adsorbens. Als Adsorbentien eignen sich deshalb vor allem stark poröse Feststoffe: Kohlenstoffhaltige Adsorbentien sind z. B. Aktivkoks oder Aktivkohle. Letztere werden im folgenden Unterkapitel behandelt. Darüber hinaus gibt es Oxidische Adsorbentien (z. B. Aktivtonerden, Kieselgele), Polymeradsorbentien, Mischsorbentien (z. B. Mischung aus Kalkhydrat und Aktivkoks) und Metallorganische Gerüstverbindungen (bisher keine nennenswerte technische Anwendung). Die Oberfläche kann teilweise mehr als tausend Quadratmeter pro Gramm betragen.

4.2.2.1 Aktivkohle

Aktivkohle bezeichnet hochporösen, feinkörnigen Kohlenstoff (Kohlenstoffanteil meist > 90 %). Die Einsatzform zur Verwendung als Adsorptionsmittel ist granuliert oder gepresst in Tablettenform. Die offenporigen Hohlräume sind wie ein Schwamm miteinander verbunden, die innere Oberfläche beträgt zwischen 300 und 2.000 m²/g Kohle. Vier Gramm Aktivkohle können damit eine Oberfläche von der Größe eines Fußballfeldes erlangen. [51]

Bei den meisten Aktivkohlen werden kleinere Moleküle bevorzugt adsorbiert. Deshalb werden bei mit TNT und Hexogen kontaminierten Grund- und Oberflächenwässer zunächst beide Verbindungen adsorbiert, mit zunehmender Belegung der Sorptionsplätze geht jedoch die Adsorption des schwächer bindenden Hexogens zurück und es wird schließlich vom TNT verdrängt (Konkurrenzeffekte).

Im Aktivkohlefilter bildet sich bei längeren Standzeiten ein biologischer Belag (Biofilm) aus, der für den biologischen Abbauprozess sorbierter STV verantwortlich ist. Die Mikroorganismen gelangen mit dem geförderten Grund- bzw. Oberflächenwässern auf die Aktivkohle [47]. Die Umwandlungsprozesse der an Aktivkohle sorbierten STV haben zur Folge, dass gebildete Metabolite wahrscheinlich von anderen STV verdrängt werden und somit das System verlassen können. Der bakterielle Abbau von TNT führt teilweise zu unbekanntem Verbindungen. Inwieweit eine Sorption dieser Metabolite an Biomasse erfolgt, wurde bisher noch nicht wissenschaftlich untersucht.

Nach der STV-Beladung wird die Aktivkohle in der Regel auf thermischen Weg in zentralen Großanlagen „regeneriert“. Weite Transportwege sowie die Rauchgas- und CO₂-Emission in den entsprechenden Anlagen führen zu einer Verschlechterung der Umweltbilanz.

Zur Thematik wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens Untersuchungen zur Regenerierbarkeit von Faseraktivkohle-Adsorbentien durchgeführt [52].

Faseraktivkohle (ACF) zeigt im Vergleich zu herkömmlichen Aktivkohlen höhere Beladungskapazitäten und weist außerdem eine schnellere Adsorptionskinetik bei gleichzeitig guter Durchströmbarkeit auf. Diese Eigenschaften machen sie zwar sehr effektiv in der Reinigung von TNT-belastetem Grundwasser, aber auch teurer als andere Aktivkohlen. Gleichzeitig können sie aber auch zu erheblichen Kosteneinsparungen führen, da sie erheblich kleiner zu dimensionieren sind. In einem Vorgängerprojekt wurde ein chemisches Regenerationsverfahren entwickelt, das sich direkt vor Ort (in-situ) anwenden lässt. Dabei werden die Schadstoffe mit Natronlauge von der Aktivkohle desorbiert und anschließend die Aktivkohle mit Salzsäure wieder aufnahmefähig gemacht. Die ursprünglichen Adsorptionseigenschaften sollen damit wiederhergestellt werden können.

Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Regeneration von ACF-Adsorbentien vergleichbar ist mit der Regeneration von granulierter Aktivkohle. Allerdings ist nach der ersten Regeneration eine erhebliche Kapazitätsverringering zu beobachten, die in weiteren Zyklen jedoch stagniert. Die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit des ACF-Adsorbentien-Einsatzes sollte anhand der Adsorptionsleistung des mindestens einmalig regenerierten ACF erfolgen.

In der Arbeitshilfe „Grundwasserkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen im Land Brandenburg“ [53] sind mehrere Fallbeispiele zur Sanierung von STV-belasteten Grundwässern mit Aktivkohlen beschrieben.

4.2.2.2 RGS-Polymere

Auch Polymere mit **R**äumlich **G**lobulärer **S**truktur („RGS-Polymere“) wurden bereits erfolgreich zur Reinigung STV-kontaminierter Wässer getestet [54] [55]. Diese Polymere weisen ein räumlich sehr durchlässiges Gerüst auf, wodurch eine bis zu 400-mal schnellere Adsorption und Desorption im Vergleich zu gekörnter Aktivkohle ermöglicht wird. Deshalb können mit RGS-Polymeren auch deutlich größere Wassermengen in vergleichbarer Zeit gereinigt werden. Die Adsorption von STV an RGS-Polymere ist zwar in der Summe geringer als bei Verwendung von Aktivkohle, allerdings können die RGS-Polymere relativ einfach und mit geringen Lösemittelmengen regeneriert werden. Die eluierten STV können anschließend z. B. in einem kombinierten aeroben/anaeroben mikrobiologischen Prozess abgebaut werden [56].

- ✓ Zuverlässige Abreinigung von Nitroaromaten mit RGS-Polymeren möglich.
- ✓ Einfache Regeneration und Wiederverwertung der verwendeten Polymere.
- ! Für Hexogen kein ausreichender Rückhalt.

- ! Konkurrierende Adsorption: die Aufnahmekapazität der RGS-Polymere für TNT bei Mehrstoffgemischen ist deutlich niedriger als bei TNT als Einzelkontaminante.

4.2.3 Photochemischer Abbau

4.2.3.1 Photolyse

STV unterliegen bei Einfluss von Sonnenlicht einem abiotischen Umbau; die ermittelten Halbwertszeiten liegen im Bereich von Stunden bis Tagen. Hinsichtlich des Parameters Hexogen findet eine Mineralisierung statt, wobei keine toxischen Abbauprodukte gebildet werden. Bei der TNT-Photolyse hingegen entsteht Trinitrobenzol (TNB) als Endprodukt, das eine hohe Umwelttoxizität aufweist. Insofern ist der photolytische Abbau des TNT nicht mit einer Entgiftung verknüpft.

- ✓ Hexogenabbau im Sinne einer Mineralisierung findet ohne Bildung toxischer Abbauprodukte statt.
- ! Sofern eine Mischkombination aus TNT und Hexogen im Boden vorliegt, ist die Photolyse nur in Kombination mit einer zweiten Prozesswasserbehandlung denkbar, um so TNT bzw. das umwelttoxische TNB entsprechend eliminieren zu können.

4.2.3.2 UV-Oxidation

Das Verfahren UV-Oxidation STV-kontaminierter Grund- und Oberflächenwässer beruht auf dem Zusammenwirken von photolytischem Abbau mittels UV-Licht und chemischer Oxidation. Da reines UV-Licht energiereicher als normales Sonnenlicht ist, werden höhere Umbauraten erzielt.

Im Leitfaden „Biologische Verfahren zur Bodensanierung“ [22] werden folgende prinzipiellen Ansätze genannt:

- UV / Fe(III)-Prozess (Bestrahlung mit UV-Licht unter Zugabe von Eisen-(III)-Oxid)
- UV / H₂O₂-Prozess (Bestrahlung mit UV-Licht unter Zugabe von Wasserstoffperoxid)
- Photo-Fenton-Prozess (Bestrahlung mit UV-Licht unter Zugabe von H₂O₂ und Fe(III))
- Ferrioxalat-Prozess (Bestrahlung mit UV-Licht unter Zugabe von H₂O₂ und Fe(III)/Oxalat)

Im Gegensatz zu biologischen Verfahren ist durch den photochemischen Abbau eine Mineralisierung von TNT und vermutlich auch von Hexogen erzielbar. Jedoch besteht mit diesen Verfahren – wie auch bei der Photolyse durch Sonnenlicht – die Gefahr der Anreicherung von Trinitrobenzol (TNB).

- ✓ Die vorgestellten Verfahren zum photochemischen Abbau von STV sind (z. B. in Kombination mit der Bodenwäsche) als potenziell geeignet anzusehen. Da ein hoher Grad an Mineralisierung erreicht werden kann, wird das Verfahren als nachhaltig eingeschätzt. Die Anwendung bei einer großtechnischen Sanierung ist bisher jedoch nicht bekannt. [28]

4.2.4 Chemische Reduktion

Ähnlich wie bei chlorierten Kohlenwasserstoffen hinlänglich bekannt, werden auch TNT und Hexogen in wässrigen Lösungen, in Bodenextrakten und in Bodenschlämmen binnen kurzer Zeit nahezu vollständig abiotisch reduziert, sofern eine Zugabe von Reduktionsmitteln wie Zink oder Eisen erfolgt. Die kosteneffektive Reinigung des Grundwassers von STV mittels einer mit nullwertigem Eisen gefüllten reaktiven Wand wurde in den USA auf der Cornhusker Army Ammunition Plant (CAAP) im Rahmen eines zweijährigen Pilotversuchs erfolgreich demonstriert [57]. Einschränkungen des Verfahrens können sich jedoch durch Grundwasserinhaltsstoffe ergeben, die die Eisenoberfläche inaktivieren (z. B. hohe Gehalte an Sauerstoff, Nitrat oder Sulfat) oder Stoffe, die zu Verblockungen führen.

- ! In Deutschland wurde das Verfahren der chemischen Reduktion durch Zink oder Eisen bisher nicht angewandt und ist aufgrund mangelnder Erfahrung derzeit nicht zu empfehlen.

Eine chemische Reduktion von STV ist auch durch organische Bestandteile im Aquifer möglich. Im Rahmen des Environmental Security Technology Certification Program wurde erstmals im Pilotmaßstab eine reaktive Wand aus Rindenmulch untersucht (ESTCP ER-0426) [58]. Auf dem Pueblo Chemical Depot in Colorado kam zur Behandlung einer Hexogen- und Oktogen-Schadstofffahne eine 30 m breite und 60 cm dicke Wand aus Pinienrindenmulch zum Einsatz. Durch die Freisetzung von gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) aus dem Rindenmulch ins Grundwasser wird die reaktive Zone über die Mulchwand hinaus erweitert.

Der Schadstoffabbau am Standort wurde über ein engmaschiges Netz an Grundwassermessstellen eingehend untersucht. Die reaktive Wand und die Reduktionszone nach der Wand führten nach Einstellung eines stationären Zustandes zu einem Hexogenabbau von mehr als 93 %, Oktogen wurde zu mindestens 90 % reduziert; eine Anreicherung toxischer Zwischenprodukte wurde nicht beobachtet. In einer begrenzten Zone nach der reaktiven Wand wurden erhöhte Eisen- und Arsenkonzentrationen ermittelt, die jedoch im weiteren Abstrom rasch auf das Ausgangsniveau vor der reaktiven Wand zurückgingen. [58]

4.2.5 Chemische Oxidation

Standort „WASAG Sythen in Haltern Am See“ [53]

Im Rahmen der Altlastenbearbeitung in den 1990er-Jahren wurde an diesem Standort eine erhebliche STV-Belastung sowohl des Bodens als auch des Grundwassers nachgewiesen. Die Bodenbelastungen wurden durch die Sanierungsmaßnahmen Auskoffern und Offsite-Entsorgung behandelt. Weitere Maßnahmen, wie z. B. die Sicherung durch Oberflächenabdichtung, wurden so durchgeführt, dass eine weitere Auswaschung ins Grundwasser verhindert wurde bzw. wird.

Für die erforderliche hydraulische Sicherung sollte ein kostengünstiges Behandlungsverfahren vorschaltet werden, um große Wassermengen mit vergleichsweise geringen Belastungen kostengünstig aufzubereiten.

Mittel der Wahl sollte die chemische Oxidation werden. In Laborversuchen wurden folgende chemischen Oxidationsmittel getestet:

- Ozon (O_3)
- Wasserstoffperoxid (H_2O_2)
- FENTONS-Reagenz: H_2O_2 mit $Fe(II)$
- Varianten der FENTON-Reaktion
- Calciumperoxid (CaO_2).

Auf Grundlage der Ergebnisse der Oxidations-Laborversuche wurde eine On-site-Anlage zur Ozonierung des geförderten Wassers im Technikumsmaßstab installiert. Sie ist für eine Aufbereitung von maximal etwa 4 m³ Wasser pro Stunde ausgelegt. Mit dieser Aufbereitungsanlage wird ein Versuchsbetrieb gefahren, bei dem unterschiedlich belastete Wässer in unterschiedlichen Verdünnungsstufen unter variablen Randbedingungen untersucht werden. Die aus den Vorversuchen favorisierte Technik des In-situ-Ozoneintrags soll am Standort zur Anwendung kommen. Bislang wurde Grundwasser mit vorrangiger Dinitrobenzol- und Dinitronaphthalinbelastung behandelt. Die Ergebnisse des ersten Technikeinsatzes ergaben Reinigungsgrade bis 70 %. [53] [59]

Leverkusen-Schlebusch [60]

Der Standort *Leverkusen-Schlebusch* (Nordrhein-Westfalen) war als Sprengstofffabrik von 1887 bis 1926 in Betrieb.

Im Untersuchungszeitraum 1990 bis 2001 wurden Boden- und Grundwasserbelastungen durch STV festgestellt (v. a. TNT/ADNT). Für die Erkundung und Bewertung der Grundwasserbelastung wurden im Laufe der Jahre insgesamt rd. 60 Grundwassermessstellen errichtet. Die Bodensanierung wurde Ende der 1990er Jahre begonnen und im Jahr 2001 abgeschlossen. Eine Grundwassersanierung mittels Ozonierung bzw. UV-/H₂O₂-Behandlung war lange in Planung, wurde jedoch aus Kostengründen nicht realisiert. Stattdessen soll eine turnusmäßige GW-Überwachung erfolgen.

4.2.6 Einsatz von Pilzen zur Reinigung von Hexogen-kontaminierten Wässern

Im Rahmen des Gesamtprojekts „Biologische Sanierung von Rüstungsaltslasten“ wurde auch der STV-Abbau mit Pilzen in Grund- und Oberflächenwasser untersucht [61]. Am Modellstandort, der ehemaligen Sprengstofffabrik der Westfälisch-Anhaltinischen Sprengstoff AG (WASAG), Werk Elsning (Sachsen) wurden während des 2. Weltkriegs erhebliche Mengen an TNT, Hexyl und Hexogen produziert. Durch die Produktion und eine unsachgemäße Abwasserversickerung kam es zu massiven Kontaminationen des Grundwassers mit Hexogen, Hexyl und anderen STV. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Eignung bestimmter Pilzstämmen für einen effektiven Abbau Hexogen- und Hexyl-belasteter Wässer untersucht. Durch die Einstellung optimaler Wachstumsbedingungen (z.B. durch Vorkultivierung des Pilzes) konnte ein erfolgreicher Abbau sprengstofftypischer Verbindungen und eine Entgiftung kontaminierter Grund- und Oberflächenwässer erreicht werden. Anhand der ermittelten Verfahrensgrundlagen wurde ein Ablaufschema für ein Verfahren zur Behandlung kontaminierter Wässer entworfen [62].

5 Tabellarische Zusammenfassung der Verfahrensergebnisse

5.1 Zusammenfassung und Ergebnisse bisheriger Forschungsvorhaben

Die Ergebnisse zur Nachhaltigkeit bzw. zur Möglichkeit der STV-Mineralisierung der in diesem Bericht behandelten Verfahren und der damit verbundenen Empfehlungswürdigkeit sind in den nachfolgenden Tabellen 1 und 2 zusammengefasst.

In den vorgestellten Studien erwiesen sich in Bezug auf eine Mineralisierung von TNT als auch RDX im Bereich der Bodenbehandlung das *anaerob-aerobe Bodensuspensionsverfahren*, das *anaerob-aerobe Kompostierungsverfahren* sowie das *Niedrigtemperaturverfahren* am erfolgreichsten. Mit diesen drei Verfahren konnten beide Schadstoffgruppen parallel eliminiert werden. Nicht zu empfehlen ist die chemische Oxidation und Reduktion im Bodenbereich (keine Erfolge) sowie die Phytoremediation (toxische Metabolite, Schadstoffsymptome im Pflanzenbereich).

Tab. 1: STV-Behandlung von Böden: Zusammenstellung der beschriebenen Forschungsvorhaben.

Tab. 1 Teil 1: **Slurry**. Matrix: Bodensuspension. Angestrebte Wirkweise des Verfahrens: Einbau und Immobilisierung reduzierter Metabolite in die organische Bodenmatrix.

SLURRY-VERFAHREN	Ergebnis für TNT / ADNT	Ergebnis für RDX
Slurry: Anaerob/Aerob	Schadstoffreduktion über 99 % möglich	Schadstoffreduktion über 99 % möglich
Phytoslurry	Verfahren noch unausgereift	Verfahren noch unausgereift

Tab. 1 Teil 2: **Kompostierung**. Matrix: Mischung Boden / Organische Substanz; teilw. Zusatzstoffe. Angestrebte Wirkweise des Verfahrens: Irreversibler Einbau der STV bzw. STV-Metabolite in die organische Bodenmatrix.

KOMPOSTIERUNGSVERFAHREN	Ergebnis für TNT / ADNT	Ergebnis für RDX
Kompostierung: Anaerob/Aerob	Abreinigung bis unter Nachweisgrenze möglich	unbekannt
Beet-/Mietenverfahren	Schadstoffreduktion über 99 % möglich	unbekannt
Composting	Schadstoffreduktion möglich	Sanierungszielwerte wurden nicht erreicht
Festphasensanierung	Kein relevanter Reaktionsweg feststellbar	Unbekannt

Tab. 1 Teil 3: **Weißfäulepilze**. Matrix: Boden; Mikroorganismen. Angestrebte Wirkweise des Verfahrens: Mineralisierung

WEIßFÄULE-VERFAHREN	Ergebnis für TNT / ADNT	Ergebnis für RDX
Weißfäulepilzverfahren	TNT-Immobilisierung möglich, Mineralisierung vernachlässigbar gering	unbekannt
Kombination Kompostierung/ Weißfäulepilze	Reduzierung bis auf niedrige Restkonzentration möglich	unbekannt

Tab. 1 Teil 4: **Sonstige Verfahren**.

ANGEWANDTES VERFAHREN	Ergebnis für TNT / ADNT	Ergebnis für RDX	Angestrebte Wirkweise des Verfahrens
BioREX <u>Matrix:</u> Boden; Mikroorganismen		– Stoffumwandlung zu weniger toxischen Metaboliten	Stoffumwandlung zu weniger toxischen Metaboliten
PHYTOREMEDIATION <u>Matrix:</u> Grund- und Sickerwasser, Böden	– Schnelle Akkumulation in Pflanzen, – toxische Metabolite, – Schadsymptome an Pflanzen möglich, – keine Mineralisierung	– Langsame RDX-Aufnahme, – toxische Metabolite, – geringe Mineralisierung	Aufnahme und Verbleib (Akkumulation) von STV in krautigen Pflanzen, Laub- und Nadelgehölzen
NIEDRIGTEMPERATUR-VERFAHREN <u>Matrix:</u> gewaschene und ungewaschene, kontaminierte Böden	Schadstoffeliminierung möglich	Schadstoffeliminierung möglich	– Thermische Zersetzung der STV – Austrag über Gasphase
CHEMISCHE REDUKTION <u>Matrix:</u> gewaschener Boden	nicht im erforderlichen Umfang möglich	nicht im erforderlichen Umfang möglich	Vollständige Reduktion der organischen Stoffe

Fortsetzung Tabelle 1 Teil 4: **Sonstige Verfahren.**

ANGEWANDTES VERFAHREN	Ergebnis für TNT / ADNT	Ergebnis für RDX	Angestrebte Wirkweise des Verfahrens
CHEMISCHE OXIDATION <u>Matrix:</u> gewaschener Boden	nicht im erforderlichen Umfang möglich	nicht im erforderlichen Umfang möglich	Vollständige Oxidation der organischen Stoffe
ALKALISCHE HYDROLYSE <u>Matrix:</u> Bodensuspension	Eliminierung möglich, aber Abbauewege noch ungeklärt	Eliminierung möglich, aber Abbauewege noch ungeklärt; evtl. NDAB als „dead-end-Produkt“	chemischen Zerstörung der STV

Im Bereich der Behandlung wässriger Phasen kann derzeit das *Constructed Wetland* als mögliches Verfahren angesehen werden, mit dem ein Abbau beider Schadstoffgruppen möglich ist. Auch durch chemische Reduktion wässriger Phasen ist eine Eliminierung von Nitroaromaten und RDX möglich. Die reduzierten Verbindungen werden durch verschiedene Folgereaktionen aus dem Grundwasser entfernt.

RDX konnte außerdem mittels Photolyse und UV-Oxidation ohne Bildung toxischer Metabolite mineralisiert werden. TNT wird im photochemischen Abbauprozess allerdings zum toxischen Endprodukt Trinitrobenzol (TNB) umgewandelt.

Tab. 2: STV-Behandlung von wässrigen Phasen: Zusammenstellung der beschriebenen Forschungsvorhaben.

 Tab. 2 Teil 1: **Constructed Wetland**

CONSTRUCTED WETLAND	Ergebnis für TNT / ADNT	Ergebnis für RDX	Angestrebte Wirkweise des Verfahrens
Constructed Wetland	deutliche Reduktion	deutliche Reduktion	<ul style="list-style-type: none"> – Bindung von reduzierten Nitroaromaten an org. Matrix – Entfernung von STV aus der Wasserphase – Mineralisierung

 Tab. 2 Teil 2: **Adsorptionsverfahren**

ADSORPTION AN ...	Ergebnis für TNT / ADNT	Ergebnis für RDX	Angestrebte Wirkweise des Verfahrens
Aktivkohle	Adsorption erfolgt	Adsorption erfolgt	Adsorption an Aktivkohle, ggf. mikrobieller Abbau von STV im Biofilm der Aktivkohle
RGS-Polymere	Adsorption möglich, Nachbehandlung der Regenerate erforderlich	Adsorption möglich, Nachbehandlung der Regenerate erforderlich	Adsorption an RGS

 Tab. 2 Teil 3: **Photochemischer Abbau**

PHOTOCHEMISCHER ABBAU DURCH...	Ergebnis für TNT / ADNT	Ergebnis für RDX	Angestrebte Wirkweise des Verfahrens
Photolyse	Keine Mineralisierung; toxisches Endprodukt Trinitrobenzol (TNB)	Mineralisierung ohne toxische Metabolite	Abiotischer STV-Umbau durch Sonnenlicht, Mineralisierung
UV-Oxidation	Mineralisierung möglich, jedoch Gefahr der TNB-Anreicherung	Mineralisierung ohne toxische Metabolite	Photolytischer Abbau mittels UV-Licht; Chemische Oxidation

 Tab. 2 Teil 4: **Chemische Reduktion**

CHEMISCHE REDUKTION DURCH ...	Ergebnis für TNT / ADNT	Ergebnis für RDX	Angestrebte Wirkweise des Verfahrens
Nullwertiges Eisen	Reduktion zu Aminoverbindungen und Entfernung aus dem Grundwasser über verschiedene Reaktionswege	Reduktion und Abbau	Elimination von Nitroaromaten und Hexogen
Rindenmulch	X	Reduktion über 93 % möglich; Freisetzung von gelösten organischen Kohlenstoff (DOC)	Herstellung einer reaktiven Zone zum STV-Rückhalt

 Tab. 2 Teil 5: **Chemische Oxidation**

CHEMISCHE OXIDATION	Ergebnis für TNT / ADNT	Ergebnis für RDX	Angestrebte Wirkweise des Verfahrens
Chemische Oxidation	Abreinigung der Dinitrobenzol- und Dinitronaphthalinbelastung bis zu 70 % möglich	Abreinigung der Dinitrobenzol- und Dinitronaphthalinbelastung bis zu 70 % möglich	Oxidation und Abbau der STV

5.2 Zusammenfassung bisher angewandter Sanierungsverfahren

Bisher kamen aufgrund ihrer einfachen, relativ kostengünstigen und effektiven Einsetzbarkeit die in nachfolgender Tabelle 3 genannten Verfahren zur Anwendung. Zur besseren Vergleichbarkeit sind hier die wichtigsten Angaben zu den jeweiligen Verfahren zusammengestellt.

Tab. 3: STV-Behandlung von Böden und wässrigen Phasen: Bewertung potenzieller Sanierungsverfahren.
Hier: **Sicherungsverfahren – Boden u. Grundwasser.**

Verfahren	Wirkweise	Bewertung	Hinweise
Oberflächenabdichtung	Vermeidung von a) <u>Oberflächenwasserzutritt</u> und b) <u>Schadstoffaustrag</u> mit dem Sickerwasser in das Grundwasser	Einsatzfähig	Nachteil: Schadstoffpotenzial im abgedichteten Bereich bleibt langfristig erhalten.
Basisabdichtung mit passiver Auslaugung	Schadstoffaustrag durch passive Auswaschung über Niederschläge und Sickerwasser	Einsatzfähig	Sammlung und Reinigung des kontaminierten Sickerwassers erforderlich.
Hydraulische Sicherung	Förderung und Reinigung des kontaminierten Grundwassers	Einsatzfähig	Nachteil: Dauer der Maßnahme schwer abschätzbar (abhängig vom Standort).

Tab. 4: STV-Behandlung von Böden und wässrigen Phasen: Bewertung potentieller Sanierungsverfahren.
Hier: **Konventionelle Sanierungsverfahren – Boden.**

Verfahren	Wirkweise	Bewertung	Hinweise
Deponierung	Verlagerung der Schadstoffe aus dem Schadensbereich in ein abgesichertes System	Einsatzfähig	Vergleichsweise teuer; ggf. Vorbehandlung notwendig.
Verbrennung	Zerstörung der Schadstoffe	Einsatzfähig	Vergleichsweise teuer; Bodenverlust durch Vernichtung des Bodenmaterials; Rauchgasreinigungsrückstände.

Tab. 5: STV-Behandlung von Böden und wässrigen Phasen: Bewertung potenzieller Sanierungsverfahren.
Hier: **Alternative Sanierungsverfahren – Boden.**

Verfahren	Wirkweise	Bewertung	Hinweise
Kompostierung	Abbau und Festlegung der Schadstoffe in der Huminstoffmatrix	(+) Anwendbar und nachhaltig für TNT; (-) Bedingt einsatzfähig für RDX.	<u>Vorversuche erforderlich;</u> Erhebliche Volumenmehrung
Immobilisierung durch Kompost (Humifizierung)	Abbau und Festlegung der Schadstoffe in der Huminstoffmatrix	(+) Anwendbar für Nitroaromaten und Hexogen, (-) nur eingeschränkt geeignet für pulvertypische Verbindungen (z. B. Centralite, Urethane).	<u>Vorversuche erforderlich</u>
Bodenwäsche	Entfernung der Schadstoffe aus dem Boden	(+) Anwendbar bei geringen STV-Belastungen.	<u>Vorversuche erforderlich;</u> bei hohen STV-Belastungen ggf. Kombination mit anderen Verfahren erforderlich; Überführung der STV in die Wasserphase, Nachbehandlung der wässrigen Phase erforderlich
Alkalische Hydrolyse	Zerstörung der Schadstoffe	(+) Anwendbar für Nitroaromaten und Hexogen, (-) nicht geeignet für PETN und pulvertypische Verbindungen (z. B. Centralite, Urethane).	<u>Vorversuche erforderlich;</u> Nachbehandlung des Bodens zur Anpassung des pH-Wertes erforderlich

6 Erkenntnisse und Empfehlungen

Zur **Behandlung von Bodenkontaminationen** mit ETV weisen neben den konventionellen Sanierungsmaßnahmen insbesondere die Verfahren

- Immobilisierung (IM),
- Alkalische Hydrolyse (AH) und
- Bodenwäsche

nach dem derzeitigen Kenntnisstand ein realistisches Anwendungspotenzial auf. Eine Sanierung mittels Bodenwäsche kommt grundsätzlich in Betracht, sofern die Schadstoffe nicht in zu hohen Konzentrationen oder in größeren Partikeln im Boden vorliegen. Die anfallenden Waschwässer müssen einer weitergehenden Behandlung zugeführt werden.

Die beiden erstgenannten Verfahren wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes des LfU näher betrachtet [25] („STV-Projekt“). Dabei ergaben sich vor allem für die Immobilisierung von sprengstofftypischen Verbindungen mittels Kompost positive Ansätze. Die Austräge der untersuchten pulvertypischen Verbindungen C1, DPU und EPU können jedoch auch nach längerer Kontaktzeit mit Kompost nicht vollständig, aber zumindest deutlich reduziert werden. Die mögliche Reelution pulvertypischer Verbindungen sowie die erheblichen Einträge von DOC in das Grundwasser sind dabei als möglicher Ausschlussgrund zu berücksichtigen.

Die Alkalische Hydrolyse kann aufgrund der stoffspezifischen Einschränkungen (ungeeignet für Nitropenta und die pulvertypischen Verbindungen C1, DPU und EPU) nicht uneingeschränkt empfohlen werden; sie wird daher eher speziellen Einzelanwendungen vorbehalten bleiben. Zudem kommt es bei der AH durch die starke pH-Wert-Anhebung zu nachteiligen Auswirkungen auf den Boden und die Bodenbiologie, die nachfolgend Maßnahmen zur Anhebung des pH-Wertes sowie zur Wiederherstellung der Bodenfunktion erforderlich machen. Hierzu muss der entgiftete Boden nach der alkalischen Behandlung neutralisiert und z. B. mit humushaltigem, unbelastetem Boden versetzt werden, um die mikrobiologische Aktivität wiederherzustellen.

Darüber hinaus ist hier zu berücksichtigen, dass beim alkalischen Hexogen-Abbau – ähnlich wie in aeroben Bereichen auch bei der IM – unter Umständen mit Nitrodiazabutanal (NDAB) die Bildung eines sogenannten „dead-end“-Produktes möglich ist, über dessen Eigenschaften und Verbleib bislang nur unzureichende Informationen vorliegen.

In der Regel wird bei Sanierungsmaßnahmen auf ETV-kontaminierten Standorten ein erheblicher Anteil des makroskopisch greifbaren Emissionspotenzials an Sprengstoffen und Pulvern bereits durch die sanierungsbegleitende Kampfmittelräumung entfernt. Eine Kombination der KMR mit einer Immobilisierung durch Kompost kann den ermittelten Erkenntnissen zufolge zu einer deutlichen Reduzierung der von ETV ausgehenden Gefahren für das Grundwasser führen. Derzeit bestehen bezüglich der Wirkweise und Anwendbarkeit der Immobilisierung mit Kompost allerdings noch einschränkende Wissenslücken. Diese beziehen sich neben den noch offenen Fragen zur Langfristwirksamkeit des Kompostes im Boden als Immobilisat bzw. zu dessen stofflicher Entwicklung im verbauten Zustand auch auf möglicherweise induzierte Freisetzungsprozesse. Auch zum Hexogenabbauprodukt NDAB sowie zum Rückhalt und zum potenziellen Abbau der PTV sind noch Fragen offen.

Weiterhin sind die erheblichen DOC-Einträge in das Grundwasser und die dadurch möglichen Folgeprozesse (z. B. Freisetzung anorganischer Schadstoffe) noch nicht abschließend geklärt.

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Informationen sowie der im Rahmen des o. g. LfU-STV-Projekts („Alternative Sanierungsverfahren STV-kontaminierter Böden“) ermittelten stoffspezifischen

Anwendungsgrenzen der jeweiligen Verfahren sowie der aufgezeigten offenen Fragen und Wissensdefizite kann u. E. derzeit weder für die Immobilisierung durch Kompost noch für die alkalische Hydrolyse eine uneingeschränkte Empfehlung für die Anwendung im Vollzug ausgesprochen werden. Insbesondere fehlen derzeit hinreichend detaillierte Vorgaben zur Verfahrensausführung (z. B. notwendige/zulässige Schichtstärken für Kompost bzw. rückverfüllten Boden, Vorgaben zu Verdichtung, Sicherung der Sohl- und Randbereiche), zum Dokumentationsumfang (z. B. lagegenaue Einmessung(GPS), Schichtfolgen und Mächtigkeit) sowie zum Kontroll- und Überwachungsumfang (z. B. Umfang der Beweissicherung, Dauer des Monitorings).

Eine Anwendung dieser Verfahren ist aber im zu begründenden Einzelfall unter Berücksichtigung der Standortbedingungen und der sanierungsrelevanten Parameter unter Auflagen möglich. Zwingend erforderlich sind belastbare Vorversuche zu verschiedenen verfahrenstechnischen Varianten mit entsprechend positiver Ergebnislage zur Wirksamkeit, eine umfassende dauerhafte Überwachung sowie die Erarbeitung einer Rückfalloption.

Bei Anwendung der Verfahren im Einzelfall ist eine einschlägige sachverständige Begleitung sowie die Einbindung technisch-wissenschaftlichen Sachverständs dringend zu empfehlen. Die verfahrenstechnischen Grundlagen und die verfahrenstechnischen Umsetzungsschritte sind im Rahmen der Sanierungsvorbereitung detailliert darzulegen.

Zur **Behandlung von ETV-kontaminiertem Grund- oder Oberflächenwasser** mittels Constructed Wetland liegen positive Erfahrungen an zwei Standorten in Bayern vor. Für Nitroaromaten und Hexogen/Oktogen im Grundwasser scheint entsprechend den hier beschriebenen Forschungsvorhaben auch die Anwendung reaktiver, mit nullwertigem Eisen oder Rindenmulch gefüllten Wände eine wirksame Eliminierung zu ermöglichen. Aussagen, inwieweit mit den vorgenannten Verfahren auch pulvertypische Verbindungen (z. B. C1, DPU, EPU) eliminierbar sind, können aufgrund fehlender Untersuchungsergebnisse derzeit nicht getroffen werden.

7 Literatur

- [1] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hrsg.): Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen – Praxisteil. Augsburg 2009. Online verfügbar unter https://www.stmuvm.bayern.de/themen/boden/vollzug/doc/arbeitshilfe_untersuchung_sprengplaetze.pdf [Zugriff am 17.07.2020].
- [2] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (Hrsg.): LfU-Deponie-Info - Merkblatt 1, LANUV-Arbeitsblatt 6: Mineralische Deponieabdichtungen - Konkretisierende Anforderungen an zu verdichtende Deponieabdichtungskomponenten aus natürlichen, mineralischen Materialien. Augsburg und Recklinghausen 2009. Online verfügbar unter https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_abfall_00162.htm [Zugriff am 03.05.2021].
- [3] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hrsg.): Deponie – Info 7: Hinweise zum Vollzug der DepV. Augsburg 2015. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/abfall/merkblaetter_deponie_info/doc/hinweise_vollzug_depv.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [4] Wikipedia.org: „Heeresmunitionsanstalt Feucht“. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Heeresmunitionsanstalt_Feucht [Zugriff am 03.05.2021].
- [5] R. Schmolzi: Giftgasbehälter bleiben im Boden. Nürnberger Nachrichten, 21.06.2006.
- [6] K. Rupprecht: Jahresabschlussrede des Bürgermeisters 2006. Online verfügbar unter <http://www.konrad-rupprecht.de/jahresschluss2006.htm> [Zugriff am 03.05.2021].
- [7] Persönliche Mitteilung an das LfU durch Wasserwirtschaftsamt Nürnberg.
- [8] HIM GmbH - Bereich Altlastensanierung: „Arbeitsfeld Wasser – Hydraulische Sicherung“. Online verfügbar unter http://www.him-stadtallendorf.de/arbeitsfelder/wasser_hydr_sicherung.html [Zugriff am 03.05.2021].
- [9] IABG mbH (Hrsg.): Sanierungsdokumentation für den Sprengplatz nördlich der ehemaligen Luftmunitionsanstalt Lenglern vom 17.07.2019. Berlin 2019.
- [10] IABG mbH (Hrsg.): Kampfmittelbeseitigungsmaßnahme Muna Lenglern im Landkreis Göttingen. Vortragsfolien zum Niedersächsischen Bodenschutzforum am 12.11.2019. Online verfügbar unter https://www.ngsmbh.de/bin/pdfs/Vortrag_121119_Hingst.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [11] A. Schwendner: Neuigkeiten bei der Erkundung von Sprengplätzen seit 2009. Tagungsunterlage Fachtagung Kampfmittelbeseitigung am 21./22.02.2011. Online verfügbar unter http://dfabgmbh.de/wp-content/uploads/FT11/tagungsunterlage_2011.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [12] A. Schwendner: Untersuchung von Sprengplätzen – Neuigkeiten. Vortragsfolien zur Fachtagung Kampfmittelbeseitigung am 21./22.02.2011. Online verfügbar unter <http://dfabgmbh.de/wp-content/uploads/FT11/0711.pdf> [Zugriff am 03.05.2021].
- [13] LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH (Hrsg.): Ehemaliger Sprengplatz Marktbergel – Vorversuche zur Sanierung. Bericht IUA2012287 vom 29.10.2012 (behördeninternes Dokument). Nürnberg, 2012.
- [14] IBH Weimar (Hrsg.): Ehem. US-Sprengplatz Boxbrunn – Kampfmittelräumung. Monitoring Abschlussbericht vom 16.12.2019 (behördeninternes Dokument). Erarbeitet von A. Schwendner. Nürnberg, 2019.

- [15] IBH Weimar (Hrsg.): Ehem. Sprengplatz Rattelsdorf - Ergebnisse des Monitorings 1 mit Dokumentation der bodenschutzrechtlichen Sanierungsmaßnahmen vom 16.12.2019 (behördeninternes Dokument). Erarbeitet von A. Schwendner. Freystadt 2019.
- [16] LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH (Hrsg.): Temporärer Sprengplatz Marktbergel - Fachtechnische Begleitung des Rückbaus und Vorversuch zur Entgiftung mittels alkalischer Hydrolyse vom 28.02.2014 (behördeninternes Dokument). Nürnberg, 2014.
- [17] IBH Weimar (Hrsg.): Blue Cap Asset Management GmbH, Thansau. Vor-Ort-Sanierung von TNT-belastetem Aushub durch Alkalische Hydrolyse und Wiedereinbau des dekontaminierten Materials auf dem Betriebsgelände - Abschlussbericht vom 23.01.2019 (behördeninternes Dokument). Erarbeitet von A. Schwendner. Freystadt, 2019.
- [18] Joseph Knott et. al.: Innovative Application of Environmental Technology Simplifies Rapid Response Action Soil Cleanup at MMR. Forschungsbericht ohne Datum. Online verfügbar unter <http://www.jbcc-iagwsp.org/groundwater/papers/NDIA2001.pdf> [Zugriff am 03.05.2021].
- [19] R. Britto, M. Patterl, M. L. Spangberg: Full-Scale Alkaline Hydrolysis of TNT and DNT in Soil. Vortragsfolien zur 7th International Conference for Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds (TETRATECH), 2010.
- [20] R. Britto, J. P.E. Nolin, R. Arnseth: Remedial Alternatives for RDX and Other Explosives in Soil and Groundwater. Vortragsfolien zu 2012 RPIC Referral Contaminated Sites National Workshop on May 2012. Online verfügbar unter http://www.rpic-ibic.ca/documents/2012_fcs_presentations/Britto_E.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [21] W. A. Martin, D. R. Felt, S. L. Larson, G. L. Fabian und C. C. Nestler: Open Burn / Open Detonation (OBOD) Area Management Using Lime for Explosives Transformation and Metals Immobilization. ERDC/ EL TR-12-4, 2012. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Environmental Laboratory (Hrsg.). Online verfügbar unter <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/4616/> [Zugriff am 03.05.2021].
- [22] Umweltbundesamt (Hrsg.): Leitfaden Biologische Verfahren zur Bodensanierung. Erarbeitet von J. Michels, T. Track, U. Gehrke und D. Sell (DECHEMA e. V.) im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin, Mai 2001.
- [23] A. Joos, H.-J. Knackmuss und W. Spyra: Leitfaden Natürliche Schadstoffminderung bei sprengstofftypischen Verbindungen. BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 5 Rüstungsaltslasten. IABG mbH (Hrsg.). Berlin 2008. ISBN 978-3-00-025181-8. Online verfügbar unter <http://www.natural-attenuation.de/download.html> [Zugriff am 03.05.2021].
- [24] L. Paquet, F. Monteil-Rivera, P. B. Hatzinger und M. Fuller: Analysis of the key intermediates of RDX (hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5- triazine) in groundwater: Occurrence, stability and preservation. *Journal of Environmental Monitoring* 13(8):2304-11, 2011.
- [25] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hrsg.): Immobilisierung und Alkalische Hydrolyse - Überprüfung der Langfristwirksamkeit von zwei alternativen Verfahren zur Behandlung ETV-belasteter Böden. Augsburg 2019. Online verfügbar unter https://www.bestellen.bayern.de/shop-link/lfu_bod_00151.htm [Zugriff am 03.05.2021].
- [26] LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH (Hrsg.): Ehemaliger temporärer Sprengplatz Marktbergel - Fachtechnische Begleitung der Sanierung - 3. Inspektions- und Abschlussbericht vom 12.11.2014 (behördeninternes Dokument). Nürnberg, 2014.
- [27] LGA Insitut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH (Hrsg.): Ehemalige E-Stelle und Sprengplatz Hainsacker - Machbarkeitsstudie zu Sanierungsverfahren (Vortragsfolien) - Behördeninternes Dokument. Nürnberg, 2012.

- [28] LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH (Hrsg.): Ehemalige E-Stelle und Sprengplatz Hainsacker - Machbarkeitsstudie zu Sanierungsverfahren vom 06.05.2012 (behördeninternes Dokument). Nürnberg, 2012.
- [29] J. Knott, M. F. Warminsky, K. R. Weeks und C. Jones: Innovative Application of Environmental Technology Simplifies Rapid Response Action Soil Cleanup at MMR. Online verfügbar unter <http://jbcc-iagwsp.org/groundwater/papers/NDIA2001.pdf> [Zugriff am 03.05.2021].
- [30] J. Klatt und A. Schwendner: „Der Aushub einer KMR ist belastet... was nun? - Möglichkeiten und Unmöglichkeiten im Umgang mit sprengstoffkontaminiertem Boden“ (Vortragsfolien). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH, Amt für Umwelt und ländlichen Raum – Landkreis Celle. Online verfügbar unter <https://dfabgmbh.de/wp-content/uploads/FT12/0212.pdf> [Zugriff am 03.05.2021].
- [31] Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten (HMULF) (Hrsg.): MOSAL - Modellhafte Sanierung von Altlasten am Beispiel des TNT-Sanierungsprojektes Stadtallendorf / Hessen. Wiesbaden, 2000. Online verfügbar unter http://www.him-stadtallendorf.de/download/broschueren/Abschlussbericht_MOSAL_lang.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [32] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hrsg.): Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen – Anhang 2.7: Hinweise zum Umweltverhalten Explosivstofftypischer Verbindungen. Augsburg 2009. Erarbeitet von A. Schwendner (LGA GmbH Nürnberg). Online verfügbar unter https://www.stmuv.bayern.de/themen/boden/vollzug/doc/anlage_2.7_arbeitshilfe_unter-such_sprengplaetze.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [33] IABG mbH (Hrsg.): Sanierung sprengstoffbelasteter Böden der ehemaligen Luftwaffenmunitionsanstalt Kleinkötz – Abschlussbericht. Ottobrunn, Januar 2002. (behördeninternes Dokument).
- [34] IABG mbH (Hrsg.): Biologische Low-Cost-Behandlung von sprengstoffkontaminierten Böden – Abschlussbericht. Ottobrunn, Mai 2002. (behördeninternes Dokument)
- [35] K. Weeks: Camp Edwards Massachusetts Military Reservation Impact Area Groundwater Study Program - Innovative Technology Evaluation Program (ITE) (Vortragsfolien 24.04.2001). Online verfügbar unter <http://jbcc-iagwsp.org/groundwater/papers/iart2001.pdf> [Zugriff am 03.05.2021].
- [36] J. Pennington et al.: Distribution and Fate of Energetics on DoD Test and Training Ranges: Final Report. Bericht ERDC TR-06-13. Strategic Environmental Research and Development Program (Hrsg.). Arlington 2006. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/265599081_Distribution_and_Fate_of_Energetics_on_DoD_Test_and_Training_Ranges_Final_Report#read [Zugriff am 03.05.2021].
- [37] M. Fuller, P. B. Hatzinger et al.: Enhancing the attenuation of explosives in surface soils at military facilities: combined sorption and biodegradation. *Environ Toxicol Chem.* 2004;23(2):313-324., 2004. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/7835390_Enhancing_the_attenuation_of_explosives_in_surface_soils_at_military_facilities_Combined_sorption_and_biodegradation [Zugriff am 03.05.2021].
- [38] R. Steffan: Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP) - Final Technical Report - Immobilization Of Energetics On Live Fire Ranges (CU-1229). Juli 2004. Online verfügbar unter [https://www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Environmental-Restoration/Contaminants-on-Ranges/Protecting-Groundwater-Resources/ER-1229/ER-1229/\(modified\)/08May2019](https://www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Environmental-Restoration/Contaminants-on-Ranges/Protecting-Groundwater-Resources/ER-1229/ER-1229/(modified)/08May2019) [Zugriff am 03.05.2021].
- [39] J. L. Johnson, D. R. Felt et al.: Management of Munitions Constituents in Soil Using Alkaline Hydrolysis: A Guide for Practitioners - ERDC/EL TR-11-16, 2011. Online verfügbar unter

- https://www.researchgate.net/publication/277825454_Management_of_Munitions_Constituents_in_Soil_Using_Alkaline_Hydrolysis_A_Guide_for_Practitioners [Zugriff am 03.05.2021].
- [40] IABG mbH (Hrsg.): Forschungsverbund "Maßstabsgerechte Erprobung biologischer Verfahren" mit Erfolgskontrolle auf dem Standort Werk Tanne bei Clausthal Zellerfeld – Abschlussbericht. 31.05.2001. Online verfügbar unter https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/30228_-_Abschlussbericht.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [41] K. R. Weeks, S. Veenstra und B. P. Gregson: Comparison of innovative Technologies for soil cleanup at Camp Edwards, Massachusetts Military Reservation. Online verfügbar unter http://jbcc-iaqwsp.org/groundwater/papers/AMEC2001_2.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [42] M. Weiß et al.: Verbundvorhaben Biologische Verfahren zur Bodensanierung - Teilprojekt 5.3.3: „Analyse der Bindungsstrukturen gebundener TNT-Rückstände im Boden nach biologischer Behandlung und Remobilisierungsversuche“ – Endbericht 30.04.2001 (BMBF-Fördervorhaben). Online verfügbar unter https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/31325_-_Abschlussbericht.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [43] W. Pestemer et al.: Freilandversuche zur TNT-Dekontamination und [14C]-TNT-Aufnahme durch Gehölze - Forschungsverbund "Biologische Verfahren zur Bodensanierung – Rüstungsaltslasten" - Abschlussbericht 2002 (BMBF-Fördervorhaben). Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Deutschland (Berlin), 1998-2001. Online verfügbar unter https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/26565_-_Abschlussbericht.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [44] Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Landkreis Celle: "Kampfmittelräumung und Altlastensanierung Hand in Hand - und es geht doch!". Vortragsfolien Fachtagung „Kampfmittelbeseitigung“ des BDFWT, Bad Kissingen 2011. Online verfügbar unter <http://dfabgmbh.de/wp-content/uploads/FT11/0311.pdf> [Zugriff am 03.05.2021].
- [45] S. L. Larson, D. R. Felt et al.: Grenade Range Management Using Lime for Metals Immobilization and Explosives Transformation Treatability Study - ESTCP Project ER-0216 (2007). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/235143934_Grenade_Range_Management_Using_Lime_for_Metals_Immobilization_and_Explosives_Transformation_Treatability_Study#read [Zugriff am 03.05.2021].
- [46] C. E. VanEngelen: Alkaline Hydrolysis of Explosives. Dissertation, Montana State University. Januar 2010.
- [47] HIM GmbH (Hrsg.): KORA Themenverbund 5: „Nutzung von Selbstreinigungspotentialen in STV-belasteten Böden und Grundwässern“; Teilvorhaben 5.2 (MONASTA): „Prognose und Kontrolle des natürlichen Rückhalts und Abbaus von Nitroaromaten im Festgestein am Rüstungsstandort Stadtallendorf“ – Abschlussbericht. BMBF-Fördervorhaben. Bibesheim, Februar 2009. Online verfügbar unter https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/0330508_-_Abschlussbericht.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [48] WASAG DECON GmbH: Vorplanung - Umgestaltung des Sprengplatzes auf dem Truppenübungsplatz Wildflecken (behördeninternes Dokument). Haltern, 2002.
- [49] J. Singh, S. D. Comfort und P. J. Shea: „Iron-Mediated Remediation of RDX-Contaminated Water and Soil under Controlled Eh/pH“. *Environmental Science & Technology*, 01.05.1999.
- [50] J. Hawari, S. Beaudet, A. Halasz et al.: „Microbial degradation of explosives: biotransformation versus mineralization“, *Applied Microbiology and Biotechnology* 54, p. 605–618, 2000.
- [51] Wikipedia.org: „Aktivkohle“. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Aktivkohle> [Zugriff am 03.05.2021].

- [52] TU Berlin (Hrsg.): In-situ-Filterregeneration bei der TNT-Elimination aus Grundwasser: Anwendung des Verfahrens auf einen Faseraktivkohle-Adsorber – Schlussbericht. BMBF-Forschungsvorhaben (2001-2002). Berlin, April 2003. Online verfügbar unter https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/28163_-_Abschlussbericht.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [53] Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LUGV) (Hrsg.): Arbeitshilfe „Grundwasserkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen im Land Brandenburg“; Behandlung, Aufnahmemechanismen, Abbauverhalten – Stufe IB: Umsetzung der Literaturrecherche und Erarbeitung vertiefender Grundlagen (Fachinformation Nr. 22). Potsdam, Dezember 2015.
- [54] F. Hilscher: Untersuchungen zur Sorption von TNT-Metaboliten an Ringpolymeren. Diplomarbeit – Universität Hamburg. Hamburg, 2003.
- [55] Y. Zimmermann: Begleitende analytische Untersuchungen bei der Entfernung von sprengstoffrelevanten Substanzen aus Gewässern durch Adsorption an Polymeren mit räumlich globulärer Struktur (RGS). Dissertation – Universität Hamburg. Hamburg, 2007.
- [56] Umwelttechnik- und Sanierungsgesellschaft mbH (Hrsg.): Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur Reinigung schadstoffhaltiger Wässer mit RGS-Polymeren am Beispiel einer TNT-Kontamination - Teilprojekt 4: Entwicklung, Bau und Erprobung einer Pilotanlage zum mikrobiellen Abbau von Sprengstoffen in Regeneraten der RGS-Filter. Potsdam, April 2005.
- [57] R. Johnson und P. Tratnyek: Remediation of Explosives in Groundwater Using a Zero-Valent Iron Permeable Reactive Barrier – Final Report. ESTCP Project ER-0223. Oregon Health and Science University, Mai 2008.
- [58] C. Newell: Treatment of RDX & HMX Plumes Using Mulch Biowalls – Final Report. ESTCP Project ER-0426. GSI Environmental, Inc., August 2008.
- [59] W. Entenmann und Niepmann: Untersuchungen und Technikumsversuche zur Sanierung mit Nitroaromaten belasteten Grundwassers. Sythen, Dresdener Grundwassertage, 2013.
- [60] Stadt Leverkusen - Der Oberbürgermeister: Grundwassersanierung Waldsiedlung - Beschlussvorlage vom 05.11.2015, Leverkusen. Online verfügbar unter http://www.karhu.de/Grundwasser-SanierungWaldsiedlung_Rat2015.0754.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [61] Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.): „Rüstungsaltslasten: Verfahrensgrundlagen für die Reinigung von Hexogen/Hexyl-kontaminierten Grund- und Oberflächenwasser aus Rüstungsaltslasten mit Pilzen“. Online verfügbar unter <https://www.cleaner-production.de/index.php/de/themen/sanierungstechnik/ruestungsaltslasten/2553-verfahrensgrundlagen-fuer-die-reinigung-von-hexogen-hexyl-kontaminierten-grund-und-oberflaechenwasser-aus-ruestungsaltslasten-mit-pilzen#zusammenfassung> [Zugriff am 03.05.2021].
- [62] IABG mbH (Hrsg.): Verfahrensgrundlagen für die Reinigung von Hexogen/Hexyl-kontaminierten Grund- und Oberflächenwasser aus Rüstungsaltslasten mit Pilzen - Endbericht. BMBF-Forschungsvorhaben. Online verfügbar unter https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/26471_-_Abschlussbericht.pdf [Zugriff am 03.05.2021].
- [63] HIM GmbH - Bereich Altlastensanierung: „Stadtallendorf - Arbeitsfeld Wasser“. Online verfügbar unter <http://www.him-stadtallendorf.de/arbeitsfelder/wasser.html> [Zugriff am 03.05.2021].
- [64] Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, *Zentrale Unterstützungsstelle Abfall, Gentechnik und Gerätesicherheit* (ZUS AGG) (Hrsg.): Altlastenbericht 2018 (Niedersachsen). Mit Beiträgen von Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Hildesheim, Juli

2018. Online verfügbar unter <https://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de/startseite/umweltschutz/bodenschutz/fordermassnahmen/altlastenbericht/altlastenbericht-180891.html> [Zugriff am 03.05.2021].

Tab. 6: Vorgestellte Verfahren zur Behandlung kontaminierter **BÖDEN**. *Sortiert nach Verfahren.* [LHMa: Lufthauptmunitionsanstalt]

VERFAHREN	Oberflächenabdichtung	Basisabdichtung	Hydraulische Sicherung	Immobilisierung Kompost	Alkalische Hydrolyse	Bodenwäsche	Bodensuspension	Phytoslurry	Kompostierung	Beet-/Mietenverfahren	Composting
Kapitel	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2 und 4.1.10	3.3	4.1.1.1	4.1.1.2	4.1.2	4.1.2.2	4.1.2.3
Sanierung	✓	✓	✓	✓	✓	✓					
F+E					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
STANDORTE	TÜP Hohenfels (BY)	TÜP Wildflecken (BY)	TNT-Werk Stadtallendorf (Hessen)	Lenglern (Nds.)	Marktbergel (BY)	MMR Übungsplatz (USA)	Werk Tanne (Nds.)	Werk Tanne (Nds.)	Werk Tanne (Nds.)	Werk Tanne (Nds.)	MMR Übungsplatz (USA)
	Muna Feucht (BY)			Marktbergel (BY)	Thansau (BY)	LHMa Hambühren (Nds.)					
				Boxbrunn (BY)	MMR Übungsplatz (USA)	TNT-Werk Stadtallendorf (Hessen)					
				Rattelsdorf (BY)							
				Langenhagen (Nds.)							

VERFAHREN	Festphasensanierung	Weißfäulepilz	BioREx	Phytoremediation	Niedrigtemperaturverfahren	Chemische Reduktion	Chemische Oxidation	Immobilisierung Torf	MNA
Kapitel	4.1.2.4	4.1.3	4.1.4	4.1.5	4.1.6	4.1.7	4.1.8	4.1.9	4.1.11
Sanierung									
F+E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
STANDORTE	MMR Übungsplatz (USA)	Werk Tanne (Nds.)	LMuna Kleinkötz (BY)	?	MMR Übungsplatz (USA)	MMR Übungsplatz (USA)	WASAG Sythen in Haltern Am See (NRW) Leverkusen-Schlebusch (NRW)	Unbekannter Sprengplatz in Nds.	Werk Tanne (Nds.) Torgau/ Elsnig (Sachsen)

Tab. 7: Vorgestellte Verfahren zur Behandlung kontaminierter **WÄSSER**. *Sortiert nach Verfahren.*

VERFAHREN	Constructed Wetland	Aktivkohle	Faseraktivkohle	RGS-Polymere	Photolyse	UV-Oxidation	Chemische Reduktion	Chemische Oxidation	Pilze (RDX-Abreinigung)
Kapitel	4.2.1	4.2.2.1	4.2.2.1	4.2.2.2	4.2.3.1	4.2.3.2	4.2.4	4.2.5	4.2.6
Sanierung	✓	✓							
F+E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
STANDORTE	TÜP Wildflecken (BY) TÜP Grafenwöhr (BY)	Espagit Hallschlag (RP) Werk Tanne (Nds.) Togau/Elsnig (Sachsen) Hessisch Lichtenau (Hessen)	TU Berlin	?	?	?	?	WASAG Sythen in Haltern Am See (NRW) Leverkusen-Schlebusch (NRW)	WASAG Sythen in Haltern Am See (NRW)

Tab. 8: Vorgestellte Verfahren zur Behandlung kontaminierter **Böden und Wässer**: *sortiert nach Standorten*. **IM**: Immobilisierung; **MNA**: Monitored Natural Attenuation.

STANDORT	Werk Tanne (Nds)	MMR Übungsplatz (USA)	Torgau/Elsnig (Sachsen)	Marktbergel (BY)	TÜP Wildflecken (BY)	TNT-Werk Stadtallendorf (Hessen)	WASAG Sythen in Haltern Am See (NRW)	Boxbrunn (BY)	Rattelsdorf (BY)	Thansau (BY)	Muna Feucht (BY)	LMuna Kleinkötz (BY)	
VERFAHREN	Bodensuspension Phytoslurry Kompostierung Beet-/Mietenverfahren Weißfäulepilz MNA	Alkalische Hydrolyse Bodenwäsche Composting Festphasensanierung Niedrigtemperatur Chemische Reduktion	Pilze MNA Aktivkohle	IM Kompost Alkalische Hydrolyse	Basisabdichtung Constructed Wetland	Bodenwäsche Hydraulische Sicherung	Chemische Oxidation Aktivkohle	IM Kompost	IM Kompost	Alkalische Hydrolyse	Oberflächenabdichtung	BioREx	
STANDORT	TÜP Hohenfels (BY)	Hessisch Lichtenau (Hessen)	Leverkusen-Schlebusch (NRW)	Espagit Hallschlag (RP)	TU Berlin	unbekannter Sprengplatz in Nds.	Lenglern (Nds.)	LHMa Hambüren (Nds.)	Langenhagen (Nds.)	?	?	?	?
VERFAHREN	Oberflächenabdichtung	Aktivkohle	Chemische Oxidation	Aktivkohle	Faseraktivkohle	IM Torf	IM Kompost	Bodenwäsche	IM Kompost	RGS-Polymere	Photolyse	UV-Oxidation	Chemische Reduktion



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

