

Zusammenfassung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die ökotoxikologischen Auswirkungen von sprengstofftypischen Verbindungen auf die Lebensraumfunktion des Bodens untersucht. Als typische Vertreter für die Bodenfauna wurden die Collembole *F. candida* und die Enchytraee *E. crypticus* ausgewählt, für die standardisierte Testverfahren entwickelt sind. Mit Hilfe der Tests wurden die folgenden Fragestellungen untersucht:

- Toxizität der Sprengstoffe TNT, Hexyl, Hexogen (RDX) und Octogen (HMX), sowie von Triaminotoluol (TAT), dem Endprodukt des reduktiven mikrobiellen Abbaus von TNT, im Standardboden Lufa 2.2
- Einfluß der Bodenart auf die Toxizität von TNT mit vier unbelasteten Referenzböden unterschiedlichen Ton- und organischen Kohlenstoffgehalts
- Einfluß der Alterung von TNT im Standardboden Lufa 2.2 auf die Collembole
- Toxizität von nutzungsbedingt belasteten Böden auf beide Testorganismen
- Erfolg verschiedener Sanierungsverfahren für beide Testorganismen.

Die Toxizität der **Reinsubstanzen** wurde mit Hilfe von drei verschiedenen Testverfahren beurteilt, nämlich dem Mortalitätstest, dem Reproduktionstest, sowie einem Verhaltenstest, bei dem die Tiere zwischen unkontaminierten und kontaminiertem Bodenmaterial wählen können. Für die untersuchten Testsubstanzen ergaben sich folgende Ergebnisse:

Tabelle11-1 Toxizität der Reinsubstanzen im Boden für *F. candida* und *E. crypticus*

Substanz	<i>F. candida</i>		<i>E. crypticus</i>	
	Mortalitäts- und Reproduktionstest			
	LC50(7d) in mg/kg TM ¹	EC50(28d) in mg/kg TM	LC50(7d) in mg/kg TM	EC50(28d) in mg/kg TM
TNT	139,9 ± 9,4	64,3 ± 22,4	949,9 ± 617,8	501,2 ± 278,3
Hexyl	> 4000	175,6 ± 39,6	2402,8 ± 56,2	530,4
Hexogen	> 8000	> 8000	> 8000	> 8000
Octogen	> 8000	> 8000	> 8000	> 8000
TAT	> 2000	> 2000	> 2000	1324,6
	Wahlversuche			
	Meidung	Flucht	Meidung	Flucht
TNT	keine Signifikanz		50 mg/kg TM	keine Flucht
TNT 7d	nicht getestet		100 mg/kg TM	50 mg/kg TM
Hexyl	keine Signifikanz	keine Flucht ≥ 100 mg/kg TM	150 mg/kg TM	50 mg/kg TM
Hexogen	keine Signifikanz		keine Signifikanz	
Octogen	keine Signifikanz		keine Signifikanz	
TAT	keine Signifikanz		1000 mg/kg TM	2000 mg/kg TM

¹ TM: Trockenmasse

Von den überprüften Substanzen wirkt TNT toxischer auf *F. candida* und *E. crypticus* als die Sprengstoffe Hexyl, Hexogen, Octogen und TAT. Hexyl reduziert nur die Reproduktion der Collemböle ohne eine letale Wirkung zu zeigen. Der starke Effekt auf die Reproduktion ist jedoch nicht auf eine verringerte Fertilität zurückzuführen, sondern auf eine erhöhte Sterblichkeit der Juvenilen. Bei der Enchytraee wirkt Hexyl in hohen Konzentrationen letal, ist aber im Reproduktionstest weniger toxisch als für die Collemböle. Die Reproduktionstoxizität kann auf eine reduzierte Kokonablage und eine geringere Schlupfrate zurückgeführt werden. Octogen (HMX) und Hexogen (RDX) sind für beide Versuchsorganismen untoxisch. TAT ist im Bodentest nur für *E. crypticus* reproduktionstoxisch und zeigt bei der Collemböle keine Wirkung, auch nicht im Kontakt- oder Wassertest. Im Wassertest wird die Enchytraee bereits bei sehr geringen Konzentrationen beeinträchtigt, was auf eine hohe Sorption von TAT an die Bodenmatrix schließen läßt. Generell sind die Tiere im Reproduktionstest sensitiver als im Mortalitätstest. Im Verhaltenstest reagiert die Enchytraee sogar noch sensitiver als im Mortalitätstest. Die Collemböle dagegen scheint nicht in der Lage die untersuchten Substanzen wahrzunehmen, da sie im Verhaltenstest nicht reagiert.

In den **Referenzböden** vermehren sich beide Testorganismen unterschiedlich stark. Beeinträchtigt ist die Reproduktion besonders dann, wenn das Bodenmaterial klumpig vorliegt. Zudem ist die Mortalität der Collemböle in solchen Böden im Vergleich zum feinstrukturierten Standardboden Lufa 2.2 hoch. Die klumpige Bodenstruktur ist eine Folge der gewählten Bodenfeuchte, die in allen Ansätzen 60% der maximalen Wasserhaltekapazität (MWK) entsprach. Es müssen also für alle Bodenproben spezifische Feuchten gewählt werden, wenn eine maximale Reproduktion erreicht werden soll. Dafür spricht auch die geringe Vermehrung von *E. crypticus* in einer Blumenerde. Dieser torfige Boden hatte eine sehr hohe MWK und schien nach der Einstellung des Wassergehaltes auf 60% der MWK noch zu trocken zu sein. Die Vermehrung der beiden Testorganismen in diesen unkontaminierten Referenzböden scheint noch von weiteren Faktoren beeinflusst zu sein, die nicht definiert werden können.

Die Referenzböden unterscheiden sich in ihren Gehalten an Ton und organischen Kohlenstoff (C_{org}) von dem üblichen Standardboden Lufa 2.2, einem lehmigen Sand. TNT ist am wenigsten toxisch in einer Blumenerde, die sich durch den höchsten Gehalt an organischem Kohlenstoff (23%) auszeichnet. In diesem Boden steigen die LC50- und EC50-Werte für *F. candida* auf das 10-11-fache der in Lufa 2.2 ermittelten Werte an und auf das 6-fache für *E. crypticus*. Dagegen ist TNT in dem schluffigen Lehm Lufa 2.3 mit dem geringsten Gehalt an C_{org} von 0,7% am toxischsten. Die LC50- und EC50-Werte verringern sich in diesem Boden im Vergleich zu Lufa 2.2 für die Collemböle auf 75% beziehungsweise 37% und für die Enchytraee auf 67% beziehungsweise 55%. Für die anderen

Bodenmaterialen korreliert der Unterschied in der Toxizität mit dem Tongehalt in der Reihenfolge Lufa 2.2 (6,7% Ton), Lufa 3 (9,6% Ton) und Lufa 4 (24,47% Ton). Ein mathematisch definierbarer Zusammenhang zwischen der Toxizität und dem Gehalt an Ton beziehungsweise dem Gehalt an organischem Kohlenstoff oder dem Verhältnis Ton zu C_{org} kann nicht aufgestellt werden.

Eine zeitabhängige Abnahme der Toxizität von TNT wurde in den Versuchen zur **Alterung** nachgewiesen. Das Ausmaß der Abnahme ist bei höheren Temperatur größer als bei niedrigen. Bei einer Ausgangskonzentration von 300 mg TNT/kg TM ist nach zwei Monaten Alterung bei 20° C keine Mortalität und nach vier Monaten Alterung keine Einschränkung der Reproduktion mehr zu beobachten. Bei einer Alterungstemperatur von 4° C dagegen ist sowohl die Mortalität als auch die Reproduktion nach sechs Monaten Alterung noch signifikant verschieden zur Kontrolle. Der Grund dafür ist wahrscheinlich die Temperaturabhängigkeit der mikrobiellen Aktivität.

Die Toxizität von TNT in **nutzungsbedingt belasteten Böden** wurde für drei Böden der TNT-Produktionsstätte „Werk Tanne“ bei Clausthal Zellerfeld in Niedersachsen untersucht (CTNT1a mit 1600 mg TNT/kg TM, CTNT2a mit 2500 mg TNT/kg TM, CTNT4a mit 3100 mg TNT/kg TM). Weiterhin stand ein Bodenmaterial vom Brandplatz des Rüstungsaltsstandortes Elsnig bei Torgau in Sachsen (ETNTa mit 4577 mg TNT/kg TM) zur Verfügung, sowie Bodenmaterial von einer TNT-Lagerstätte in Hambühren bei Celle in Niedersachsen (LTNT1a mit 350 mg TNT/kg TM) und von der Rüstungsaltslast Stadtallendorf in Hessen (STNTa mit 15 mg TNT/kg TM). In diesen nutzungsbedingt belasteten Bodenmaterialien können die Testorganismen zum Teil weit höhere Konzentrationen an Explosivstoffen überleben und sich darin vermehren als in den aufdotierten Bodenmaterialien. Die Toxizität der Böden variiert dabei mit ihrem Gehalt an Ton und organischer Materie. Eine Ausnahme bildet STNTa, dessen hohe Toxizität auf die Reproduktion beider Testorganismen nicht mit dem TNT-Gehalt erklärt werden kann, sondern vermutlich auf die klumpige Bodenstruktur zurückzuführen ist. Dieser Boden wurde daher nicht weiter untersucht. Die verringerte Toxizität der anderen Böden ist vermutlich durch die lange Alterungsperiode von mehr als 50 Jahren bedingt. Für die beiden Testorganismen ergibt sich folgende Reihenfolge für die Toxizität der nutzungsbedingt belasteten Böden:

<i>F. candida</i>	LC50:	LTNT1a > ETNTa > CTNT1a > CTNT4a > CTNT2a
	EC50:	LTNT1a > ETNTa > CTNT1a > CTNT2a > CTNT4a
<i>E. crypticus</i>	LC50:	ETNTa > LTNT1a/CTNT1a/CTNT2a/CTNT4a
	EC50:	LTNT1a > ETNTa > CTNT1a > CTNT2a > CTNT4a

Für die **Sanierung von Rüstungsaltslasten** stehen andere Möglichkeiten als die kostenintensive Verbrennung zur Verfügung, bei der große Mengen biologisch toten Materials mit zerstörter Struktur zurückbleiben. Werden Rüstungsaltslasten in einer

Bodenwäsche gereinigt, dann fällt der Hauptanteil als wiederverwertbares Material an, und nur ein kleiner Rest muß weiterbehandelt werden, zum Beispiel durch Verbrennen. Bei der Bodenwäsche zur Sanierung des Bodenmaterials LTNT1a von der Lagerstätte in Hambühren konnte der durch Verbrennung zu entsorgende Anteil des Bodenmaterials auf 13,6% verringert werden, die restlichen 86,4% sind dagegen für die Verwendung als Bausubstanzen geeignet.

Auch biologische Verfahren bieten eine Alternative zur Verbrennung. Im Rahmen eines Projektes des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wurde im „Werk Tanne“ in Clausthal-Zellerfeld in Niedersachsen die biologische Sanierung im großtechnischen Maßstab erprobt. Eine vollständige Transformierung des TNT ist mit Hilfe von Weißfäulnispilzen möglich. Ein Boden, der auf diese Art saniert wurde (CTNT2a), ist jedoch nach der Sanierung toxischer für beide Testtiere als zuvor. Dies könnte auf die Wirkung von Schwermetallen, von Abbauprodukten des TNT oder auf die Zersetzungsprodukte der Zuschlagsstoffe zurückzuführen sein. Eine Lagerung des Materials im Anschluß an die Sanierung könnte die Lebensraumfunktion des Bodens in Bezug auf die Abbauprodukte verbessern.

Das Endprodukt der mikrobiellen Reduktion von TNT ist TAT, von dem bekannt ist, daß es irreversibel an die Bodenmatrix bindet. Böden, die mit autochthonen Mikroorganismen entweder durch Kompostierung (CTNT4a) oder durch ein Mietenverfahren (CTNT3a) saniert wurden, sind für beide Testorganismen nicht mehr toxisch. Auch die Sanierung von sehr hoch mit TNT und anderen Sprengstoffen belasteten Böden scheint durch autochthonen Mikroorganismen möglich zu sein, wie sich bei der noch nicht vollständig abgeschlossenen Sanierung des Bodens ETNTa vom Brandplatz in Elsnig bei Torgau in Sachsen zeigt. Die Sanierung mit Mikroorganismen oder Pilzen bietet somit eine kostengünstige Alternative zur Verbrennung und auch zur Bodenwäsche, da der gesamte sanierte Boden danach wieder verwendet werden kann. Die Verfahren sollten daher weiter entwickelt und die Langzeitwirkung der TAT-Bindung an die Bodenmatrix untersucht werden, um zu gewährleisten, daß davon keine Gefährdung der Umwelt ausgeht.

Die Arbeit zeigt, daß Biotests mit terrestrischen Invertebraten wesentlich weitergehende Informationen zur Lebensraumqualität von belasteten und sanierten Bodenmaterialien geben, als chemisch/physikalische Nachweismethoden für Schadstoffkonzentrationen. Die Beurteilung der Lebensraumfunktion durch Biotests mit terrestrischen Invertebraten muß allerdings durch Biotests mit Pflanzen und Mikroorganismen, durch Tests zur Rückhaltefunktion des Bodens und durch Tests zur Genotoxizität vervollständigt werden, um schlüssige Aussagen zur Qualität des Bodenmaterials und damit zu seiner Verwendbarkeit/Wiederverwendbarkeit zu geben.