

Kurzbericht – Zusammenfassung der Projektergebnisse und Bewertung  
**Immobilisierung und Alkalische Hydrolyse –  
Überprüfung der Langfristwirksamkeit von  
zwei alternativen Verfahren zur Behandlung  
ETV-belasteter Böden**



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Verfahrensübersicht</b>	<b>3</b>
2.1	Immobilisierung mittels Kompost (IM)	3
2.2	Alkalische Hydrolyse (AH)	4
<b>3</b>	<b>Untersuchungsumfang</b>	<b>4</b>
3.1	Versuch 1: Beregnungsversuch	4
3.2	Versuch 2: Minderungsratenversuch mit generiertem Feldeluat	5
3.3	Versuch 3: Dauerbeladungsversuch	6
3.4	Versuch 4: Minderungsratenversuch mit dotierten Proben	6
3.5	Versuch 5: Lysimeterversuche	7
3.6	Versuch 6: Analytik polarer STV in organikreichen Wässern	8
3.7	Untersuchungen zur Alkalischen Hydrolyse (AH)	8
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerungen und offene Fragen</b>	<b>9</b>

## 1 Einführung

Sprengplätze im Sinne von Massenvernichtungsplätzen für Munition aus der Zeit nach den beiden Weltkriegen sind in der Regel durch Belastungen mit explosivstofftypischen Verbindungen (ETV) sowie mit Kampfmitteln gekennzeichnet. Die ETV werden unterschieden in sprengstofftypische Verbindungen (STV) – z. B. Trinitrotoluol (TNT), Aminodinitrotoluole (ADNT), Hexogen (RDX), Nitropenta (PETN) – und pulvertypische Verbindungen (PTV) – z. B. Centralit 1 (C1), Diphenylurethan (DPU) und Ethylphenylurethan (EPU).

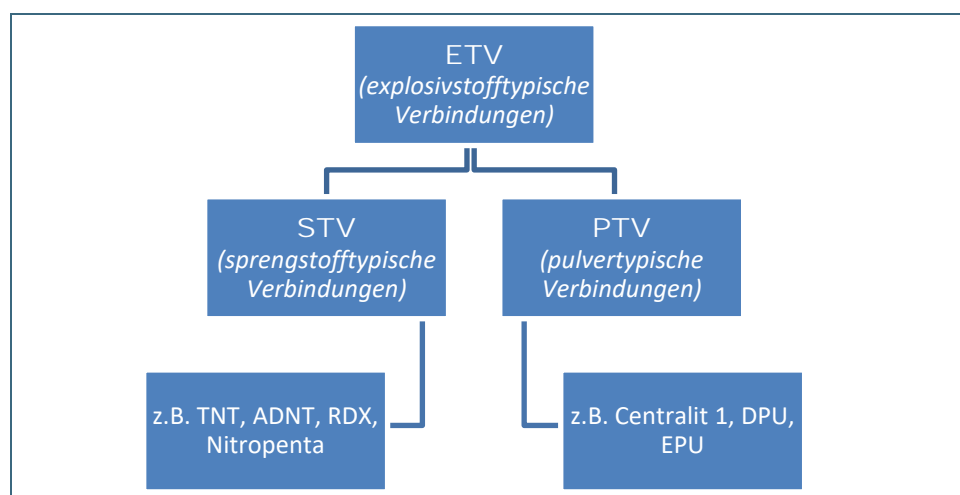


Abb. 1:  
Einteilung der ETV  
(Explosivstofftypische  
Verbindungen)

Diese Verbindungen stellen aufgrund ihrer hohen Toxizität und relativ guten Wasserlöslichkeit eine Umweltgefahr dar und erfordern in der Regel Sanierungsmaßnahmen. Bei der Sanierung derart kontaminierter Flächen ist eine zunehmende Nachfrage nach wirksamen und kostengünstigen Alternativen zu den herkömmlichen, meist teuren Sanierungsverfahren (Aushub mit anschließender Deponierung oder Verbrennung) erkennbar. Von diesen alternativen Behandlungsverfahren können derzeit die beiden Sanierungsansätze **Immobilisierung mittels Kompost (IM)** und **Alkalische Hydrolyse (AH)** als erfolgversprechend angesehen werden.

Beide Verfahren wurden in den vergangenen Jahren in wenigen Einzelfällen in Vorversuchen auf ihre Wirksamkeit hin überprüft und bei Sanierungsmaßnahmen in Bayern angewandt. Im Rahmen eines Forschungsprojektes am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) wurden nun detaillierte Untersuchungen ETV-kontaminierter Böden hinsichtlich der Langfristwirksamkeit der in-situ-Immobilisierung mittels Kompost sowie der Behandlung mittels alkalischer Hydrolyse durchgeführt. Die Untersuchungen im Auftrag des LfU fanden zum einen unmittelbar im Feld und direkt auf einem Sprengplatz statt. Zum anderen wurden mit weiteren Labor- und Lysimeteruntersuchungen zusätzliche Ergebnisse generiert, die insbesondere zum Verfahren Immobilisierung mittels Kompost vertiefte Informationen lieferten.

Die Lysimeterversuche wurden vom LfU durchgeführt, die Feld- und Laboruntersuchungen erfolgten durch das Ingenieurbüro IBH Weimar in Zusammenarbeit mit der Envilytix GmbH in Wiesbaden, die auch die Analytik der ETV-Parameter durchführte.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in einem ausführlichen Abschlussbericht dargestellt und bewertet. Die Bewertung fand zusätzlich unter Berücksichtigung der vorliegenden Fachliteratur sowie des Stoff- und Transportverhaltens der relevanten STV und deren Abbauprodukte statt. Die wesentlichen Ergebnisse der vom LfU beauftragten Versuche sind im hier vorliegenden Kurzbericht zusammenfassend dargestellt.

Der umfangreiche Originalbericht, in dem ergänzend auch projektexterne Versuche beschrieben sind, kann auf Nachfrage vom LfU zur Verfügung gestellt werden.

## 2 Verfahrenübersicht

### 2.1 Immobilisierung mittels Kompost (IM)

Bei der Immobilisierung mittels Kompost wird der kontaminierte Boden zunächst ausgehoben und von Kampfmitteln und sichtbaren Sprengstoffbrocken befreit. Im Anschluss wird er in Wechsellagerung mit Kompost vor Ort wieder eingebaut (siehe Abb. 2). Die nach dem Wiedereinbau durch Sickerwasser aus dem kontaminierten Boden ausgetragenen STV und PTV können bei der Passage des Kompostes zunächst sorbiert und anschließend parameterabhängig zum Teil abgebaut oder an den Huminstoffen des Kompostes immobilisiert werden.

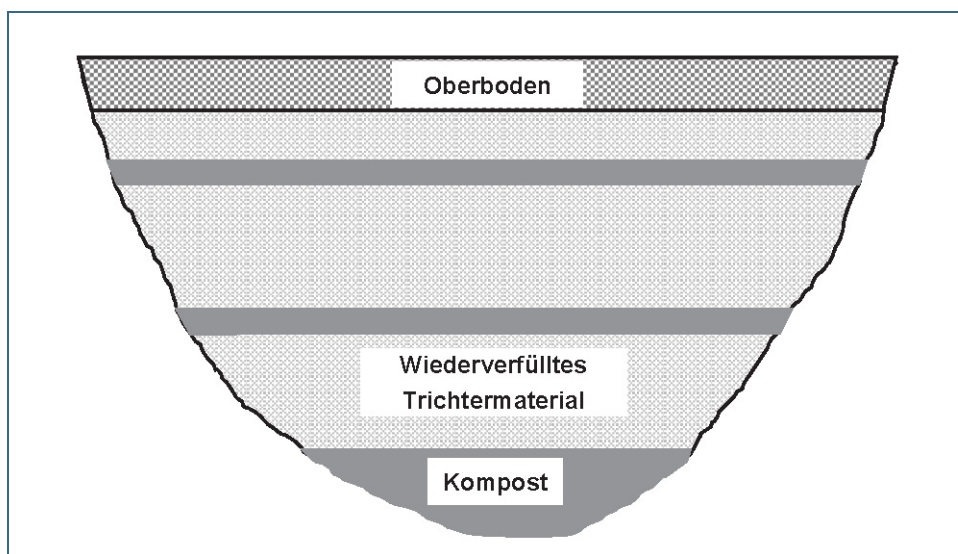


Abb. 2:  
Modellhafte  
Trichterfüllung

## 2.2 Alkalische Hydrolyse (AH)

Bei der Alkalischen Hydrolyse wird das kontaminierte Material üblicherweise ausgehoben und in einem abgedichteten Bodenbecken mit Wasser und Lauge vermischt. Durch die alkalischen Bedingungen infolge der deutlichen pH-Wert-Erhöhung kommt es zu einer chemischen Zerstörung von Nitroaromaten und von Sprengstoffen mit heterocyclischer Ringstruktur (z. B. Hexogen). PETN und die pulvertypischen Verbindungen C1, DPU und EPU sind damit jedoch nicht sanierbar.

## 3 Untersuchungsumfang

Im Rahmen des vom LfU beauftragten Projekts wurden die nachstehend genannten Versuche durchgeführt:

- (1) Beregnungsversuch an einem sanierten Sprengtrichter,
- (2) Minderungsratenversuch mit generiertem Feldeluat,
- (3) Dauerbeladungsversuch,
- (4) Minderungsratenversuch mit dotierten Proben,
- (5) Lysimeterversuche,
- (6) Analytik polarer STV in organikreichen Wässern,
- (7) Untersuchungen zur alkalischen Hydrolyse.

### 3.1 Versuch 1: Beregnungsversuch

An einem sanierten Standort wurde ein lageweise mit Kompost verfüllter Sprengtrichter (Oberfläche rund 180 m<sup>2</sup>) mit etwa 15.000 Liter Wasser beregnet. Über ein bereits bei der Sanierungsmaßnahme eingebautes Probenahmerohr konnte das anfallende Sickerwasser entnommen und im Verlauf von zwölf Wochen insgesamt zehnmal auf STV und PTV analysiert werden. Um Verfälschungen durch vor der Beregnung eingestautes Standwasser zu vermeiden, wurde vor dem Start der Beprobung das Stauwasser im Rohr mehrmals komplett abgepumpt.

Im Rahmen der mehrwöchigen Beprobung waren in keiner der entnommenen Proben Nitroaromaten oder deren Abbauprodukte nachweisbar. Allerdings konnten in allen Proben PTV analysiert werden. C1 trat in allen Proben in geringen Konzentrationen von 1–2 µg/l auf, DPU konnte in zwei Proben, EPU in den letzten sieben Proben nachgewiesen werden.

Im Rahmen des zeitgleich stattfindenden Grundwassermonitorings an diesem Standort wurde der beregnete Trichter weitere zweimal zusätzlich beprobt; dabei waren die oben genannten PTV in beiden Proben nachweisbar. In der unmittelbar an den beregneten Trichter angrenzenden Grundwassermessstelle GWM B1 waren keine PTV nachweisbar. Die Hexogenkonzentration lag hier allerdings – wie auch in den vorhergehenden Jahren – bei etwa 1 µg/l.

#### **Anhand der Ergebnisse können zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen für diesen Versuch gezogen werden:**

Das Sickerwasser benötigte im vorliegenden Fall etwa zwölf Tage für die Durchsickerung der Kompostschichten im Trichter. Die unter diesen Bedingungen gegebene Kontaktzeit reicht aus, um STV vollständig zurückzuhalten; der Rückhalt der PTV erfolgte dagegen nur unvollständig.

Allerdings können zu möglichen Auswirkungen der aus dem Kompost freigesetzten erheblichen DOC-Frachten (DOC-Konzentrationen im Sickerwasser > 100 mg/l) auf das Grundwasser und der dadurch bedingten Grundwassergefahren sowie der Folgeprozesse derzeit keine Aussagen getroffen werden.

### 3.2 Versuch 2: Minderungsratenversuch mit generiertem Feldeluat

Für diesen Versuch wurden zwei Säulen mit je 4 kg Kompost befüllt und mit vier Litern eines mit STV/PTV belasteten Versuchseluats beaufschlagt, das aus einem Bodeneluat und einer STV-belasteten Grundwasserprobe generiert worden war. Die in einem Wasser- /Feststoffverhältnis (W/F) von 1:1 befüllten Säulen wurden im Verlauf von 28 Tagen insgesamt zehnmal beprobt und das Säuleneluat auf STV und PTV analysiert.

RDX war in abnehmenden Konzentrationen in den ersten acht Proben bis etwa acht Tage nach der Beladung des Kompostes im Eluat (entspricht Säulenablauf) nachweisbar. Zusätzlich waren in allen Proben die pulvertypischen Verbindungen C1, DPU und EPU nachweisbar (siehe Abb. 3).

Nach der letzten Beprobung und dem Ablauf der Restwassermenge wurde eine Reelution des Kompostes durchgeführt. Dafür blieben die Säulen 24 lang Tage stehen und wurden anschließend mit vier Liter Wasser befüllt. Nach elf Tagen wurde das Wasser abgelassen und auf die relevanten STV- und PTV-Parameter analysiert. Im Reeluat waren Nitroaromaten und RDX nicht, die vorgenannten PTV in geringen Konzentrationen von 1–2 µg/l nachweisbar.

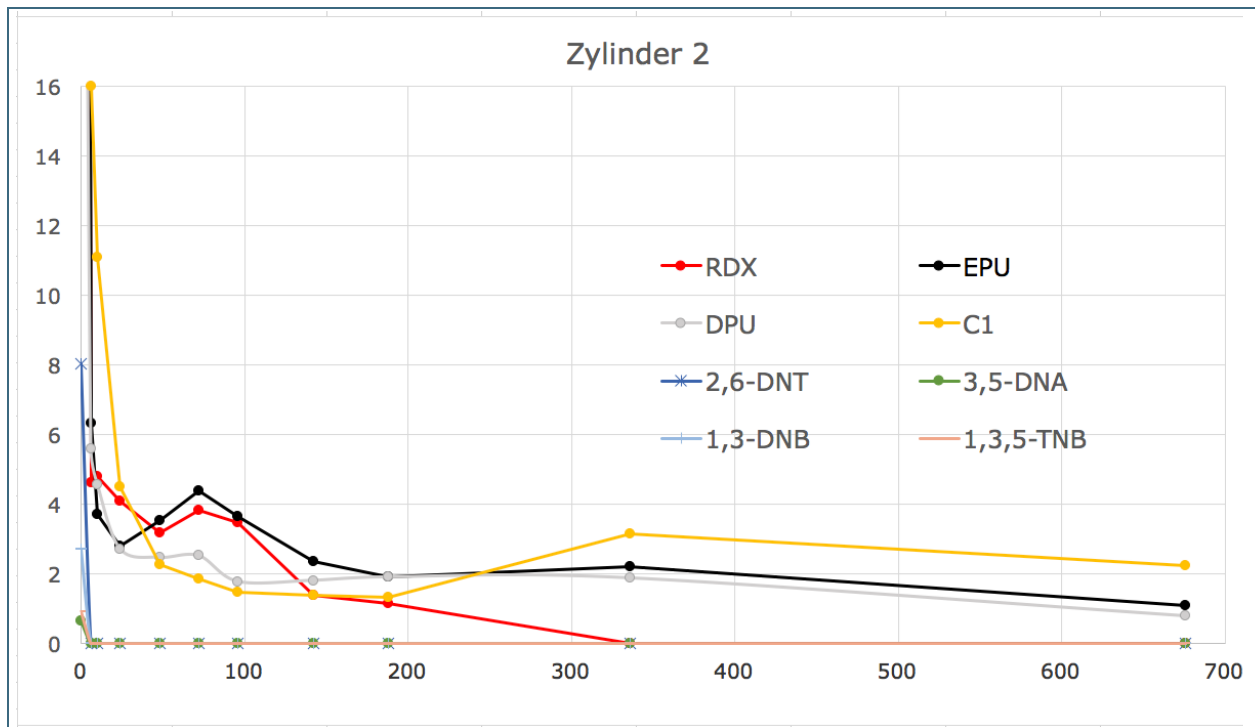


Abb. 3: STV-/PTV-Konzentrationen im Säulenablauf (Zylinder 2); x-Achse [h], y-Achse [µg/l]

**Anhand der Ergebnisse können zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen für diesen Versuch gezogen werden:**

- Der verwendete Kompost war in der Lage, die STV vollständig bis unter die Bestimmungsgrenze zu mindern. Der Zeitbedarf hierfür liegt für nitroaromatische Verbindungen im Bereich von einigen Stunden und für RDX bei etwa einer Woche.
- Die STV sind mit Wasser nicht reeluierbar.
- Bei ausreichend langer Kontaktzeit nehmen die Konzentrationen der PTV auf etwa 1–2 % der Ausgangskonzentration ab. Allerdings werden sie bei der Reelution mit Wasser auch in etwa diesen Anteilen wieder freigesetzt.



### 3.3 Versuch 3: Dauerbeladungsversuch

Um zu überprüfen, wie lange die Minderungsleistung des Kompostes anhält, wurde im Rahmen eines „Dauerbeladungsversuchs“ Kompost in einer Säule über einen längeren Zeitraum monatlich mit größeren Mengen an STV und PTV beaufschlagt (W/F = 1:1), die unter Realbedingungen (Auswaschung durch Sickerwasser im Feld) nur innerhalb eines sehr langen Zeitraumes anfallen würden.

Hierzu wurden zwei Säulen mit je zwei kg Kompost und dann mit je zwei Litern von mit STV/PTV belastetem Versuchseluat (W/F = 1:1) befüllt. Nach 28 Tagen Standzeit wurde das Wasser vollständig abgelassen, der Ablauf beprobt und die Kompostsäule erneut mit Versuchseluat befüllt; insgesamt fanden elf Beladungszyklen statt. Durch diesen Versuch sollten eventuelle Änderungen des Minderungsverhaltens erfasst werden.

#### Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen aus dem Versuch gezogen werden:

- Bei diesem Versuch wurden auch sehr hohe Konzentrationen von bis zu 10.000 µg/l an TNT und ADNT vollständig zurückgehalten. Erst gegen Versuchsende oder bei sehr hohen STV-Konzentrationen im aufgegebenen Eluat waren vereinzelt geringe Konzentrationen an TNT oder ADNT im Eluat nachweisbar.
- Bei der elfmaligen Beladung des Kompostes konnte nur EPU in nahezu allen Proben und gegen Versuchsende auch in zunehmenden Konzentrationen ermittelt werden. Im letzten Ablauf traten auch DPU und C1 auf.
- Bei der nachfolgenden fünfmaligen Reelution der beiden STV-beladenen Säulen mit Wasser waren Nitroaromaten und RDX in keiner Probe detektierbar.
- Die PTV C 1 sowie DPU und EPU konnten in diesen Eluaten in unterschiedlicher Häufigkeit nachgewiesen werden; C1 in 4 Proben, EPU in 6 Proben und DPU in 10 Proben.

### 3.4 Versuch 4: Minderungsratenversuch mit dotierten Proben

Der Versuch war – ähnlich dem Versuch 2 (Kapitel 3.2) – als Minderungsratenversuch konzipiert. Er sollte klären, ob die Minderungsraten im Kompost und der Minderungsgrad von der Schadstoffkonzentration abhängen. Hierzu wurden drei Lösungen mit unterschiedlichen Konzentrationsniveaus hergestellt. Sie enthielten jeweils 10, 100 und 1.000 µg/l an RDX, C1, EPU und DPU. Der Probenahmemodus entsprach den Rahmenbedingungen von Versuch 2. Nach Versuchsende wurde wiederum die Reeluierbarkeit mit Wasser untersucht.

Hierzu wurden in großen Bechergläsern vier Kompostaufschlämmungen in einem W/F-Verhältnis von 10:1 aus je 0,45 kg Kompost und 4,5 Liter VE-Wasser (dotiert mit RDX, C1, DPU und EPU jeweils in den Konzentrationen von 0 / 10 / 100 / 1.000 µg/l) angesetzt. Alle Bechergläser wurden vollständig mit Alufolie umwickelt und bei Raumtemperatur stehen gelassen. Der Überstand (Eluat) wurde im Verlauf von 28 Tagen insgesamt siebenmal (0 h, 24 h, 48 h, 96 h, 144 h, 192 h, 336 h und 672 h) beprobt und auf die oben genannten Verbindungen analysiert. RDX war nach sieben Tagen nicht mehr nachweisbar; die vorgenannten PTV waren (mit einer Ausnahme) in geringen Mengen und in der Regel in abnehmender Konzentration im Überstand feststellbar.

Nach Versuchsende wurde das Restwasser der mit RDX und PTV beaufschlagten Kompostansätze abgepresst und der jeweils verbleibende Kompost anschließend fünfmal mit Wasser reeluiert. Dabei wurde RDX nicht, die PTV jedoch in relativ konstanten Anteilen von durchschnittlich 4 % (C1), 6 % (DPU) und 12 % (EPU) der ursprünglich aufgegebenen Menge eluiert.

Die im Vergleich zu Versuch 3 (Kapitel 3.3) geringeren Minderungsraten für die PTV sind vermutlich dadurch bedingt, dass die in der wässrigen Phase gelösten ETV aufgrund des höheren Wasser/Fest-

stoffverhältnisses von 10:1 nicht dauerhaft und vollständig mit Kompost in Kontakt waren. Für RDX ist dies offensichtlich weniger ausschlaggebend.

**Zur Rückhaltewirkung des Kompostes bei höheren Wasser/Feststoffverhältnissen können für Hexogen sowie für C1, DPU und EPU folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:**

- RDX wird auch bei höheren Wasser/Feststoffverhältnissen vollständig zurückgehalten oder abgebaut und wird aus dem Kompost nicht wieder freigesetzt.
- C1 und DPU werden um durchschnittlich 90 % gemindert, EPU nur zu etwa 50 %.
- Die PTV können jedoch in relativ konstanten Anteilen (4–12 % der Ausgangskonzentration) wieder aus dem Kompost mobilisiert werden.

### 3.5 Versuch 5: Lysimeterversuche

STV-belastetes Material von zwei verschiedenen Sprengplätzen („Standort M“ und „Standort B“) wurde jeweils einmal mit und einmal ohne unterlagernde Kompostschicht in Kleinlysimeter mit einem Durchmesser von 30 cm („Standort M“) und 20 cm („Standort B“) eingebaut (siehe Abb. 4) und anschließend wiederholt beregnet. Um den Sickerwasserdurchfluss zu gewährleisten, musste dem Probenmaterial Quarzsand zugemischt werden. Das W/F-Verhältnis lag am Ende der Beregnung bei 1:1 für den Standort M und bei 2:1 für den Standort B.

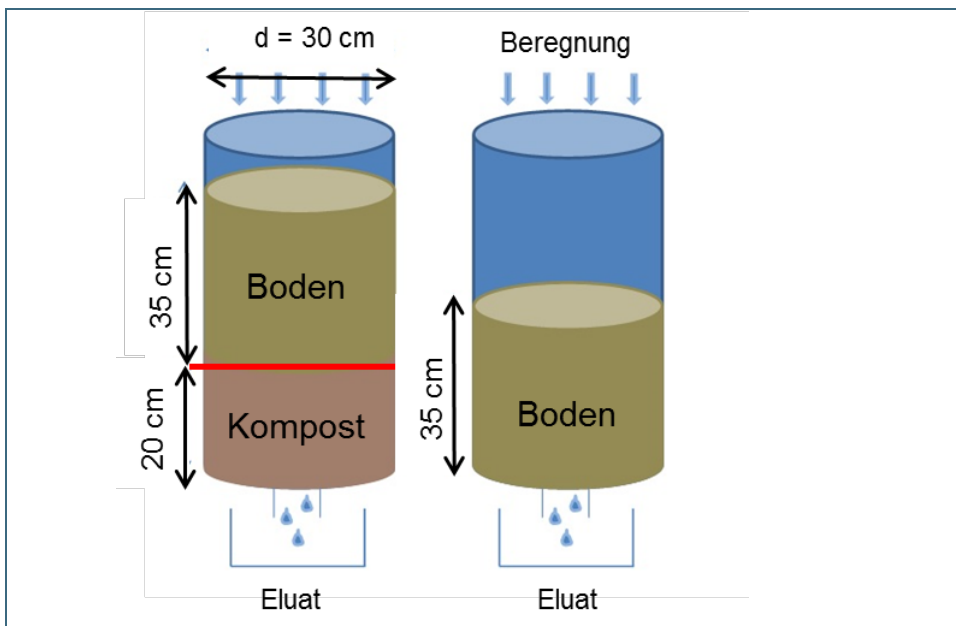


Abb. 4:  
Grafische Darstellung  
der befüllten Lysimeter

In den jeweils über mehrere Tage/Wochen gesammelten Sickerwässern aus den Lysimetern mit Kompostunterlage waren weder RDX und Abbauprodukte noch Nitroaromaten oder PETN nachzuweisen. Dagegen war in allen Proben C1 und in jeweils 5 von 9 Proben DPU feststellbar.

In den Perkolaten (Säulenablauf) aus den Lysimetern ohne Kompostunterlage waren erwartungsgemäß STV und PTV nachweisbar. Beim Standort M konnten RDX und TNT sowie die jeweiligen Abbauprodukte und zusätzlich PETN, C1 und DPU nachgewiesen werden. Die Konzentrationen nahmen mit Ausnahme von RDX, ADNT, DNT und C1 im Versuchsverlauf zum Teil bis unter die Nachweisgrenze ab. Für die Abnahme sind sehr wahrscheinlich Abbauprozesse und die kontinuierliche Auswaschung der Substanzen verantwortlich. In den Eluaten des Standortes B waren anfangs nur RDX sowie TNT und dessen Abbauprodukte feststellbar. In den weiteren Eluaten waren auch PETN sowie die oben genannten PTV nachweisbar.

**Zusammenfassend ist festzuhalten**, dass eine 20 cm mächtige Basislage aus Kompost in der Lage war, die hier auftretenden STV vollständig zurückzuhalten. Für die relevanten PTV war eine deutliche Minderung, jedoch kein vollständiger Rückhalt festzustellen.

### 3.6 Versuch 6: Analytik polarer STV in organikreichen Wässern

In diesem Versuch wurde ein 10:1-Eluat von Kompost mit STV- und PTV-dotierten Lösungen versetzt und anschließend auf pH 2 angesäuert (entsprechend dem üblichen Vorgehen bei der Probenvorbereitung für die zusätzliche Analytik von polaren STV). Durch Ansäuern der huminstoffhaltigen Wasserproben, wie in diesem Fall des Komposteluats, können aber zum Teil Huminstoffe ausfallen und eventuell gelöste STV oder PTV „mitreißen“. Deshalb wurde untersucht, ob durch diese Vorbehandlung Minderbefunde bei der nachfolgenden Analyse auftreten.

**Im Ergebnis ist festzuhalten**, dass die Konzentrationen der STV und PTV durch die gelösten Huminstoffe nicht beeinflusst werden. Beim Ansäuern von Proben, die höhere Huminstoffgehalte aufweisen, können jedoch Huminstoffe ausfallen, die STV adsorbieren. Unpolare und polare Nitroaromaten können bei höheren Huminstoffkonzentrationen somit nicht quantitativ in einem Analysengang bestimmt werden. Erhebliche Minderbefunde insbesondere für ADNT und in geringem Umfang auch für RDX waren hier festzustellen. Für die Untersuchung der polaren Nitroaromaten in huminstoffhaltigem Wasser ist daher ein zweiter Extraktionsschritt erforderlich.

### 3.7 Untersuchungen zur Alkalischen Hydrolyse (AH)

Auf einem temporären Sprengplatz, der im Rahmen der Sanierung eines Sprengplatzes zur gezielten Vernichtung von hexogengefüllten 8,8 cm Panzersprenggranaten betrieben wurde, waren nach Abschluss der Sprengarbeiten oberflächennah sanierungsbedürftige Hexogenkonzentrationen verblieben. Die höher belasteten Bodenbereiche wurden ausgehoben und das anfallende Material anschließend in einem abgedichteten Bodenbecken mittels Alkalischer Hydrolyse behandelt. Im Anschluss an diese Behandlung wurde das Material mit ebenfalls ausgehobenem, jedoch nur gering belastetem Boden aus den Randbereichen des temporären Sprengplatzes vermischt und auf einer Kompostlage am Entnahmeort wieder eingebaut.

Der Standort wurde im Rahmen dieses Projektes einer Nachuntersuchung unterzogen, um zu überprüfen, ob eine vollständige Zerstörung des RDX in dem behandelten Boden stattgefunden hat und ob in diesem Bereich, in der unterlagernden Kompostschicht sowie in der darunterliegenden mineralischen Schicht noch Belastungen an STV aufzufinden sind. Hierzu wurden nach Aufschluss mittels Bagger-schurf Bodenproben aus den relevanten Schichten entnommen (siehe Abb. 5) und anhand von Eluaten (W/F = 1:1) auf STV untersucht; zusätzlich wurde im Schurf zutretendes Grundwasser beprobt.

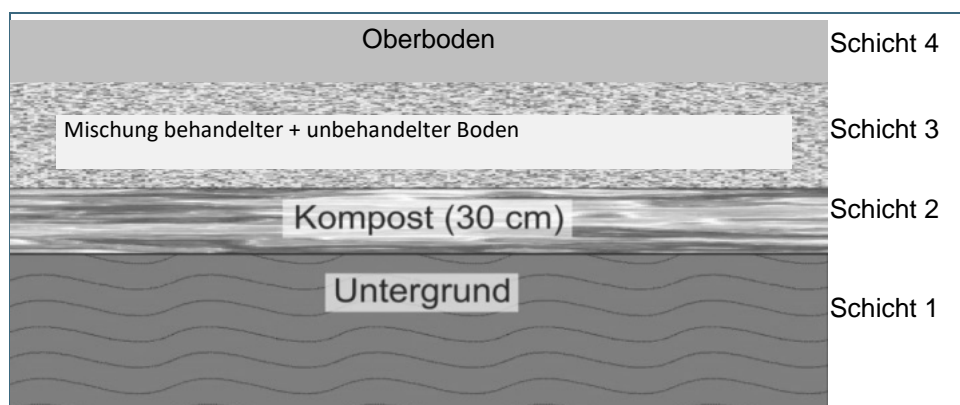


Abb. 5:  
Schematische  
Darstellung  
Bodenwiedereinbau  
nach Behandlung mit  
AH

Die Analysen ergaben, dass weder im wieder eingebauten Bodenmaterial (Schicht 3) noch im unterlagernden Kompost (Schicht 2) sowie im Unterboden (Schicht 1) sowie dem im Probeschurf zutretenden



Grundwasser ETV oder die Hexogenabbauprodukte Mononitrosohexogen (MNX), Dinitrosohexogen (DNX), Trinitrosohexogen (TNX) vorhanden waren. Analysen auf das in der Literatur beschriebene Hexogenabbauprodukt Nitrodiazabutanal (NDAB) fanden nicht statt.

Versuche zur Anwendung der AH bei einem projektexternen Schadensfall mit TNT- und DNT-Belastungen führten bei niedrigen Ausgangskonzentrationen von ca. 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 teilweise 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.

**Zusammenfassend ist festzuhalten**, dass eine mögliche Anwendung der AH stark vom vorhandenen Schadstoffspektrum abhängig ist. Die Anhebung des pH-Wertes führt außerdem zu einer erheblichen Beeinträchtigung der natürlichen Bodenfunktion, die nach der Behandlung mittels geeigneter Maßnahmen ausgeglichen werden muss.

#### 4 Schlussfolgerungen und offene Fragen

Die Versuche lieferten vor allem für die Immobilisierung von sprengstofftypischen Verbindungen (STV) mittels Kompost positive Ergebnisse. 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. Je nach Schadstoffzusammensetzung zeichnet sich für die Immobilisierung mittels Kompost ein realistisches Anwendungspotenzial für die Zukunft ab. Die mögliche Reelution pulvertypischer Verbindungen sowie die erheblichen Einträge an DOC sind dabei als möglicher Ausschlussgrund zu berücksichtigen.

Die AH kann aufgrund der stoffspezifischen Einschränkungen (ungeeignet für PETN 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 NDAB die Bildung eines sogenannten „dead-end“-Produktes möglich ist, über dessen Eigenschaften und Verbleib bislang nur unzureichende Informationen vorliegen.

Da bei Sanierungsmaßnahmen auf ETV-kontaminierten Standorten durch die in der Regel sanierungsbegleitende Kampfmittelräumung (KMR) ein erheblicher Anteil des makroskopisch greifbaren Emissionspotenzials an Sprengstoffen und Pulvern aus den kontaminierten Flächen entfernt wird, können durch eine Kombination der KMR mit einer Immobilisierung durch Kompost (IM) die von ETV ausgehenden Gefahren für das Grundwasser nach dem derzeitigen Kenntnisstand deutlich reduziert, im Einzelfall sogar weitgehend beseitigt werden. Bezüglich der IM bestehen allerdings neben den noch offenen Fragen zur Langfristwirksamkeit des Kompostes im Boden als Immobilisat sowie zu dessen stofflicher Entwicklung im verbauten Zustand und hierdurch induzierter möglicher Freisetzungsprozesse derzeit Wissenslücken. Auch zum Hexogenabbauprodukt NDAB sowie zum Rückhalt und zum potenziellen Abbau der PTV sind noch Fragen offen.

Weiterhin sind die erheblichen Einträge von DOC in das Grundwasser und die dadurch verursachten Grundwassergefahren und mögliche Folgeprozessen (z. B. Freisetzung anorganischer Schadstoffe) so-

wie die möglichen Verlagerungen insbesondere von ETV durch gelöste Huminstoffe in einem Folgeprojekt zu untersuchen. Die bislang nachgewiesene „Nichtverlagerung“ der STV durch Huminstoffe ist zu verifizieren.

Aufgrund der im Rahmen des Projekts ermittelten stoffspezifischen Anwendungsgrenzen der jeweiligen Verfahren sowie der aufgezeigten offenen Fragen und Wissensdefizite kann derzeit weder für die Immobilisierung durch Kompost noch für die Alkalische Hydrolyse eine uneingeschränkte Empfehlung für die Anwendung im Vollzug ausgesprochen werden. Eine Anwendung dieser Verfahren ist aber im zu begründenden Einzelfall unter Berücksichtigung der Standortbedingungen und der sanierungsrelevanten Parameter unter Auflagen möglich. Zwingend sind belastbare Vorversuche 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 Klärung der oben genannten offenen Fragen und zur Erarbeitung verfahrenstechnischer Umsetzungsmöglichkeiten wird die Durchführung von Pilotprojekten (Anwendung der Verfahren in der Praxis) empfohlen. Eine Einbindung des LfU in geplante Maßnahmen mit diesen oder ähnlichen Verfahren sollte erfolgen, um die Ergebnisse aus den Praxisanwendungen in den bayernweiten Vollzug einfließen lassen zu können.

---

#### Impressum:

##### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg

Telefon: 0821 9071-0

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

##### Postanschrift:

Bayerisches Landesamt für Umwelt  
86177 Augsburg

##### Bearbeitung:

LfU, Referat 96: Dr. Martin Biersack, Mira Reller

##### Bildnachweis:

LfU

##### Stand:

September 2019

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

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

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



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung