TP 5.6.: Dendrotoleranz gegenüber STV in Altlastböden und Langzeitschicksal von [^{14}C]-Trinitrotoluol und [^{14}C]-Hexogen in Nadelgehölzen

B. Schoenmuth[1], W. Pestemer[2], C. Buettner[1]

[1] Humboldt-Universität zu Berlin, LGF, IGW, Fachgebiet Phytomedizin, D-14195 Berlin, berndschoenmuth@yahoo.de, carmen.buettner@agrar.hu-berlin.de
[2] Institut für Ökotoxikologie und Ökochemie im Pflanzenschutz, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, D-14195 Berlin, w.pestemer@bba.de

Einleitung

Jahrzehntelang andauerndes Auswaschen aus partikulären und sorptiv gebundenen Boden-Vorkommen des Rüstungsschadstoffes 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) und die großflächige Verteilung von Rückständen weiterer sprengstofftypischer Verbindungen (STV), wie z.B. Hexogen (RDX) über Tausende von Hektaren auf ehemals, aber auch auf gegenwärtig genutzten Militärliegenschaften rufen nach nachhaltigen, großflächigen und bezahlbaren Handlungsstrategien.

Das Nutzungspotenzial von Bäumen zur nachdauernden Abschwächung der Kontamination belasteter Böden („Dendroremediation“) soll im Mittelpunkt der geplanten Untersuchungen stehen. Als pflanzliche Untersuchungsobjekte sollen vorzugsweise ältere Nadelgehölze der Gattung *Picea* (Fichten) dienen, die standorttypisch für die Rüstungsaltlast „Tanne“ bei Clausthal-Zellerfeld und auch für viele andere Militärstandorte sind.

Über die TNT-Abbaupotenz von älteren Nadelgehölzen liegen bisher fast ausschließlich Erfahrungen aus unserer Arbeitsgruppe vor (Schoenmuth, 2002). Die durchzuführenden Experimente sind in unser bisheriges TNT-Dendroremediations-Ergebnisnetzwerk (Schoenmuth und Pestemer, 2004a, s.a. Abb. 1) eingebettet und werden um den sprengstofftypischen Schadstoff RDX ergänzt.

Die Datenlage zur Dendroremediation von Explosivstoffen, insbesondere zu Arbeiten mit Nadelgehölzen ist – im Vergleich zu TNT-Phytoremediationsarbeiten mit krautigen Pflanzen – als eher spärlich einzuschätzen. Es ist nahe liegend, dass der Großteil von Sprengstoff-Produktionsstandorten, Füllstellen und von auch militärischen Munitions-Testgeländen aus Tarnungsgründen in nadelwaldreichen Gegenden angelegt worden ist. Diese jetzigen Altlastenflächen sind auch heute zu einem hohen Anteil bewaldet. Die auf ehemals und gegenwärtig militärisch genutzten Liegenschaften diffus im Boden verteilten sprengstofftypischen Verbindungen (STV) stellen ein Gefahrenpotenzial für Boden und Trinkwasser dar (Talmage et al., 1999). Aber auch Risiken für die Holznutzung dieser Flächen sind bisher nicht ausgeschlossen. Hervorzuheben ist darüber hinaus die Großflächigkeit der Sprengstoffbelastungen und die Persistenz der Rüstungsschadstoffe, beispielsweise des TNTs.

Boden-Sanierungen mit physikalisch-chemischen, wie auch biologischen *ex-situ*-Verfahren sind aus Kostengründen nur punktuell möglich. Auch dem Einsatz von Bodenhomogenisierungsmethoden für den Oberboden („land farming“) und der Nutzung von Phytoremediationspflanzungen sind enge ökonomische Grenzen gesetzt.

Basierend auf dem internationalen Erfahrungsvorsprung unserer Arbeitsgruppe zum TNT-Sanierungspotenzial von älteren Laub- und Nadelgehölzen (Dendroremediationspotenzial, Schoenmuth 2002, Schoenmuth und Pestemer, 2004a, 2004b) sind vertiefende Untersuchungen zum natürlichen Rückhalt und zum Selbstreinigungsvermögen von Altlastwäldern zwingend notwendig, um das natürliche Potenzial bestehender Wälder

mehrfach nutzen zu können. Die Nutzung der natürlichen Bodenreinigungsmöglichkeiten durch Bäume, die Minderung der Schadstoffeinwaschung in Grund- und Oberflächenwässer durch Gehölztranspiration und Kronenrückhalt, die Nutzung der Holzressourcen als nachwachsende stoffliche Rohstoffquelle und die strategische Aufwertung von Wäldern als erneuerbare Energiequelle sind Elemente nachhaltiger Landnutzung. Als Bestandteile „grüner“ Strategien sind sie volkswirtschaftlich von hohem Wert und finden in ihrer Einflussnahme auf landschaftsästhetische Umweltgestaltungen gesellschaftliches Interesse und öffentliche Akzeptanz.

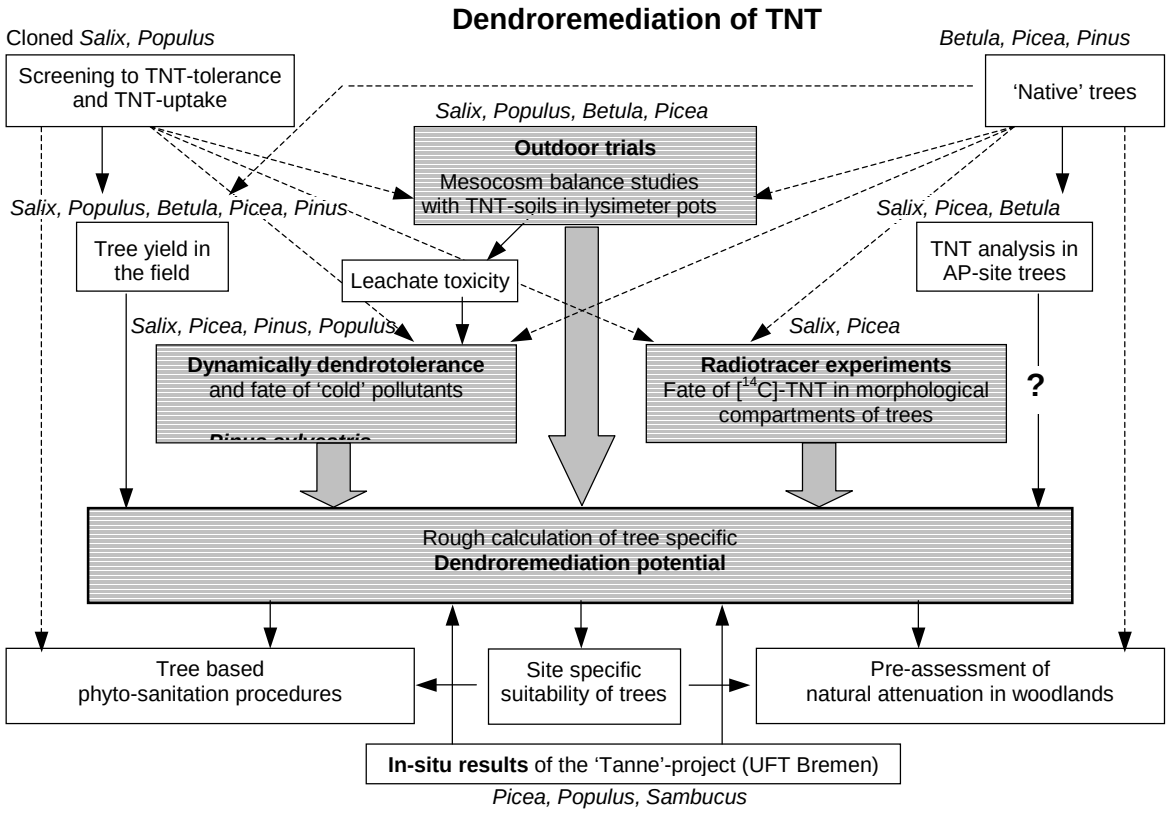


Abb. 1 Dendroremediations-Ergebnisnetzwerk (aus Schoenmuth und Pestemer, 2004a).

Ziele

1. Einschätzung der Dendrotoleranz von Nadelgehölzen gegenüber STV

Das erste Hauptziel beinhaltet die Ermittlung von Dendrotoleranzparametern von Nadelgehölzen gegenüber TNT und seinen Begleitsubstanzen (z.B. DNTs, MNTs, wenn möglich polare STV) und Hexogen (RDX). Es soll konzentrations- und massenabhängig geprüft werden, ob die Transpiration, wie bei Laubgehölzen, auch bei Nadelbäumen als dynamischer Toleranzparameter (vgl. Schoenmuth, 2002) genutzt werden kann und ob sich die Dendrotoleranz von Nadelgehölzen gegenüber STV von der Toleranz der Laubgehölze unterscheidet.

2. Langzeitschicksal von [^{14}C]-Trinitrotoluol und [^{14}C]-Hexogen in Nadelgehölzen

Zweites Hauptziel der geplanten Experimente ist die quantitative Analyse des Langzeitschicksals von ^{14}C-markiertem TNT bei und nach dessen Aufnahme und Inkorporation in ältere Nadelbäume (Fichten). Erstmalig in unserer Arbeitsgruppe bei Puls-Applikation von [^{14}C]-TNT erfolgte ^{14}C-Bilanzierungen und morphologische

Kompartimentierungen in mehrjährigen Gehölzen (Schoenmuth und Pestemer, 2000, Schoenmuth, 2002, Schoenmuth und Pestemer, 2004b) sollen jetzt unter den Bedingungen von Langzeitapplikationen von [^{14}C]-TNT erweitert bilanziert und das Schicksal TNT-bürtiger Radioaktivität im natürlichen Verrottungsprozess von Gehölzkompartimenten (vorzugsweise Wurzelholz und Nadeln, s. Abb. 2) verfolgt werden. In ähnlicher Weise soll ^{14}[C]-RDX langzeitig bilanziert werden.

Ein **Nebenziel** ist die Ermittlung des Langzeiteinflusses von Gehölzpflanzungen auf TNT/ADNT-Bodengehalte auf der Rüstungsaltlast „Tanne“ bei Clausthal-Zellerfeld (gemeinsam mit dem UFT der Universität Bremen).

3. KORA-Branchenleitfaden

Das dritte Hauptziel liegt in der Bewertung der Ergebnisse im KORA-Branchenleitfaden. Die zu erwartenden Ergebnisse sollen in Gemeinsamkeit mit den in zwei BMBF-Vorprojekten (Schoenmuth, 1996, Schoenmuth, 2002, Abb. 1) bereits erworbenen Kenntnissen und in Koordination mit den Resultaten der Teilprojekte des KORA-Themenverbundes 5 („Rüstungsaltlasten“) ganzheitlich bewertet werden. Die Bewertungen sollen als Empfehlungen für die Nutzung und den Umgang mit Gehölzen in den Leitfaden des Themenverbundes einfließen.

Es soll ein Beitrag geleistet werden zur Einschätzung und zur zielgerichteten Nutzung des Natural-Attenuation-Potenzials von vorhandenen Altlastwäldern auf Rüstungsstandorten. Ein diesbezüglicher Forschungsbedarf besteht vor allem, weil große Altlast- und -verdachtsflächen von Wäldern bereits bedeckt sind oder sich aufgelassene Militärstandorte gerade bewalden und weil für ältere Gehölze, insbesondere für Nadelbäume, bisher keine diesbezüglichen Ergebnisse anderer vorliegen.

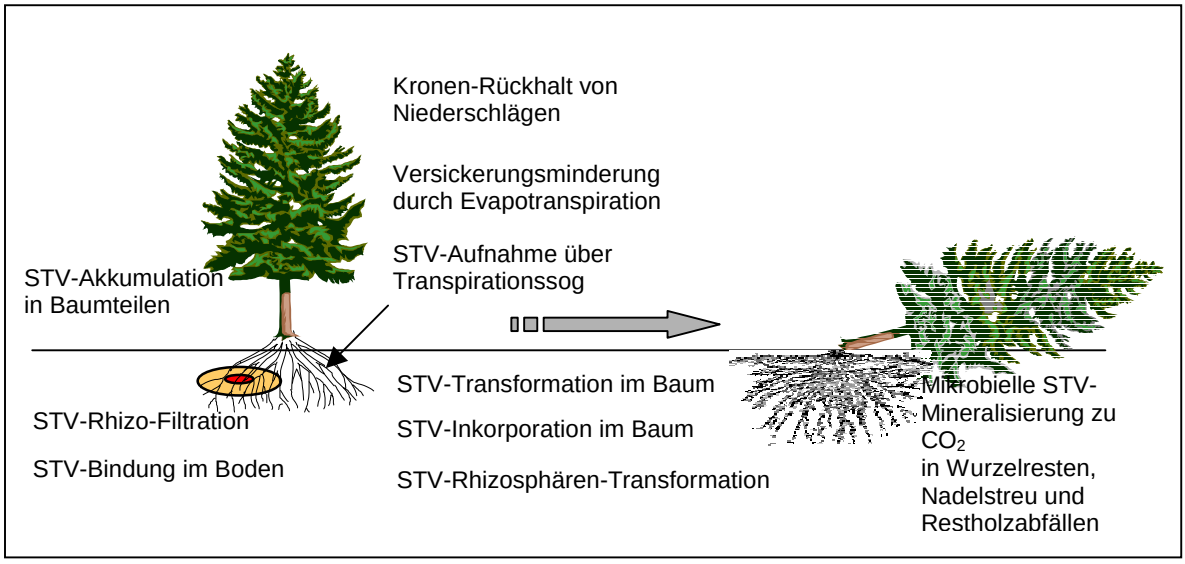
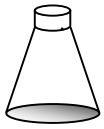
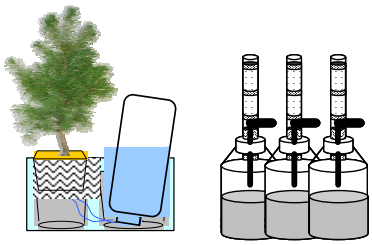


Abb. 2 STV-Schicksal im Lebenszyklus von Altlastbäumen

Vorgehensweise

Das Projekt ist in fünf Teilaufgaben unterteilt, die in der Tab. 1 zusammengefasst sind. Aus der Ressourcen-Aufteilung in Tab. 1 ist zu erkennen, dass sich die Schwerpunkte der praktischen Arbeit, entsprechend den Hauptzielen, auf die Teilaufgabe 1 „Dendrotoleranz“ (15 %) und die Teilaufgabe 4 „Langzeitschicksal“ (60 %) konzentrieren.

Tab. 1 Ressourcenaufteilung für die Teilaufgaben des Projektes

Teilaufgabe 1	**Teilaufgabe 2**	**Teilaufg. 3**	**Teilaufgabe 4**
Dendrotoleranz-Untersuchungen	Langzeitwirkung von Baumpflanzungen auf TNT-Böden	Methoden-Verbesserung	Langzeitschicksal von [^{14}C]-Trinitrotoluol und [^{14}C]-Hexogen in Nadelgehölzen
15 %	**5 %**	**5 %**	**60 %**
# DendroToleranz-Parameter für Boden/Baum-Systeme # Einfluss von Altlastböden aus Clausthal-Zellerfeld und Torgau/Elsnig	Untersuchung der Langzeiteffekte einer Fichten-Anpflanzung auf TNT/ADNT-kontaminiertem Boden in Clausthal-Zellerfeld (in Zusammenarbeit mit dem UFT der Univ. Bremen)	Methoden-Testung # Extraktions-Methoden # Docht-Applikations-systeme	Quantifizierung und Lokalisierung der Aufnahme von [^{14}C]-TNT und [^{14}C]-RDX in Nadelgehölzen und Langzeitschicksal der aufgenommenen STV in Nadelgehölzen in Rotteversuchen
			
Teilaufgabe 5: Bewertung der Ergebnisse und Beitrag für den Leitfaden **15 %**			

Teilaufgabe 1: Dendrotoleranzuntersuchungen

Zur Versuchsdurchführung sollen verschiedene Versionen der in Abb. 3 abgebildeten Dochtapplikations-Systeme getestet werden, die wir bei früheren Untersuchungen, vor allem mit Laubgehölzen erfolgreich verwendet haben (Schoenmuth 2002). Der Schadstoff (STV) wird als wässrige Lösung basal über Glasfaserdochte appliziert. Die Applikationsgeschwindigkeit wird dabei – wie unter natürlichen Bedingungen - von der Transpirationsrate der Gehölze reguliert. Gemessen wird die Evapo-Transpiration der Bäumchen durch Wägung des Gesamtsystems. Durch Wechsel der Applikationslösung nach jeder Wägung kann jeweils frische Schadstofflösung appliziert werden. Toxische Wirkungen von STV äußern sich bei Laubgehölzen in einer Transpirationshemmung (s. Schoenmuth 2002).

8-cm Topf mit 230 g Boden oder Sand

250-ml skalierter Polypropylen-Becher

2 x 1-mm-Glasfaserdochte (je 20 cm)

max. 100 ml Testlösung (TNT, RDX, u.a.)

Elektronische Waage

Abb. 3 Gravimetrische Messung der Evapo-Transpiration von Fichten und „natürliche“, fortlaufende STV-Dotierung von Fichten zur Bestimmung der Dendrotoleranz und zur Inkubation mit ^{14}C-STV

Bei der Durchführung ist eine Reihe von praktischen Problemen zu klären, wie beispielsweise solche Fragen:

1. Welche STV sind preiswert-massenverfügbar?

Folgende STV sind vorerst für die Toleranzmessungen vorgesehen: 2,4,6-TNT, 2,4-DNT, 2,6-DNT, RDX, HMX. Eventuell sind weitere STV in die Untersuchungen mit einzubeziehen.

2. Ist die Transpiration überhaupt als Messparameter zur Einschätzung der DendroToleranz für STV verwendbar?

Wenn nicht, dann müssen übliche Endpunktparameter, wie: Zweigmassenzuwachs, (also Frischmasse oder Trockenmasse) über lange Zeiträume zur Einschätzung der Dendrotoleranz herangezogen werden. Längen-Wachstumsmessungen, wie sie bei krautigen Pflanzen und Laubgehölzen möglich sind, sind im Zeitbereich von Tagen und Wochen bei Nadelgehölzen nicht durchführbar, da allgemein bekannt ist, dass Nadelbäume außerhalb des Frühjahrsaustriebes im Mai keine kurzfristig messbaren Längenzuwachsleistungen aufzeigen. Wenn die Transpiration als Toxizitäts-/Toleranzparameter nutzbar ist, kann zur nächsten Frage weitergegangen werden.

3. Ist die Toleranz gegenüber STV bei Nadelbäumen höher als bei Laubbäumen?

Wenn ja, erfolgt im KORA-Leitfaden die Empfehlung für Bevorzugung von Nadelhölzern für Rüstungsaltlastwälder. Wenn nein, erfolgt die Empfehlung für den ökologischen Waldumbau von Nadelwald-Monokulturen durch Einpflanzen von Laubhölzern.

Teilaufgabe 2: Standortboden-Beprobungen in Clausthal-Zellerfeld

Als Versuchsgebiet soll eine Experimentalfläche der Universität Bremen auf dem Gelände des ehemaligen Werkes „Tanne“ genutzt werden. Hier wurden im Mai 1999 Fichten, Zitterpappeln und Holunder auf TNT/ADNT-kontaminiertem Boden angepflanzt. Zielstellung war u.a., die Phytoremediationswirkung der Gehölze in einem Dreijahres-Projekt zu testen. Die Fläche wurde letztmalig im Jahre 2001 durch die Universität Bremen beprobt. Untersuchte STV in Boden und Sickerwasser waren TNT, 4-ADNT und 2-ADNT. Polare STV wurden damals weder im Boden noch in der Bodenlösung gefunden. Durch den Einfluss der Gehölze war eine Tendenz zum allmählichen Schadstoffrückgang beobachtet worden. Die Fichten sind jetzt 1 m hoch und der Bestand ist geschlossen. Unsere Zielstellung ist, gemeinsam mit dem UFT Bremen, jetzt die Langzeitwirkung der Gehölzbepflanzung auf den STV-Gehalt des Bodens zu ermitteln. Dazu sind Bodenbeprobungen auf STV, eventuell auch Saugkerzenmessungen, geplant.

Wir wollen darüber hinaus den Wachstumsstatus der oberirdischen Biomasse der Bäume ermitteln, um daraus auf die Wurzelmasse zu schließen. Daraus soll in Querverbindung mit den ^{14}C-Verbleibsuntersuchungen der Teilaufgabe 4 das Dendroremediationspotenzial berechnet werden, um Natural-Attenuation-Leistungen der Bäume zu quantifizieren.

Teilaufgabe 3: Methodenverbesserung

Hier gilt es, die für Laubgehölze entwickelten Dochtapplikationssysteme an Nadelgehölze anzupassen. Des weiteren sollen Extraktionsverfahren für STV aus holzigen Geweben und die Pflanzenextrakt-Analytik optimiert werden. Für Vergleichsuntersuchungen und um in Pilotversuchen teure Gehölze zu sparen, soll ein spezieller Kresse-Transpirationstest für Phytotoxizitätsuntersuchungen an STV entwickelt werden. Weitere Zielstellungen dieser Biotestentwicklung sind einfache und kostengünstige Handhabbarkeit, Möglichkeit der dynamischen Schadstoffapplikation, Anwendbarkeit für die Umweltkompartimente Wasser und Boden und Erweiterbarkeit auf andere Schadstoffe, die im KORA-Verbund bearbeitet werden. Bei Eignung des Testes könnte dieser in den KORA-Methodenkatalog aufgenommen werden.

Teilaufgabe 4: Langzeitschicksal von [^{14}C]-Trinitrotoluol und [^{14}C]-Hexogen in Nadelgehölzen

Für die „dynamische“ Dotierung der Gehölze mit ^{14}C-STV sind die Dochtapplikationssysteme aus der Teilaufgabe 1 vorgesehen (s. Abb. 3).

Teilaufgabe 4a: Vorläufiger Verbleib von ^{14}C-TNT und ^{14}C-RDX

Wir möchten hier als vorläufigen Verbleib den Kurzzeit-Verbleib, also die Zeit nach der Aufnahme und Metabolisierung bezeichnen. Mit Langzeit-Verbleib meinen wir die Zeit nach dem Absterben von Nadeln, Wurzeln und Holz und die nachfolgende Verrottung der Gehölzteile. Wir erwarten aus eigenen Vorarbeiten für TNT als Hauptakkumulationsort die Wurzel. Eine mögliche Akkumulation von TNT-Derivaten in den Nadeln ist noch offen.

Bezüglich Hexogen-Akkumulationen gibt es für Nadelgehölze bisher gar keine Hinweise. Wir vermuten, dass eine Akkumulation von RDX-Derivaten in der Nadel prinzipiell möglich ist, da bei Laubgehölzen (Pappeln) RDX-Akkumulationen im Blatt beschrieben wurden (Thompson et al., 1999).

Die morphologische Kompartimentierung (Lokalisierung) (s. Abb. 4) ist wichtig dafür, welche Gehölzorgane bei den anschließenden Verrottungs-Untersuchungen (s. Abb. 5) hauptsächlich Verwendung finden werden. Außerdem muss die Anfangsradioaktivität des pflanzlichen Materials für die Verrottungsbilanzen vorher für jedes Gehölzkompartiment quantifiziert werden. Es ist geplant, dass Verrottungsuntersuchungen von Wurzelgewebe und Streuabbau der Nadeln im Vordergrund stehen.

Die Lokalisierung des vorläufigen ^{14}C-Verbleibes in den biochemischen Hauptkomponenten der Gehölzorgane, wie sie in Abb. 4 aufgeführt sind, (z.B. ob eine verstärkte ^{14}C-Anreicherung in der Ligninfraktion stattfindet) soll uns Hinweise darauf geben, welche Mikroorganismen bei der Verrottung der „gehölz-gebundenen ^{14}C-STV“ potenziell eine maßgebliche Rolle spielen können (z.B. lignolytische und/oder zellulytische Pilze).

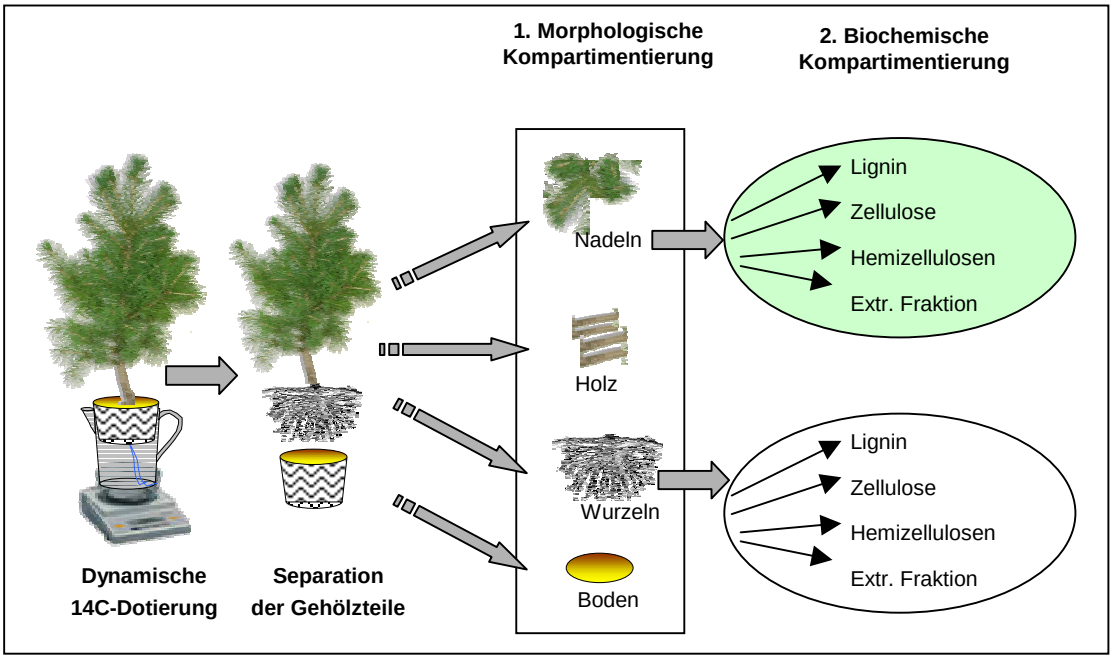


Abb. 4 Untersuchungen zum vorläufigen Verbleib von ^{14}C-TNT und ^{14}C-RDX

Teilaufgabe 4b: Langzeit-Verbleib von ^{14}C-TNT und ^{14}C-RDX

Bereits bei der morphologische Kompartimentierung erfolgt eine Homogenisierung des jetzt ^{14}C-dotierten Pflanzenmaterials. Danach folgt eine Inokulation mit lignolytischen und/oder cellulytischen Pilzen und mit Streuschicht- bzw. Boden-Inokulaten aus Altlastboden der Standorte Clausthal-Zellerfeld bzw. Torgau/Elsnig in CO_2-Absorber-Inkubatoren (Abb. 5).

Probenahmen zu verschiedenen Zeitpunkten sollen zeitabhängige Verrottungs-Bilanzen ermöglichen. Die ^{14}C-Extrahierbarkeit des verrotteten Pflanzenmaterials soll mit wässrigen und organischen Agenzien geprüft werden. Extrakte sollen mit Radio-DC und Radio-HPLC charakterisiert werden.

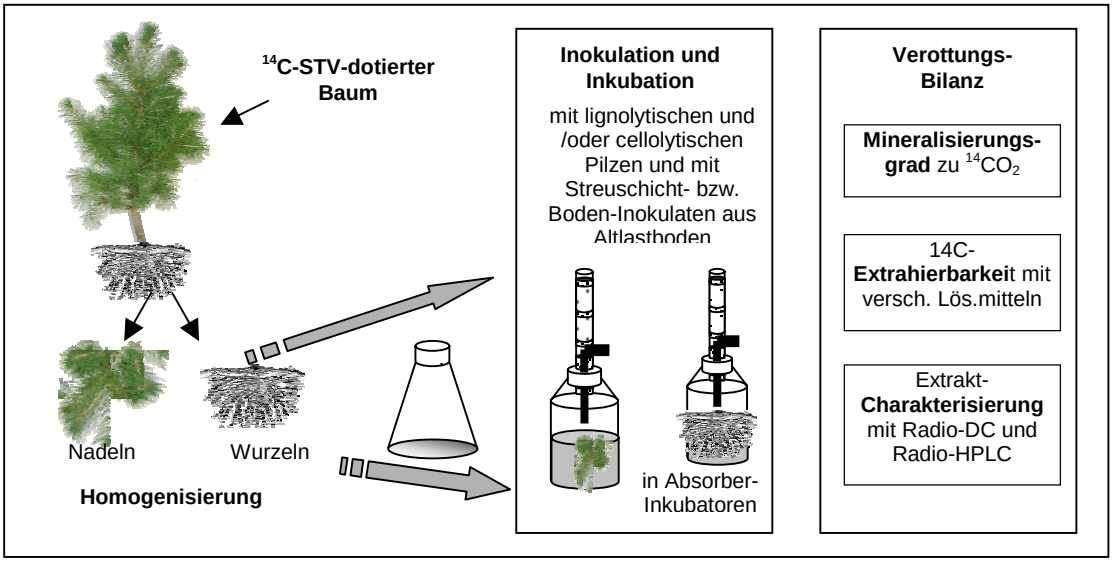


Abb. 5 Ermittlung des Langzeitschicksals von ^{14}C-TNT und ^{14}C-RDX in Nadelgehölzen

Teilaufgabe 5: KORA-Leitfaden

Die Bewertungen der Ergebnisse aus den Teilaufgaben 1-4 fließen in Abstimmung mit den Kooperationspartnern des TV 5 in den Leitfaden ein.

Ergebnisse / Stand der Arbeiten

Das Teilprojekt 5.6 ist erst im Frühjahr 2005 begonnen worden. Die Laufzeit beträgt drei Jahre. Die Anzucht und Etablierung von Gehölzen, die den eigentlichen Experimenten vorangehen muss, sind naturgemäß relativ zeitaufwendig. Daraus resultierend, tragen die bisher erzielten Ergebnisse auch einen vorläufigen Charakter.

Die bisherigen experimentellen Arbeiten betreffen vorwiegend die Teilaufgabe 1 („Dendrotoleranz“). Sie betrafen u.a.: Pflanzenbeschaffung, Anzucht von Nadelgehölzen in verschiedenen Topfsystemen (*Picea glauca* ‚Conica‘, *Picea abies*, *Pinus sylvestris*), erste Transpirationsmessungen als Vitalitätskontrolle, methodische und logistische Verbesserung der Inkubations- und Applikationssysteme.

Die ausgewählten Ergebnisabbildungen (Abb. 6, Abb. 7) zeigen, dass Langzeit-Transpirationsmessungen möglich sind (bis 4 Monate) und dass Nadelgehölze gleicher Anfangstranspiration ohne Schadstoffzufuhr (STV) mindestens zwei Monate ihre gleichbleibende Transpirationsleistung verlässlich beibehalten (Abb. 6). TNT wirkt bei Dauerapplikation über einen Monat trotz hoher Konzentration von 45 mg/l sehr langsam transpirationshemmend, sowohl bei Fichten als auch bei Kiefern. Erst eine noch stärkere Konzentrationserhöhung auf 90 mg/l TNT lässt den transpirationshemmenden TNT nach

einem weitern Monat TNT-Einwirkung langsam deutlich werden. Daraus ist abzuleiten, dass die Transpiration bei Nadelgehölzen prinzipiell geeignet ist, als Toxizitäts/Toleranzparameter für die weiteren Untersuchungen zu dienen. Laubgehölze wären unter vergleichbar extremen Versuchsbedingungen bereits abgestorben (vgl. Schoenmuth, 2002). Vorläufig ist also von einer höheren TNT-Toleranz der Nadelgehölze gegenüber Laubgehölzen auszugehen. Bestätigungsexperimente mit anderen STV werden dadurch jetzt sinnvoll.

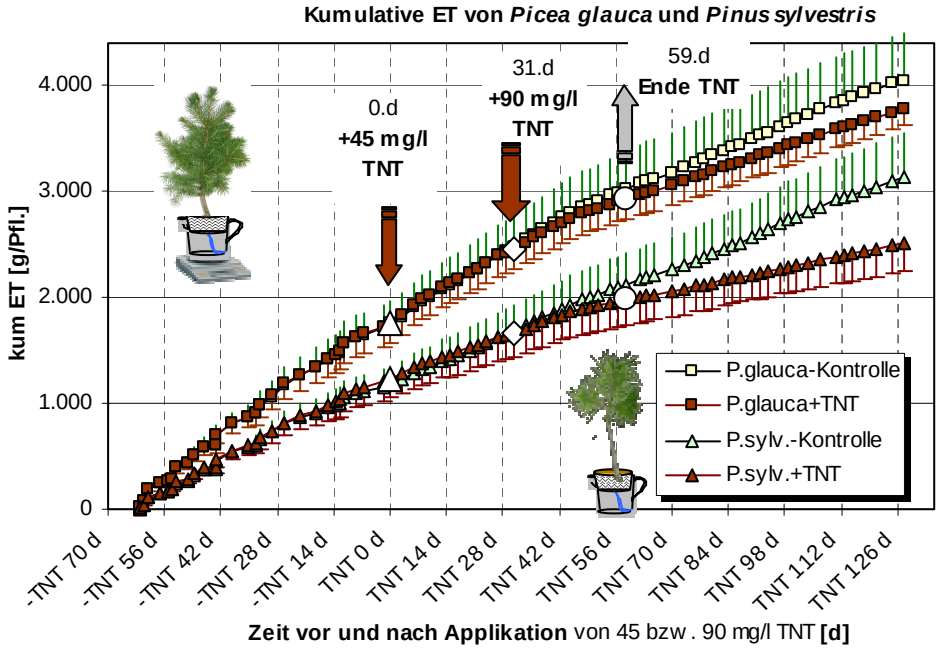


Abb. 6 Wirkung gestaffelter TNT-Konzentrationen auf die kumulative Evapo-Transpiration (kum ET) von dreijährigen *Picea glauca* und einjährigen *Pinus sylvestris*
Fehlerintervall: Standardabweichung bei n = 6. **Symbole**: Dreieck: Beginn der kontinuierlichen Zugabe von 45 mg/l TNT; Rhombus: Steigerung der TNT-Applikation auf 90 mg/l. Kreis: Ende der TNT-Zugabe.

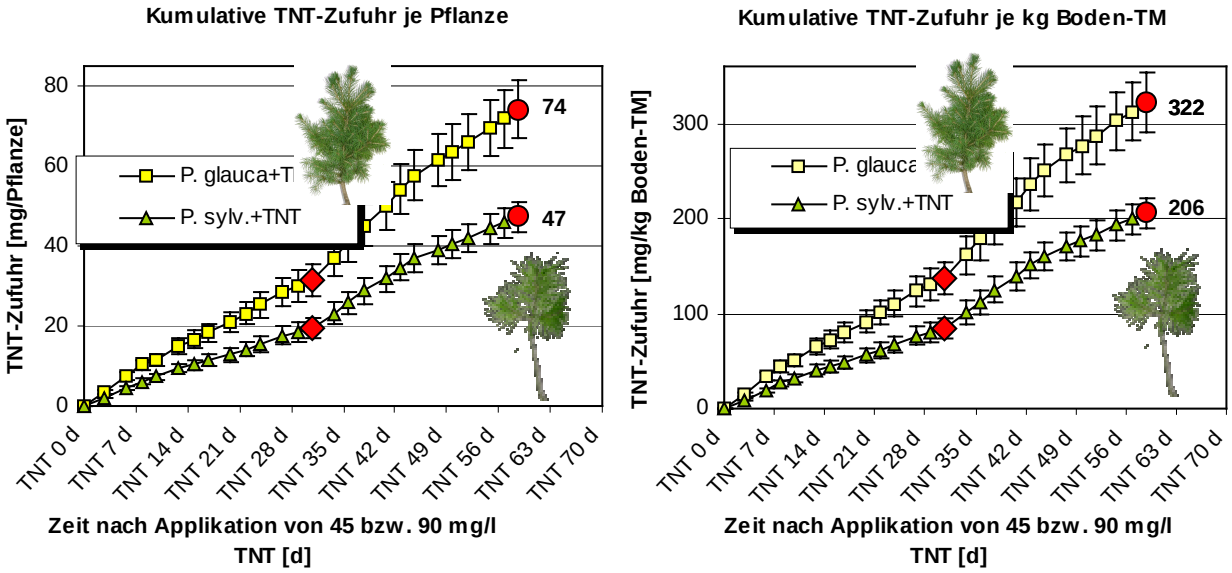


Abb. 7 Auswirkung gestaffelter TNT-Konzentrationen auf das Ausmaß der kumulativen TNT-Zufuhr je Pflanze und je kg Boden-Trockenmasse bei *Picea glauca* und *Pinus sylvestris*.
Fehlerintervall: Standardabweichung bei n = 6. Sonstige Bedingungen: wie Abb. 6

Literatur

1. Schoenmuth, B. (1996): Dekontamination schadstoffbelasteter Böden mit Hilfe speziell selektierter Pflanzenarten bzw. -sorten mit hoher metabolischer Entgiftungskapazität. Abschlussbericht 1996, TV 6, BMBF-Verbundvorhaben Biologische Sanierung von Rüstungsaltlasten, FKZ 14508583, PT des BMBF für Abfallwirtschaft und Altlasten, Umweltbundesamt Berlin, 37 S. <http://www.dendroremediation.de/bericht2002/bericht1996/abschlussbericht1996.pdf> Web date: July 2002, 1527 KB

2. Schoenmuth, B. (2002): Freilandversuche zur TNT-Dekontamination und [^{14}C]-TNT-Aufnahme durch Gehölze. Teilvorhaben 3.6 des BMBF-Verbundvorhabens Biologische Sanierung von Rüstungsaltlasten. BMBF-FKZ 145085813 (PTJ-FKZ 033 02 68). Abschlussbericht, Langfassung, 168 Seiten, 35 Tab., 65 Abb., 26 Fotos, 1073 Literaturangaben. <http://www.dendroremediation.de/bericht2002/bba-tnt-bericht2002.pdf> Web date: June 2002, Password-protected Web access since June 2002, 5108 KB, Password: “bba”

3. Schoenmuth, B., Pestemer, W. (2000): Aufnahme und Verbleib von [^{14}C]-Trinitrotoluol in Weiden und Fichten. Poster und Abstract, 2. Symposium "Natural Attenuation", 7.-8.Dez. 2000, DECHEMA e.V., Frankfurt a.M., 3.S. Poster: <http://www.schoenmuth.de/bericht2002/zwischenberichte/poster-natatt-2000.pdf> Web date: June 2002

4. Schoenmuth, B.W., Pestemer, W. (2004a): Dendroremediation of trinitrotoluene (TNT). Part 1: Literature overview and research concept. ESPR - Environ Sci & Pollut Res 11(4), 273-278 <http://www.dendroremediation.de/2004publi/dendrorem-overview.pdf> (139 KB)

5. Schoenmuth, B.W., Pestemer, W. (2004b): Dendroremediation of trinitrotoluene (TNT). Part 2: Fate of radio-labelled TNT in trees. ESPR - Environ Sci & Pollut Res 11(5), 331-339 <http://www.dendroremediation.de/2004publi/TNT-fate-high-resolut.pdf> (789 KB)

6. Talmage, S.S., Opresko, D.M., Maxwell, C.J., Welsh, C.J.E., Cretalla, M.F., Reno, P.H., Daniel, F.B. (1999): Nitroaromatic munition compounds: Environmental effects and screening values. Rev Environ Contam Toxicol 161, 1-156

7. Thompson, P.L., Ramer, L.A., Schnoor, J.L. (1999): Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine translocation in poplar trees. Environ Toxicol Chem 18, 279-284

Dieses Projekt wird im Rahmen des Förderschwerpunktes "KORA" vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert, Förderkennzeichen: 0330704.