



1. Einleitung

Die Umweltfolgen der beiden Weltkriege mit ihren Rüstungsaltslasten sind bislang noch nicht bewältigt, auch wenn inzwischen die größten „hot spots“ erfasst, erkundet bewertet und weitgehend saniert sind. Neben den Rüstungsproduktionsstandorten sind noch die vielen Testgebiete, Truppenübungs-, Schieß-, Spreng und Brandplätze der Nachkriegszeit bis heute zu nennen. Hinzu kommen Gebiete mit bedeutenden Kampfhandlungen und bombardierte Flächen. Eine Bestandsaufnahme des Umweltbundesamtes 1996 nennt 3.240 Rüstungsaltslastenverdachtsstandorte (KLATT / BAUSINGER 2016: 108). Zahlreiche der in diesem Rahmen erfassten Standorte sind noch gar nicht bzw. noch nicht abschließend erkundet worden (SCHREITER 2019: 143). Die Zahl dürfte deutlich höher ausfallen, werden alle sprengstoffbelasteten Flächen hinzuaddiert.

Bei der Sprengstoffherstellung in den Rüstungsbetrieben fielen Abwässer und Neutralisationschlämme aus der Produktion an, teils zur Entfernung unerwünschter Isomere, teils aufgrund üblicher Produktionsschritte. Unter Kriegsbedingungen gab es auch vermehrt unsachgemäße Handhabungen, die zu einer Verteilung der Sprengstoffe auf angrenzende Flächen führten. Nach Kriegsende erfolgte die Delaborierung der Anlagen durch die Alliierten. Hierbei kam es oftmals zur Sprengung oder Zerstörung der Produktionsstätten und der übriggebliebenen Kampfmittel, was zusätzlich eine Flächenbelastung nach sich zog.

Die Vernichtung von Rüstungspotentialen und die Sprengung von Wehrmachts- und Marinemunition waren ein Anliegen der Siegermächte auf beiden Seiten Deutschlands. Neben den größeren, bekannten Standorten der Rüstungsbetriebe sind es aber gerade auch viele teils unbekannte Sprengplätze, auf denen von den Alliierten u.a. auch kleinere Infanteriearsenale der Wehrmacht vernichtet wurden. Bei jeder unkontrollierten Sprengung wird nicht immer die komplette Munition zur Explosion gebracht. Ein Teil verbleibt als Blindgänger, ein Teil detonierte „low-order“, unter unvollständiger Umsetzung des enthaltenen Sprengstoffs (Deflagration) (LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt 2009b: 30). Die Blindgänger unterliegen der Korrosion und der Freisetzung der Explosivchemikalien (BÖRGER (1998: V35). Durch Lösungsprozesse gelangen diese in die Umwelt, was teils auch erst viele Jahrzehnte später geschieht und bis heute andauert. Aber auch bei jeder High-Order-Detonation verbleiben 0,003 % der Füllung als Rückstand, was zumindest je nach Größe, einige Milligramm ausmacht (LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt 2009b: 30). Die Sprengstoffbelastung vieler Flächen ist ein Problem, welches uns noch viele Jahrzehnte beschäftigen wird.

Der bedeutendste Sprengstoff war TNT. Etwa 800.000 t wurden im 2. Weltkrieg hergestellt. Dies entspricht 50% der einschließlich Streckmittel produzierten Sprengstoffgesamtmenge von 1,6 Mio. Tonnen (SCHNEIDER 1996: 40).

Allein bei der Herstellung von TNT gibt es verschiedenste produktionsbedingte Zwischenstufen und unerwünschte Isomere. Nach der Freisetzung der Sprengstoffe in die Umwelt unterliegen diese verschiedensten Transformationen. Der natürliche (komplette) Abbau ist gerade bei TNT unter normalen Bedingungen nicht gegeben.

Nahezu alle sprengstofftypischen Verbindungen, inklusive der Auf- und Abbauprodukte, wirken toxisch. Einige von ihnen auch kanzerogen. Die toxische Wirksamkeit der einzelnen Substanzen unterscheidet sich um rund 1–2 Zehnerpotenzen voneinander.

Die Rüstungsproduktion war auf große Grundwasservorkommen für die Sprengstoffherstellung angewiesen. Die Ansiedlung der Betriebe ist daher eng verbunden mit bedeutenden Grund- und Trinkwassergebieten. Selbst Tiefbrunnen von 150 m Tiefe weisen inzwischen teils deutliche Konzentrationen von sprengstofftypischen Verbindungen auf (PIEH 2005: 146).

Einmal in die Umwelt freigesetzt, kommt es zur Verlagerung der Sprengstoffe mit dem Sickerwasser. Gerade bei TNT, sofern es als Festsubstanz vorliegt, sind die Lösungs- und Verlagerungsprozesse teils sehr langsam. Es kann viele Jahre, Jahrzehnte oder je nach Standortgegebenheiten auch Jahrhunderte dauern, bis der Sprengstoff und seine Metaboliten in bedeutenden Mengen in das Grund- und Trinkwasser gelangen. Genau dieser Weg, insbesondere das initiale Stadium, soll in dieser Arbeit näher untersucht werden.

1.1 Stand der Forschung

Zu Beginn der Arbeiten lagen weitaus weniger wissenschaftliche Publikationen zur Mobilität von Nitroaromaten vor, als es nun beim Abschluss der Fall ist. Die Datendichte zur Mobilität von TNT und seinen Metaboliten in ungesättigten Systemen und ungestörten Bodensäulen bleibt weiterhin sehr gering. Bislang konnte jedoch keine Untersuchung gefunden werden, die sich mit Freilandversuchen über einen längeren Zeitraum an ungestörten Böden und einer TNT-Feststoffdotierung beschäftigt hat.

Die Liste der Arbeiten, die sich in Laborversuchen mit dem Sorptionsverhalten von TNT in natürlichen Böden und Sanden sowie mit der mikrobiellen und photochemischen Transformation beschäftigen ist lang. Ein kleiner Überblick hierzu: McCormick et al. 1976, Spangord et al. 1980, Parris 1980, Pennington 1988, Neumeier et al. 1989, von Löw et al. 1989, Rosenblatt et al. 1991, Lenke et al. 1993, Duque et al. 1993, Stoffers / Winterberg 1993, Gorontzy et al. 1994, Bradley et al. 1994, Heijman et al. 1995, Breitung et al. 1995, Bruns-Nagel et al. 1996, Rippen 1996, Wolff-Boenisch et al. 1996, Krumholz et al. 1997, Lee et al. 1997, Szöcs 1999, 2014, GFI 2008, HMFUELuV 2009, Jänig 2018.

Zur Mobilität von TNT oder anderen Sprengstoffen gibt es diverse Untersuchungen. In vielen Arbeiten werden Säulenversuche zur Beschreibung der Verlagerungscharakteristika eingesetzt. Der Schwerpunkt vieler Arbeiten ist auf das Migrationsverhalten der Sprengstoffe unter gesättigten Bedingungen gerichtet, mit dem Hintergrund der Verlagerung im Grundwasser, sowohl im Porengrundwasserleiter als auch im Festgestein. Häufig wird auch bereits gelöster Sprengstoff für die Säulenversuche eingesetzt:

Comfort et al. (1995) haben Versuche mit 150 g feuchten Boden in gepackten Plexiglas-Bodensäulen von 5 cm Durchmesser und 8 cm Länge bei ungesättigten Bodenverhältnissen durchgeführt. Hierbei wurde nicht kontaminiertes Bodenmaterial oder eine Schichtung aus kontaminiertem und nicht kontaminiertem Bodenmaterial eingesetzt. Das Porenvolumen lag zwischen 22 und 50 % und wurde 3-fach beregnet.

Volz (1995) setzte in seinen Arbeiten mit gefüllten 20 cm Säulen bei gleichmäßiger TNT-Dotierung einen schluffigen Sand mit unterschiedlichen Zuschlägen an Ton und/oder Kompost ein, um den Einfluss der Zuschlagsstoffe zu untersuchen. In einer weiteren Versuchsreihe wurden 25 cm belastete, ungestörte Böden aus Stadtallendorf in Säulen perkoliert. Zudem wurden unbelastete, ungestörte Böden mit steigenden TNT-Mengen dotiert. Die Versuche fanden unter weitgehend gesättigten Bedingungen statt mit kontinuierlichem Perkulationsfluss. Die Arbeiten von Volz (1995) mit teils ungestörten kleinen Bodensäulen und einer Feststoffdotierung kommen dem hier vorliegenden Versuchsansatz am nächsten.

Hildenbrand / Luckner (1995) beschreiben laborativ das Migrationsverhalten sprengstofftypischer Verbindungen unter aeroben Verhältnissen in 50 cm lange Säulen, gefüllt mit Fein- und Mittelsanden aus Grundwasserleitern.

Selim et al. (1995) untersuchten das Transportverhalten von TNT in mit Boden oder mit einem Sand-Bentonit gepackten Säulen unter ständigem Fluss.

Hennecke (2008, 2008b) beschreibt an zwei Rüstungsaltslastenstandorten zweijährige Lysimeterversuche der zurückliegenden Jahre. Bei dem Boden in den 1,20 m langen Säulen vom Standorten Torgau / Elsnig handelt es sich um einen sandigen, humusarmen Boden eines Brandplatzes mit extrem hohen TNT-Gehalten von 1 bis zu 10 g (!) / kg Boden sowie um den gleichen, aber unbelasteten Boden, der mit 20 cm belasteten Boden überdeckt wurde und somit ebenfalls sehr hohe Gehalte an STV erreicht. Die beiden sandigen Böden aus dem Standort Stadtallendorf stammen aus dem Bereich der „Tri-Halde“ und sind ebenfalls stark belastet (25–100 mg TNT / kg). Auf den schwach belasteten Boden aus der Münchbachau wurde zusätzlich eine hochkontaminierte Bodenschicht mit MNT und DNT dotiert.

Das LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2009) hat großmaßstäbige Perkolationsversuche an gefüllten 1, 2 und 3 m langen Stahlsäulen mit belastetem Boden durchgeführt. Hauptziel war es, verschiedene Untersuchungsmethoden miteinander zu vergleichen. An den unterschiedlich langen Säulen sollte die Auslaufkonzentration ermittelt werden, um diese mit der Transportstrecke und weiteren Labor- und Felddaten zu korrelieren.

In den Arbeiten von Jänig (2018) wurden großmaßstäbige Säulenversuche durchgeführt, mit ungestörten Böden aus Kernbohrungen. Die überwiegend sandigen, bis reinsandigen Böden mit (geringen) Tonanteilen wurden mit belastetem Grundwasser perkoliert, mit einem 100-fach höherem hydraulischen Gradienten als er am Standort vorliegt. Die Ergebnisse zur Retardationsbestimmung dienen dem Verständnis und der Prognose der seit 1918–1922 entstandenen Ausbreitungsfahne im Rahmen der Versickerung von Delorationswässern (TNT, DNT und DNB). Gerade auf die geringe Datendichte von Langzeitstudien wird durch Jänig (2018: 226) hingewiesen: „... da vergleichbare Untersuchungen hinsichtlich Umfang der NAV, Vergleichbarkeit mit jahrelangen Datensätzen aus situ-Bedingungen sowie die hohe Standortbezogenheit in dieser umfassenden Art ... bislang nicht durchgeführt bzw. zumindest nicht veröffentlicht wurden.“

Das Ziel mancher zumeist projektbezogenen Arbeiten ist es auch, das laborativ ermittelte Transportverhalten in ein Simulationsmodell zu überführen, um hieraus eine Gefährdungsabschätzung und eine Prognose über die weitere Stoffausbreitung geben zu können:

Auf dem Rüstungsaltslastenstandort Torgau-Elsnig wird unter Mitarbeit von Tränckner die Mobilität des Sprengstoffes RDX untersucht (GFI 2008). Die 10 cm * 50 cm Edelstahlsäulen werden in den Versuchsreihen von unten nach oben bewässert, also unter gesättigten Verhältnissen, mit einer Fließrate von 0,5 m / d. Kontaminiertes Bodenmaterial wurde nass eingebaut und verfestigt. Ähnliche gesättigte Säulenversuche erfolgten am Standort Stadtallendorf am Festgestein des Buntsandsteins, u.a. mit TNT, um das Sorptions- und Transportverhalten zu untersuchen (HMfUeLuV 2009). Am gleichen Standort, in der Kleinniederung, wurden an unbelasteten Auelehmen und Auensedimenten das Transport- und Abbauverhalten untersucht sowie die Möglichkeit der Eluation mit Alkoholen. Im Fokus standen hierbei die polaren sprengstofftypischen Verbindungen wie 2-MNT (HMfUeLuV 2009).

Einen ganz anderen methodischen Untersuchungsansatz, jedoch mit gleicher Blickrichtung auf das Transportverhalten von Nitroaromaten in belasteten Böden eines Rüstungsaltslastenstandortes und einer abschließenden Gefährdungsabschätzung geben folgende Arbeiten:

Szöcs (1999) hat an mehreren belasteten Böden am Rüstungsaltslastenstandort Stadtallendorf auf dem DAG-Gelände Boden- und Sickerwasser mit Hilfe von Saugkerzen und mit Trichterlysimetern gewonnen. Hierbei wurde gleichzeitig versucht, einen witterungsbedingten Einfluss auf die Nitroaromatenkonzentration und die NA-Fracht herauszuarbeiten, weshalb Niederschlags- und Wetterdaten mit aufgezeichnet wurden.

Bausinger (2007) hat ebenso mit Saugkerzen die Bodenlösung belasteter Flächen auf dem Rüstungsaltslastenstandort der Espagit AG in Hallschlag zwei Jahre lang untersucht. Die Kli-

madaten wurden ebenfalls aufgenommen, um einen Witterungseinfluss herausarbeiten zu können.

Mit der Korngrößenabhängigen Lösungskinetik hat sich Thiel (1996) beschäftigt. Hierbei wurden 3 verschiedene Korngrößen von TNT in kleinen 10 * 10 cm mit Quarzsand gefüllten Säulen unter naturnahen, variierenden, ungesättigten Bedingungen untersucht. Auch die Lösungskinetik von alten TNT-Fundstücken wurde mit frisch hergestelltem Material verglichen. In den letzten Jahren wird vermehrt ein Augenmerk auf größere Sprengstoffrückstände auf und im Boden gelegt. Das LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2009b) hat für die Erarbeitung einer Arbeitshilfe gezielt Sprengplätze untersucht und hier auch erkennbare Sprengmittelrückstände gefunden. In Goletz et al. (2019) werden die Möglichkeiten zur Absiebung von Kampfmittelbruchstücken größer 2 cm genannt. Das LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2009c) hat kleine Versuchssäulen mit Sand und größeren Sprengstoffbrocken gefüllt und anschließend Eluationsversuche mittels Handbesprühung durchgeführt. Die Eluationsergebnisse wurden auf die Sprengstoffoberfläche umgerechnet, um einen standortbezogenen Austragswert zu erhalten.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Problemstellung

Im Zusammenhang mit der Grund- und Trinkwasserbelastung wird immer wieder auch der „Natural Attenuation“ (NA), der natürliche Abbau und Rückhalt von Schadstoffen im Boden diskutiert. Zusammen mit den toxikologischen Bewertungen, den Bodenprüfwerten und den Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser sowie den toxikologisch begründeten und nicht begründeten Vorsorgewerten im Trinkwasser wird versucht, bei Sanierungen eine geeignete Belastungsgröße herauszufinden, die im Boden verbleiben kann, ohne das Grund- und Trinkwasser mittel- und langfristig übermäßig zu belasten. Ab welchem Bodenbelastungswert soll saniert werden? In Stadtallendorf lag dieser Grenzwert zum Zeitpunkt der Sanierung für gering belastete Böden in Höhe des Prüfwertes ($> 1 \text{ mg TNT-TE} / \text{kg Boden}$) bis hin zum nutzungsbezogenen Eingreifwert von beispielsweise $20 \text{ mg TNT-TE} / \text{kg Boden}$ für Wohnbereiche (WEIß 2007: 2). Bei Überschreitung des nutzungsbezogenen Eingreifwertes für Boden oder bei Überschreitung des grundwasserrelevanten Eingreifwertes von beispielsweise $50 \text{ mg} / \text{kg}$ (Summe NA) wurde der Boden saniert (KOCH et al. 2005: 248). Böden unterhalb dieser Grenzwerte wurden liegengelassen. Es gibt keine 0-Sanierung, es bleibt immer etwas auf der Fläche zurück. Bei der Quellsanierung des DAG-Geländes in Stadtallendorf wurden die Schadstoffe zu etwa 80 % beseitigt und die prognostizierte Zeit bis zum Erreichen von Sanierungszielen (GFS, GOW) beträgt > 250 Jahre (HMFUELUV 2009: VIII).

Was passiert auf den Sprengplätzen und den vielen kleineren ähnlich belasteten Flächen, auf den überwiegend eine oberflächliche oder oberflächennahe Sprengstoffkontamination in Form von Feststoffbruchstücken vorliegt? Teils erscheint eine flächige Bodensanierung auf diesen Flächen aufgrund heterogener, nesterartiger Punktbelastungen zu kostenintensiv.

Zielsetzung

Genau an diesen Punkten setzt einer der Untersuchungsschwerpunkte der Lysimeterversuche an. Es werden unbelastete Böden mit relativ geringen Mengen mit TNT kontaminiert, in einem Belastungsbereich, der häufig unter dem Sanierungsgrenzwert liegt. Die Freilandversuche als auch der überwiegende Teil der Laborsäulen wurde mit $2 \text{ mg TNT} / \text{cm}^2$ dotiert. Dies entspricht einer Menge von $13 \text{ mg TNT} / \text{kg Boden}$ (große Versuchssäulen 100 cm) bis zu $40 \text{ mg TNT} / \text{kg Boden}$ (kleine Versuchssäulen 35 cm).

Z 1: Was passiert bei einer relativ geringen Kontamination nach der Durchströmung einer natürlichen Bodensäule im Initialstadium?

Z 2: Mit welchen Belastungen ist im Auslauf in 1 m Tiefe zu rechnen?

Z 3: Welche Transformationsprozesse greifen, bevor das belastete Sickerwasser die belebte Bodenzone verlässt und in die relativ unbelebtere Schicht der (beispielsweise) Sande und des Festgesteins gelangt?

Z 4: Welche Unterschiede zeigen sich bei belasteten, im Vergleich zu unbelasteten Böden?

„Aufgrund ihrer Ökotoxizität (...) ist es für die Abschätzung des Gefährdungspotentials für das Grundwasser von Bedeutung, den Kontaminationspfad dieser Stoffe von ihrem Eintrag in den Oberboden bis hin zur gesättigten Zone zu betrachten und ihre Mobilität oberhalb des Grundwassers zu untersuchen (WOLFF-BOENISCH et al. 1996: 63).“

Ein Hauptziel ist eine Langzeituntersuchung an unbelasteten natürlichen Böden in großmaßstäblichen Säulenversuchen unter natürlichen Bedingungen (Freilandversuch) mit einer TNT-Dotierungsform als Festsubstanz durchzuführen. Sorptionskoeffizienten werden nach 24 Stunden-Versuchen bestimmt, unbeachtet der Tatsache, dass die Stoffe z.T. schon 50 Jahre in der Umwelt verweilen (COMFORT et al. 1995: 1174).

Auch der **Aspekt der gezielten Berechnungsunterbrechungen** über längere Zeiträume hinweg ist bislang unzureichend beachtet worden und **soll in einer eigenen Versuchsreihe neuere Erkenntnisse liefern**. Ebenso fehlen tiefergehende Untersuchungen zur **Lösungskinetik von TNT**, welche für das Verständnis zum Transportverhalten jedoch unumgänglich sind.

Das Transport- und insbesondere das Umweltverhalten von TNT und weiteren Nitroaromaten soll sowohl unter Labor-, als aber auch unter Freilandbedingungen näher untersucht werden. „..., dass die aus Laborversuchen bekannten Konkurrenzreaktionen zwischen Mikroorganismengruppen, deren Existenz, das quantitative Verhältnis sowie deren räumliche und zeitliche Verteilung unter Feldbedingungen nur grob bekannt sind bzw. nicht gemessen werden können. Schließlich existieren noch Wissenslücken bzgl. des funktionalen Zusammenhanges von am Standort nachgewiesenen Mikroorganismen und tatsächlich stattfindendem Abbau (GRANDEL et al. 2003: 60).“ TNT-metabolisierende Bakterien lassen sich sowohl aus gering belasteten Böden (1–10 mg TNT / kg Boden) als auch aus hoch belasteten Standorten (> 20 mg TNT / kg Boden) isolieren (BREITUNG et al. 1995: 198). TNT-Abbauraten von bis zu 99% innerhalb von 14 Tagen wurden bei in vitro-Versuchen erzielt, während die Abbauraten im Freiland nicht abgeschätzt werden können (NEUMEIER et al. 1989: 36).

Lassen sich witterungs- und niederschlagsbedingte Einflüsse bei der TNT-Mobilität in den verschiedenen Bodentypen herauslesen? In der Natur laufen klima- und standortbedingt weit komplexere Reaktionen ab, als dies unter Laborbedingungen der Fall ist. Thermophile Mikroorganismen zum Beispiel werden nur in Gegenwart von Kompost ihre Arbeit aufnehmen. Eine Sprengstoffverlagerung in gelöster Form zeigt ein anderes Mobilitätsverhalten als in einem Standort mit Kontaminationen in fester Form. Derartige Ergebnisse sind daher nicht ohne Weiteres auf die natürlichen Gegebenheiten des Naturraumes anwendbar. Der Untersuchungsansatz hat nicht das **Ziel**, einzelne Teilprozesse im Boden dezidiert zu untersuchen und zu erklären, sondern **den natürlichen Boden als Komplexsystem zu belassen und ihn als solches mit einem geosystematisch – geographischen Gesamtansatz zu bewerten**. Die Komplexität der Natur ist schwer zu fassen. Allein die unterschiedlichen Prozesse und Mechanismen, die bei unterschiedlichen TNT-Konzentrationen im Boden ablaufen, sind in einem verallgemeinernden Berechnungsmodell unter ungesättigten Verhältnissen kaum realitätsgenau berechenbar.

Untersuchungsansatz und Fragestellungen

Um überhaupt Säulen- und Lysimeterversuche durchführen zu können, muss zuvor eine geeignete Methode zur Probenentnahme für ungestörte Bodensäulen entwickelt werden. Es soll ein aussagekräftiges, möglichst großes Bodenprofil mit einfachen Mitteln gewonnen werden. Der „ungestörte“ Boden, mit all seinen charakteristischen Eigenschaften steht im Mittelpunkt der Betrachtungen.

In jeder Versuchsreihe stammt jeweils eine Bodensäule aus dem DAG-Gelände der Rüstungsaltlast Stadtallendorf und ist entsprechend bereits mit Nitroaromaten vorbelastet. Der Einfluss dieser Vorbelastung soll bezüglich des Transport- und Umweltverhaltens untersucht werden. Lassen sich vielleicht im Anschluss die Ergebnisse von einzelnen Versuchsreihen auch modellhaft für ungesättigte Bodenverhältnisse darstellen? Im Einzelnen soll mit fünf unterschiedlichen Versuchsreihen und verschiedenen Bodentypen nachfolgende Fragestellungen und Ziele verfolgt werden:

- [1] In einem 3-jährigen Freilandversuch wird das Umwelt- und Transportverhalten von TNT in fester Form auf sechs sehr verschiedenartigen Bodentypen in 1 m-Säulen unter natürlichen Witterungsbedingungen beobachtet und bewertet. Der Kernpunkt ist hierbei, die Unterschiede der einzelnen Bodentypen bezüglich der Mobilität von TNT herauszuarbeiten. Welchen Einfluss hat der Witterungsverlauf auf die Schadstoffmobilität und lassen sich Gesetzmäßigkeiten erkennen? Wie hoch sind die bodentypenabhängigen Schadstoffausträge mit dem Sickerwasser, wie sieht die Verteilung am Versuchsende im Boden aus? Welche TNT-Menge und welche Metaboliten werden von Pflanzen bodenspezifisch aufgenommen?
- [2] Im Vergleich dazu soll in einem Laborversuch mit den gleichen Bodentypen (1 m-Säulen) geklärt werden, wie sich der Einfluss einer gelösten TNT-Dotierung auswirkt, bei durchgehender Beregnung von 24 mm / Tag bis zum Austausch des 3-fachen Porenvolumens.
- [3] Einer ähnlichen Fragestellung, nach dem Einfluss der gelösten TNT-Dotierung im Vergleich zur Festform-Dotierung, wird mit kleinen 30–35 cm langen Oberbodensäulen im Labormaßstab nachgegangen. Es soll geklärt werden, ob und wie stark sich der Lösungsprozess des kristallinen TNT auf die tatsächliche Verlagerung auswirkt. Was passiert mit dem Stoff, wenn er bereits gelöst vorliegt? Eine Versuchsreihe wird hierzu an fünf unterschiedlichen natürlichen Oberböden unter sonst gleichbleibenden Laborbedingungen durchgeführt.
- [4] Ein wichtiger Teilaspekt bei den ganzen Untersuchungen ist der Einfluss der Beregnungspause. Lassen sich bei jeweils verdoppelter Beregnungsunterbrechung Gesetzmäßigkeiten herauslesen oder auch berechnen? Welche Frachten und Konzentrationen werden mit dem Sickerwasser verlagert, wenn der Abstand bis zum nächsten Niederschlag (Beregnung) immer größer wird? Und ändert sich hierbei das Umbauverhalten? Ist die Verlagerung mit dem Sickerwasser rein sorptionsgesteuert oder kommt es möglicherweise zu einer Rekrystallisation der Nitroaromaten bei abnehmender Bodenlösung? Für diese Versuchsreihe wurden ebenfalls fünf verschiedenartige Oberbodensäulen von 30–35 cm Länge unter sonst gleichbleibenden Bedingungen der Feststoffdotierung immer 1 Tag lang im Labor bis zum Austausch des 3-fachen Porenvolumens beregnet. Einzige Variable ist die Beregnungsunterbrechung, bis hin zu 8 Wochen. Wie sich in den Sommern 2018 und 2019 herausstellte, mit der extremen Trockenpause also keine ungewöhnliche oder singuläre Situation.
- [5] Soweit aus anderen Forschungsergebnissen bekannt, nimmt die Konzentration in der Bodenlösung bei steigender NA-Konzentration im Boden zu (Szöcs 1999). Lassen

sich ab bestimmten Dotierungsmengen Veränderungen im Sickerwasseraustrag und im Umweltverhalten von TNT erkennen und welchen Einfluss übt die Belastungsgröße auf die Schadstoffmobilität aus? Treten Unterschiede auf, mit Erreichen oder Überschreitung der Dotierungsmenge im Verhältnis zur maximalen Bodensorptionskapazität? Durch veränderte Verhältnisse Sprengstoff – Regenmenge spielt möglicherweise die Lösungskinetik eine Rolle. Wird ein partikulärer Transport erkennbar? Auch hier wurde versucht, eine Antwort auf die Fragen mit Hilfe der kleinen Versuchssäulen unterschiedlicher Oberböden zu geben. Die Versuchsbedingungen mit Feststoffdotierung waren bei allen Säulen gleich, jedoch die Dotierung immer um den Faktor 5 erhöht.

Da bislang Freilandversuche an großmaßstäbigen Säulen mit natürlichen Böden und mit TNT als dotierter Festsubstanz nicht durchgeführt wurden, kommt diesem Untersuchungsansatz ein induktiver Charakter zu. Die Versuchsansätze zur Beregnungsunterbrechung, zur Art der Dotierung und zur steigenden Dotierungsmenge an den kleinen Versuchssäulen sind ebenfalls induktiv zu werten. Gleichfalls die Versuche mit gelöstem TNT auf den großen wie auf den kleinen Bodensäulen wurden vor dem Hintergrund eines komplexen Bodensystems so noch nicht betrachtet. Die Untersuchungen zur Lösungskinetik von TNT wurden ebenfalls induktiv durchgeführt.

Einen eher deduktiven Ansatz haben dagegen die Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit der Nitroaromaten und die Untersuchungen zur Sorptionskinetik der Böden. Überlegungen zur Methodenentwicklung eines halbquantitativen Bestimmungsverfahrens der Nitroaromaten mit einem Polarisationsmikroskop und Gedankenansätze zum optischen TNT- Nachweis und zum Verbleib von TNT im Boden ergänzen die Arbeiten.



2. Rüstungsaltslasten

2.1 Definition „Rüstungsaltslast“

„Rüstungsaltslasten“ sind als Teil des Gesamtkomplexes „Altlasten“ zu sehen. Bei einem *Altstandort* oder einer *Altlastenverdachtsfläche* muss ein hinreichender Verdacht auf eine wesentliche Beeinträchtigung des Wohles der Allgemeinheit bestehen. Erst nach positiven Untersuchungen eines Altstandortes oder einer Altablagerung, wenn sich der Verdacht bestätigt, kann dieser als „Altlast“ bezeichnet werden. „Alt-“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Anlage stillgelegt ist oder die Ablagerung von Stoffen heute nicht mehr geschieht. Gemäß § 3 Abs. 4; 5 des Bundes- Bodenschutzgesetzes (BBodSchG 1998) handelt es sich bei Altablagerungen um Bodenverunreinigungen, die durch Ablagerung von Abfällen auf stillgelegten Anlagen, Grundstücken oder sonstigen stillgelegten Aufhaltungen oder Verfüllungen entstanden sind. Einzelheiten hierzu regelt üblicherweise die Bundes- Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV 1999), welche aber keine Regelungen oder Definitionen zu dem speziellen Themenbereich Rüstungsaltslast nennt.

Unter „Rüstungsaltslasten“ gibt die Bundesregierung (vom 3.4.1991) in einer Bundestagsdrucksache alle Boden- Wasser- und Luftverunreinigungen durch Chemikalien aus konventionellen und chemischen Kampfstoffen an (PREUß 1996: 35). Dabei werden insbesondere chemische Kampfstoffe, Sprengstoffe, Brand-, Nebel- und Rauchstoffe, Treibmittel, Chemikalien, die den Kampfstoffen zur Erreichung taktischer Erfordernisse zugesetzt wurden, produktionsbedingte Vor- und Abfallprodukte sowie Rückstände aus der Vernichtung konventioneller und chemischer Kampfmittel genannt (PREUß 1992: B06-02). PREUß (1990: 9, 1996: 35) erweitert den Begriff Rüstungsaltslasten um den „*nicht der chemischen Industrie angehörenden Rüstungsbetrieben*“.

In Anlehnung an den Sachverständigenrat (1990) werden in NRW Rüstungs- und kriegsbedingte Altlasten definiert als: „...solche Flächen und Standorte ..., die sowohl infolge rüstungsbedingter Anlagen und Aktivitäten als auch ggfs. durch Kriegseinwirkungen derart kontaminiert sind, dass von ihnen Gefahren und Beeinträchtigungen für Mensch und Umwelt ausgehen (MIES / BAUER 1992: C14-01).“ Dazu gehören Standorte der Rüstungsproduktion, ehemalige militärische Anlagen, landesspezifische Industriestandorte mit kriegsbedingtem Gefährdungspotential (durch Bombenangriffe besonders betroffene Anlagen zur Herstellung und Lagerung von Treib- und Schmierstoffen).

In der Definition des Niedersächsischen Umweltministeriums wird eine Rüstungsaltslast als: „...ehemalige Betriebsflächen der Rüstungsindustrie...“ verstanden, „...die insbesondere der Herstellung und Verarbeitung von Explosiv- und Kampfstoffen und deren Vor- und Zwischenprodukten dienen, sowie kontaminierter Flächen, auf denen Kampfmittel gelagert und abgelagert wurden. Im Einzelfall können unsachgemäß entsorgte Betriebsstoffe wie Mineralölprodukte und gefährliche Reststoffe aus der unmittelbaren Produktion von Waffen und Waffenträgern der Einstufung einer Fläche als Rüstungsaltslast rechtfertigen (NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM (1991), zitiert in WOLLIN 1992: C23-01).“

In Hessen werden ehemalige Rüstungsbetriebe und kriegsbedingte militärische Einrichtungen, auf denen mit rüstungsspezifischen Stoffen umgegangen wurde, als *Rüstungsaltsstandorte* bezeichnet. Davon werden *Militärische Altstandorte* ausgegliedert, welche der militärischen Infrastruktur dienen, wie Kasernen, Depots, Flug- und Übungsplätze (HLUG 2004, 5). Das Handbuch Altlasten (Band 4, Teil 1, Historisch-deskriptive Erkundung von Rüstungsaltsstandorten) gibt Hinweise zu Rüstungsaltsstandorten. Dabei handelt es sich um Grundstücke stillgelegter Anlagen zur Produktion, Verarbeitung, Lagerung und Vernichtung von Sprengstoffen, chemischen Kampfstoffen, Treibladungspulvern, Zündmitteln, pyrotechnischen Sät-

zen sowie Brand- und Nebelmitteln. Weiterhin um Grundstücke stillgelegter Anlagen die zur Herstellung und Erprobung, Entschärfung, Delaborierung, Sprengung und Lagerung von Munition dienten (HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 1996).

Unberücksichtigt bleiben bei all diesen Aufzählungen große Bereiche mehrfach umkämpfter Gebiete, über die mehrmals die Front hinwegging oder bombardierte Gebiete, wie z.B. Städte. Müsste also ein Kriegsschauplatz als potentielle „Rüstungs-“Altlast angesehen werden? Stellvertretend für ein stark umkämpftes Gebiet wäre das Oderbruch bei Seelow zu nennen, wo in den letzten Kriegswochen des II. Weltkrieges die letzte große Materialschlacht stattfand. In den feuchten Niederungen der Oder dürften noch viele Blindgänger liegen. Hinzu kommen Belastungen von nicht explodierten Sprengstoffen (PREUß 1990: 25). Ein Teil des Sprengstoffes wird bei der Explosion nicht umgesetzt und verbleibt als Bodenbelastung¹. Eine genaue Aufstellung der potentiellen Kontaminationsgrößen und -flächen ist bislang noch nicht erfolgt. Daten über städtische Grundwasserbelastungen mit sprengstofftypischen Verbindungen liegen nicht vor. Als weiteres Beispiel wären die Verdachtsflächen auf Hoher See und den Küstengewässern zu nennen. Dort wurden nach dem II. Weltkrieg bis zu 1 Mio. Tonnen Munition versenkt (RAPSCH 1997: 119). Heute werden dort noch Rückstände von mindestens zehntausend Tonnen vermutet (RAPSCH 1997: 120).

Es bleibt eine kontroverse Diskussion der Begriffsdefinition in Deutschland. Damit gehen Unklarheiten über Haftungs- und Finanzierungsfragen einher. Die allgemeine Truppenreduzierung in Mitteleuropa führt durch die Überlagerung von Kriegsfolgelasten mit Rüstungsaltslasten ehemaliger oder noch genutzter militärischer Liegenschaften in Deutschland zu einer inhaltlichen Erweiterung des Rüstungsbegriffes. Mit dem Begriff „*militärische Altlasten*“ werden sowohl Rüstungsaltslasten als auch konventionelle Altlasten, die aufgrund militärischer Tätigkeiten entstanden sind, bezeichnet. Mit dieser inhaltlichen Begriffserweiterung ist aber offensichtlich keine Ausdehnung des Haftungsrechts verbunden. Die daraus entstehenden juristischen Fragen sind umfassend.

Über die Verantwortlichkeit und damit über das Aufkommen für Untersuchungs- und Sanierungskosten gibt es noch Uneinigkeit zwischen Bund und Ländern. Da mit dem Verursacherprinzip die damalige Reichsregierung, zumindest für den II. Weltkrieg, nicht mehr belangt werden kann, müssen andere Institutionen dafür aufkommen. Gemäß Artikel 120 des Grundgesetzes ist die Erfassung und Beseitigung der sogenannten Kriegsfolgelasten Aufgabe des Bundes. Darunter sind solche Lasten zu verstehen, deren alleinige Ursache der II. Weltkrieg ist. Durch Herstellung, Erprobung, Vernichtung oder Ablagerung rüstungsspezifischer Stoffe entstanden Umweltschäden sind demzufolge Kriegsfolgelasten (RAPSCH 1992: C11-01). Ein Rüstungsaltslastenfinanzierungsgesetz wurde vom Bundesrat eingebracht. Der Gesetzentwurf nach § 2, Absatz 6 lautet: „Rüstungsaltslasten sind weiterhin die während des Zweiten Weltkriegs oder nach dem Zweiten Weltkrieg durch militärische Tätigkeit der alliierten Streitkräfte entstandenen Schäden oder Gefahren für ein Schutzgut. Militärische Altlasten sind eine Teilmenge der Rüstungsaltslasten (RAPSCH 1992: C11-02).“

¹ LAYTON et al. (1986, zitiert in BAUER et al. 1991: 44) gibt bei Explosionsversuchen einen Anteil an festen Kohlenstoffbestandteilen von 19 % für TNT und 2,4 % für Hexogen an. In Untersuchungen von NEWELL (1984, zitiert in BAUER et al. 1991: 47) wird auf Sprengplätzen ein TNT-Rest von 4,41 % der zur Detonation gebrachten Sprengstoffmenge in 1 m Entfernung und 50 cm Bodentiefe gefunden.