

# Eignung von Nadelbäumen zur Sanierung sprengstoffkontaminierter Böden sowie zur Verwendung als nachwachsender Rohstoff

Potential for dual use of coniferous trees for the sanitation of explosive contaminated areas and as regenerative raw material

*Dr. Bernd Schoenmuth, Tanja Scharnhorst, Dr. Detlef Schenke, Prof. Dr. Wilfried Pestemer und Prof. Dr. Carmen Büttner*

## Zusammenfassung

Erhebliche Flächen sprengstoffbelasteter Böden in Deutschland sind mit Nadelgehölzen bewaldet. Nadelgehölze sind wegen ihrer gegenüber Laubgehölzen höheren Toleranz gegenüber Sprengstoffen auch für die künftige Artengestaltung von Rüstungsaltstandorten zu bevorzugen. Durch ihre Fähigkeit zur Akkumulation von sprengstofftypischen Verbindungen und durch ihre Fähigkeit zur Metabolisierung von aufgenommenen Sprengstoffverbindungen sind Nadelwaldbestände dazu geeignet, zur Dekontamination von sprengstoffbelasteten Böden beizutragen. Nadelholzbestände auf Trinitrotoluol (TNT)-belasteten Böden, erlauben eine Holznutzung, da die aufgenommenen und umgewandelten Nitroaromatenmetabolite in der Wurzel verbleiben. Nitramin-Sprengstoffe, wie Hexogen (RDX) hingegen werden über den Transpirationsstrom bei Nadelgehölzen in oberirdische Pflanzenteile bis hin zu den Nadeln transportiert und dort akkumuliert. Eine Holznutzung auf RDX-Standorten ist daher nicht ratsam.

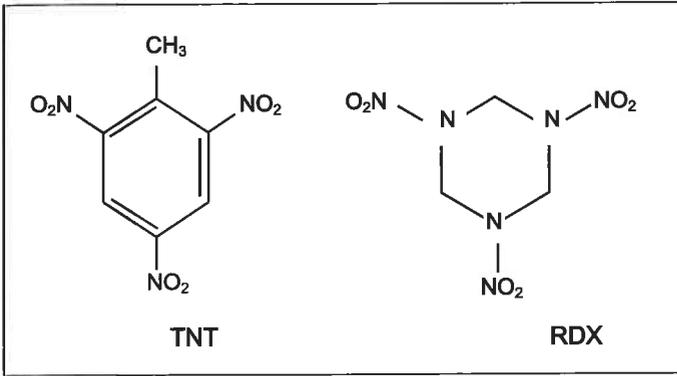
## Summary

Conifer trees like spruce and pine are more tolerant against explosives in soil than broad-leaved trees. Therefore, coniferous trees should be preferred for species selection of woodlands growing on former ammunition sites. Conifers may accumulate explosives, and their ability for metabolising energetic compounds could contribute to sanitation processes in soils contaminated by explosive. Utilisation of wood is possible on such areas where only nitroaromatics like TNT are present as contamination source since uptaken nitroaromatic compounds remain in root tissue. Utilisation of conifers as source for wood is not recommended on soils contaminated with nitramines (e. g. RDX).

## 1 Einleitung und Problemstellung

In Deutschland sind etwa 2,8 % des Gesamtterritoriums (ca. 10.000 km<sup>2</sup>) als ehemalige bzw. gegenwärtig genutzte Rüstungsflächen eingestuft. Große Areale davon sind weitflächig und diffus mit Rüstungsschad-

stoffen, insbesondere mit sprengstofftypischen Verbindungen (STV), kontaminiert. Nach Erhebungen des Umweltbundesamtes gibt es gegenwärtig 3240 Rüstungs-Altstandorte in der Bundesrepublik.



**Abbildung 1:**  
**Strukturformeln von**  
**2,4,6-Trinitrotoluol (TNT)**  
**und Hexahydro-1,3,5-tri-**  
**nitro-1,3,5-triazin (Royal**  
**Demolition eXplosive = RDX,**  
**Hexogen)**

Schwerpunktmäßig handelt sich bei den Sprengstoffbelastungen um das 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) und TNT-verwandte Verbindungen, wie Dinitrotoluole (DNT) und Aminodinitrotoluole (ADNT) sowie um den Sprengstoff RDX (Hexogen). Durch ihre Toxizität bedrohen STV-Auswaschungen das Grundwasser.

Aus (Winter-)Tarnungsgründen wurde der Großteil von Sprengstoff-Produktionsstandorten und -füllstellen in nadelwaldreichen Gegenden angelegt. Das Luftbild des fichtenbestandenen, ehemaligen Sprengstoffwerkes „Tanne“ bei Clausthal-Zellerfeld belegt dies beispielhaft noch heute.

Auch großflächige Truppenübungsplätze sind größtenteils in Gebieten angelegt worden, die historisch wegen ihrer kargen, landwirtschaftlich kaum nutzbaren Böden eine dünne Besiedlung aufwiesen und bestenfalls eine Nadelholzbewaldung zuließen. Ein Teil der baumbestandenen Altlastflächen befindet sich heute in besiedelten Gebieten (z. B. Stadtallendorf/Hessen).

Bewaldete Rüstungsaltsstandorte geraten gegenwärtig verstärkt in den Bereich wirtschaftlichen Interesses. Die Gründe dafür liegen in dem derzeit stark gestiegenen Bedarf an hochwertigen Nahrungsprodukten in Asien, der auch in Europa zu einer verstärkten Nachfrage nach landwirtschaftlichen Anbauflächen führt und in der durch steigende Preise fossiler Energieträger verursachten Ausweitung des ackerbaulichen Anbaus von Energiepflanzen. Ein weiterer Grund ist die durch Entwicklung neuartiger Feuerungsanlagen

gestiegene Nachfrage nach Energieholzprodukten (Pellets, Holzhackschnitzel), die vorwiegend aus Nadelholzherkünften stammen.

Eine positive Prüfung der Holznutzbarkeit von Militär- und Rüstungsliegenschaften könnte zu einer ökonomischen Aufwertung dieser Flächen führen. Ein nachhaltiges Flächenmanagement kann die aktuelle Frage des „Ökologischen Waldumbaus“, bei dem verstärkt Laubbäume in Nadelwälder eingepflanzt werden sollen, nicht umgehen. Für sprengstoffkontaminierte Flächen ist es daher wichtig zu wissen, ob dort wachsende Nadelgehölze toleranter gegenüber sprengstoffspezifischen Verbindungen als Laubgehölze sind und ob Koniferen in ähnlicher Weise wie Laubbäume Sprengstoffe rückhalten, aufnehmen, akkumulieren



**Abbildung 2: Bewaldung des Rüstungsaltsstandortes „Tanne“ bei Clausthal-Zellerfeld**  
 (Quelle: Google-Earth 2006)

und metabolisieren und somit zur Bodenansäuerung beitragen können.

Vermutlich in ihrer komplizierteren experimentellen Handhabbarkeit begründet, ist die Datenlage über das Verhalten von Nadelgehölzen gegenüber STV – im Vergleich zu STV-Befunden an krautigen Pflanzen und Laubgehölzen – abgesehen von eigenen Arbeiten (z. B. SCHOENMUTH und BÜTTNER 2006, SCHOENMUTH et al. 2007b) eher spärlich dokumentiert und die Ergebnisse beschränken sich auf Angaben von SCHNEIDER et al. (1995), KOEHLER et al. (2001b) und DOBNER (2003).

## 2 Material und Methoden

Als Versuchspflanzen wurden getopfte, dreijährige Kiefern (*Pinus sylvestris*) und Zuckerhutfichten (*Picea glauca* 'Conica') verwendet. Vergleichsuntersuchungen an Laubgehölzen erfolgten vorwiegend an bewurzelten Stecklingen von *Salix* (Weidenhybride EW13). Für Dendrotoleranzuntersuchungen wurden Gruppen von je acht Gehölzen pro Variante in BBA-Boden bzw. Quarzsand über 4–6 Wochen getestet. Radiotraceruntersuchungen erfolgten nach einer Inkubationszeit von 3–5 an je zwei Bäumen pro Variante in Quarzsand (Abbildung 3).

### 2.1 Dendrotoleranz

Für Toleranzuntersuchungen („Dendrotoleranz“) werden Dochtapplikationssysteme nach SCHOENMUTH und PESTEMER (2004) genutzt (Abbildung 3). Als Toleranzparameter wird aus der Messung der Evapotranspiration die Transpiration der Gehölze bestimmt, da die Transpiration als physiologischer Leistungsparameter – ähnlich dem Wachstum – die Gesamtvitalität der Gehölzpflanze widerspiegelt. Transpirationsmessungen im Zeitbereich von 4–6 Wochen sind nicht nur an Laubgehölzen und krautigen Pflanzen, sondern auch an Nadelgehölzen durchführbar. Im Gegensatz zum Wachstum von Nadelgehölzen lässt sich die Transpiration über das ganze Jahr messen.

### 2.2 Aufnahme- und Verbleibsuntersuchungen mit sprengstofftypischen Verbindungen

Aufnahmeuntersuchungen werden radioanalytisch mit  $^{14}\text{C}$ -markierten Verbindungen durchgeführt. Die radioaktiv markierten Sprengstoffe  $^{14}\text{C}$ -TNT bzw.  $^{14}\text{C}$ -RDX werden über Dochtapplikationssysteme dem Boden/Baum-System zugeführt (Abbildung 3).

Der  $^{14}\text{C}$ -Verbleib in den einzelnen Baumkompartimenten wird mit Hilfe eines „Biological Oxidizer“ quantifiziert. Extrahierbare  $^{14}\text{C}$ -Anteile werden mit einem Liquid Scintillation Counter (LSC) vermessen und mittels Radiodünnschichtchromatographie charakterisiert (Abbildung 4).

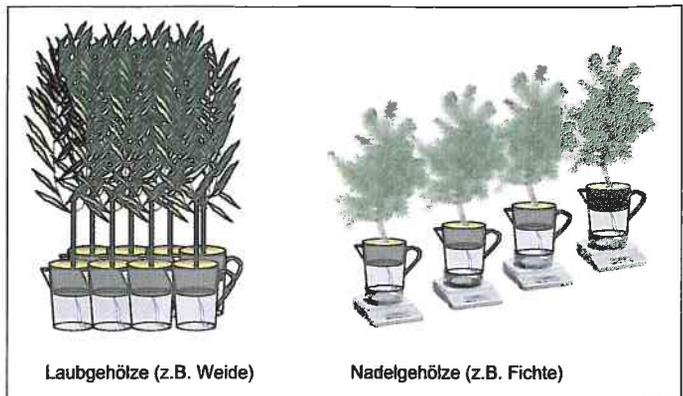


Abbildung 3:  
Gravimetrische Evapo-  
Transpirationmessungen  
an Gehölzpflanzen

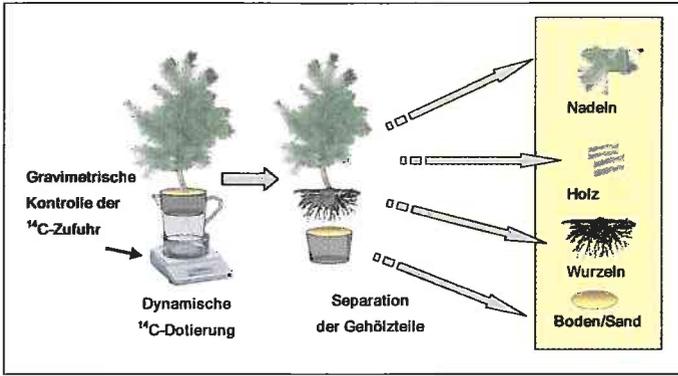


Abbildung 4: Aufnahme-Versuche mit <sup>14</sup>C-TNT und <sup>14</sup>C-RDX in Quarzsand

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Nadelgehölze sind toleranter als Laubgehölze

Die Transpiration von Weiden (hier der Klon *Salix* EW13) wird schon nach 14 Tagen durch TNT konzentrationsabhängig gehemmt (Abbildung 5). Wenn auch in schwächerem Maße, so hemmen auch RDX und andere STV, wie ADNT; DNT und MNT die Transpiration von Weiden. Auch die Transpiration von anderen Laubgehölzen, wie Pappeln, Ahorn und Weißbuchen ließ sich durch STV hemmen (SCHOENMUTH 2002, SCHOENMUTH et al. 2007a).

Im Gegensatz zu Laubgehölzen hat TNT trotz hoher kumulativer TNT-Zufuhr von bis zu 480 mg je kg Substrat kaum einen Effekt auf die Transpiration von

Fichten (Abbildung 6). Auch andere STV, wie Dinitrotoluole (DNT), Dinitrobenzoesäure (DNBA), Mononitrotoluole (MNT) und auch RDX zeigten keine Effekte.

#### 3.2 Morphologische Kompartimentierung der Aufnahme von TNT und RDX

Die Aufnahmeversuche mit <sup>14</sup>C-markiertem TNT zeigen übereinstimmend bei Fichten und Kiefern, dass TNT vorwiegend in der Wurzel akkumuliert wird. Werte bis zu 300 mg TNT-Äquivalente je kg Trockenmasse sind beispielsweise in Kiefernwurzeln möglich (Abbildung 7).

RDX hingegen wird weniger in Wurzeln festgehalten, sondern über den Transpirationsweg weiter aufwärts transportiert und vorwiegend in Nadeln akkumuliert.

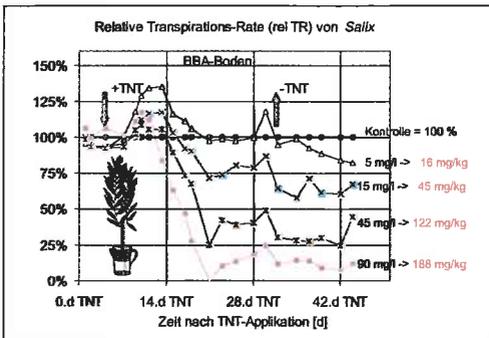


Abbildung 5: Transpirationshemmung durch TNT bei Weiden in BBA-Böden

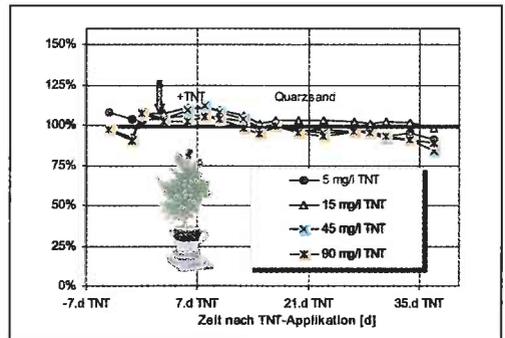


Abbildung 6: Kaum Transpirationshemmung durch TNT bei Fichten in Quarzsand

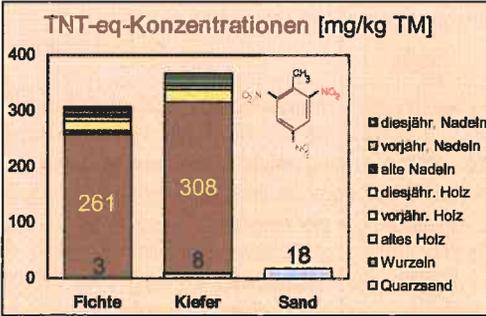


Abbildung 7: Konzentrationsverteilung der <sup>14</sup>C-Äquivalente von TNT (TNTeq) nach 5 Wochen

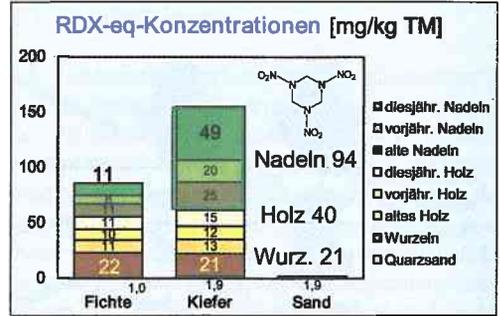


Abbildung 8: Konzentrationsverteilung der <sup>14</sup>C-Äquivalente von RDX (RDXeq) nach 3 Wochen

Bis zu 94 mg RDX-Äquivalente je kg Trockensubstanz waren in Kiefernadeln zu finden. Die jüngsten, diesjährigen Nadeln, die den höchsten Anteil an der Transpiration haben, zeigen auch die höchste RDX-Äquivalent-Konzentration (Abbildung 8).

### 3.3 Massenverteilung

Bei der Betrachtung der Massenverteilung (in µg-Äquivalenten von TNT und RDX) zeigt sich eindeutig das Anreicherungsvermögen von Kiefern und Fichten (Abbildung 9, Abbildung 10). Der gehölzbepflanzte Sand zeigt deutlich geringere Massen an TNT und RDX als der unbepflanzte Sand.

### 3.4 Festlegung von RDX und TNT

RDX-Äquivalente zeigen im Vergleich mit TNT eine schwache Festlegung in Wurzeln von Fichten und Kiefern. Weil dadurch ein leichter Aufwärtstransport zu Holz und Nadeln möglich ist, ergeben sich Risiken bei der Holznutzung und durch abfallende Nadeln sind Streuschichtenreicherungen von RDX und/oder seinen Metaboliten möglich.

TNT-Äquivalente sind dagegen bei beiden Nadelgehölzen zu 96 % in der Wurzel festgelegt. Ein Aufwärtstransport über den Transpirationsstrom ins Holz und in die Nadeln ist somit kaum mehr effektiv und erlaubt die Holznutzung auf TNT-Standorten.

Die „festgelegten“, nicht mehr mit organischen Lösungsmitteln extrahierbaren Rückstandsanteile von TNT-Äquivalenten und auch von RDX-Äquivalenten sind zum größten Teil in der Ligninfraktion der Zellwände gebunden.

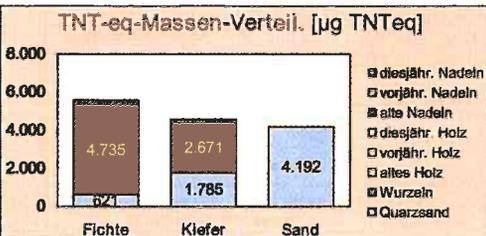


Abbildung 9: Absolute Massenverteilung der <sup>14</sup>C-TNT-Äquivalente (TNTeq)

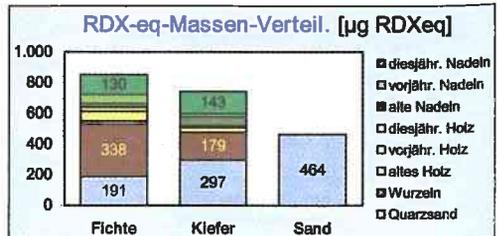
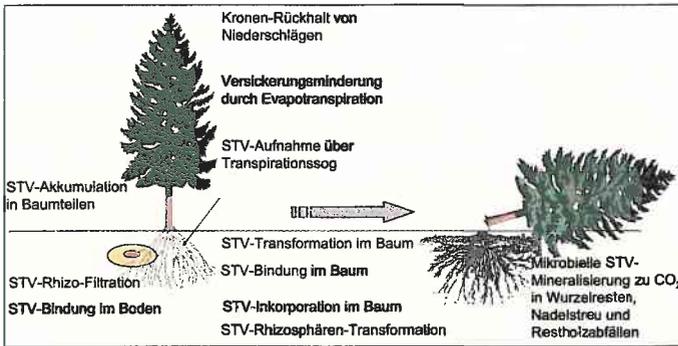


Abbildung 10: Absolute Massenverteilung der <sup>14</sup>C-RDX-Äquivalente (RDXeq)



**Abbildung 11:**  
Mögliches Schicksal sprengstofftypischer Verbindungen (STV) im Lebenszyklus von Altlastbäumen

## 3.5 Metabolisierung von RDX und TNT

Bei der Untersuchung des noch extrahierbaren Anteils zeigt sich übereinstimmend bei Fichten und Kiefern, dass RDX nach seiner Aufnahme im Wurzelgewebe fast ausschließlich weiterhin als die Ausgangssubstanz RDX vorliegt. Dies erklärt neben der geringen Festlegung des RDX auch den guten Aufwärtstransport zu Holz und Nadeln. Der nach der 96 %-igen Festlegung noch extrahierbare Restanteil an TNT-Äquivalenten dagegen ist vollständig metabolisiert. Extrahierbares „TNT“ ist nur noch in Form sehr polarer Metabolite im Radiochromatogramm festzustellen.

In Abbildung 13 wird zusammenfassend das Schicksal von sprengstofftypischen Verbindungen in Nadelbäumen auf Rüstungsflächen dargestellt.

## 4 Schlussfolgerung

Aus den Ergebnissen lässt sich klar erkennen, dass Nadelbäume besser als Laubbäume geeignet sind, langfristige Böden, die beispielsweise mit TNT oder RDX belastet sind, zu dekontaminieren. Um die Dekontaminationspotenz von sprengstoffbelasteten Altlastwäldern und die Holznutzung nachhaltig zu gewährleisten, wird bezüglich des Waldumbaus zu Mischwäldern auf diesen Flächen Zurückhaltung empfohlen.

## Danksagung

Die durchgeführten Arbeiten erfolgten im Rahmen des Förderschwerpunktes „KORA“ des Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderkennzeichen: 0330704. Der Großteil der praktischen Arbeiten wurde am Julius Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen – durchgeführt. Unser Dank an dieser Stelle für die Bereitstellung der Arbeitsmöglichkeiten und für die enge Zusammenarbeit an die Leitung des Institutes für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz in Berlin-Dahlem.

## Literatur

- DOBNER, I., 2003: Der Einsatz mykorrhizierter Gehölze in biologischen Sanierungsverfahren unter dem Aspekt TNT-belasteter Böden. PhD thesis, UFT, University Bremen, Germany, 190 pp, <[http://elib.suub.uni-bremen.de/publications/dissertations/E-Diss696\\_dobner.pdf](http://elib.suub.uni-bremen.de/publications/dissertations/E-Diss696_dobner.pdf)> (Web access, April 2004).
- KOEHLER, H.; WARRELMANN, J.; BEHREND, P.; DOBNER, I.; FRISCHE, T.; HEYSER, W.; JASTORFF, B.; WALTER, U., 2001: Erprobung und Erfolgskontrolle eines Phytoremediationsverfahrens zur Sanierung Sprengstoff-kontaminierter Böden: Teil III. Beurteilung des Verfahrens. UWSF – Z Umweltchem Ökotox 13, 359–368.
- SCHNEIDER, K.; OLTMANN, J.; RADENBERG, T.; SCHNEIDER, T.; PAULY-MUNDEGAR, D., 1996: Uptake of nitroaromatic compounds in plants. Implication for risk assessment of ammunition sites. ESPR – Environ Sci & Pollut Res 03(3), 135–138.
- SCHOENMUTH, B., 2002: Freilandversuche zur TNT-Dekontamination und [<sup>14</sup>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, Passwort: „bba“.

- SCHOENMUTH, B.; BUETTNER, C., 2006: Toleranz von Nadelgehölzen gegenüber TNT und Hexogen sowie deren Metabolite – eine alternative Möglichkeit für die Nachnutzung von Rüstungsstandorten? Statusseminar des KORA-Themenverbundes 5 „Rüstungsaltlasten“, 25.–26.10.2006 in Marburg/Lahn, Tagungsbeitrag, 6 Seiten, <[www.dendroremediation.de/KORA/Abstract-Schoenmuth-KORA-Marburg.pdf](http://www.dendroremediation.de/KORA/Abstract-Schoenmuth-KORA-Marburg.pdf)>, Web date: October 2006.
- 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.
- 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.
- SCHOENMUTH, B.; SCHARNHORST, T.; PESTEMER, W.; BÜTTNER, C., 2007a: Schadefekte des Sprengstoffes RDX an Laubbäumen, Nadelgehölzen und krautigen Pflanzen. 44. Gartenbauwissenschaftliche Tagung vom 21.–24.02.2007 in Erfurt, Poster P23, <[www.dendroremediation.de/KORA/Poster-P23-Schoenmuth-DGG-Erfurt.pdf](http://www.dendroremediation.de/KORA/Poster-P23-Schoenmuth-DGG-Erfurt.pdf)>, Web date: Febr. 2007.
- SCHOENMUTH, B.; SCHARNHORST, T.; PESTEMER, W.; SCHENKE, D.; BÜTTNER, C., 2007b: Uptake and distribution of [<sup>14</sup>C]-TNT in conifers. KORA-Meeting at the Federal Research Centre for Agriculture and Forestry (BBA), Institute for Ecotoxicology and Ecochemistry in Plant Protection, 5.6.2007 in Berlin-Dahlem, Meeting contribution, 10 pp. <<http://www.dendroremediation.de/KORA/TB-Schoenmuth-Berlin-BBA-2007.pdf>>, Web date: June 2007.

### Autoren

*Dr. rer. nat. Bernd Schoenmuth und Tanja Scharnhorst* arbeiten am Fachgebiet Phytomedizin und am Julius Kühn-Institut (ehemals BBA) Berlin an dem BMBF-Projekt „Dendrotoleranz gegenüber STV in Altlastböden und Langzeitschicksal von [<sup>14</sup>C]-Trinitrotoluol und [<sup>14</sup>C]-Hexogen in Nadelgehölzen.“ *Dr. rer. nat. Delf Schenke* wirkt am Julius Kühn-Institut, *Prof. Dr. Pestemer* ist Honorarprofessor an der HU Berlin und *Frau Prof. Dr. Carmen Büttner* ist Leiterin des Fachgebietes Phytomedizin der HU Berlin.

### Fachgebiet Phytomedizin

*Institut für Gartenbauwissenschaften  
Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Lentzeallee 55/57  
14195 Berlin  
Tel. (0 30) 83 04-23 54  
Fax (0 30) 83 04-23 03  
[berndschoenmuth@yahoo.de](mailto:berndschoenmuth@yahoo.de)*

