

#DS2822



**Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
Institut für Ökotoxikologie und Ökochemie im Pflanzenschutz**



DendroRem-Home

Forschungsverbund: "Biologische Verfahren zur Bodensanierung"

Verbundvorhaben 3: "Biologische Sanierung von Rüstungsaltslasten"

Teilvorhaben 3.6:

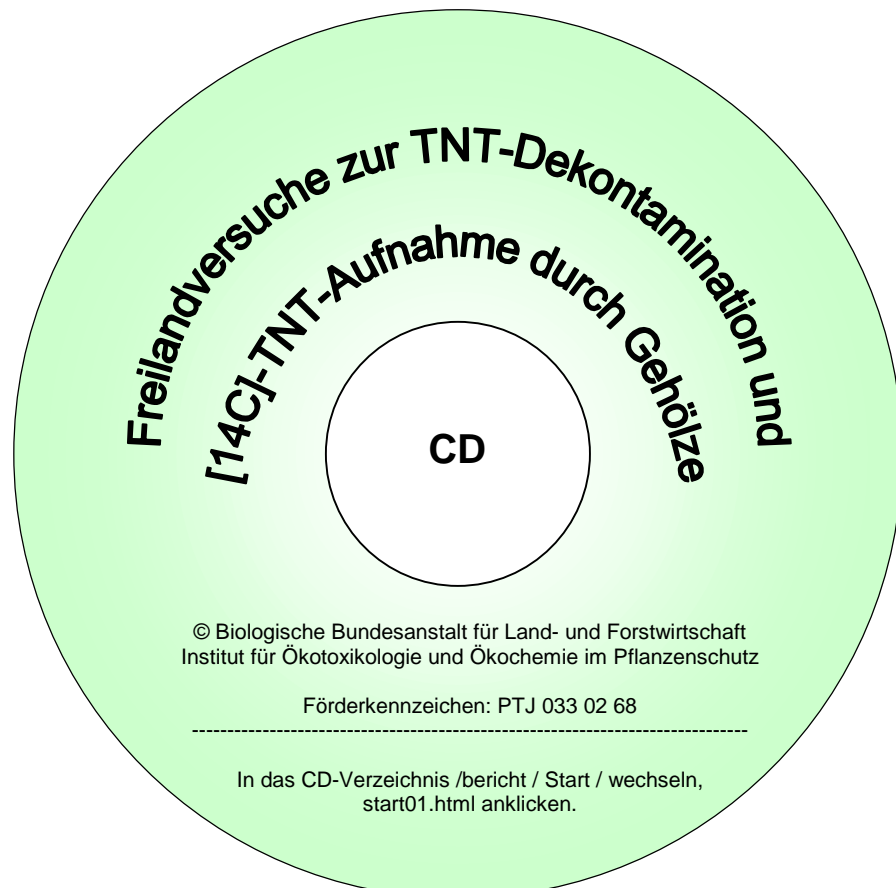
Freilandversuche zur TNT-Dekontamination und [¹⁴C]-TNT-Aufnahme durch Gehölze

Teil I: Kurzfassung des Abschlussberichtes 2002 (#DS2822)

Teil II: Ausführlicher Abschlussbericht 2002 (#DS2530)

Förderkennzeichen: BMBF 14508581 3 oder PTJ 033 02 68

<http://www.dendroremediation.de>





DendroRem-Home

Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft

Institut für Ökotoxikologie und Ökochemie im Pflanzenschutz

Leiter: Direktor und Professor, Prof. Dr. agr. Dr. habil. Wilfried Pestemer

Adresse: Königin-Luise-Straße 19,
D-14195 BERLIN (Dahlem)

Tel. 030 / 8304-2354 Fax: -2303

e-mails: w.pestemer@bba.de, berndschoenmuth@yahoo.de

Internet: <http://www.bba.de>

<http://www.dendroremediation.de>

Forschungsverbund: "Biologische Verfahren zur Bodensanierung"

Verbundvorhaben 3: "Biologische Sanierung von Rüstungsaltlasten"

Teilvorhaben 3.6:

Freilandversuche zur TNT-Dekontamination und [¹⁴C]-TNT-Aufnahme durch Gehölze

Projektleiter: Prof. Dr. Wilfried Pestemer

Projektbearbeiter: Dr. Bernd Schönmuth

Technische Mitarbeiter: Kerstin Koppitz

Ulrike Seider

Sylvia Baas

Laufzeit: 01. 09. 1998 bis 31. 08. 2001

Zuwendungssumme: 810.400,00 DM

Projektträger bis 2001: Umweltbundesamt Berlin,
Projektträger Abfallwirtschaft und Altlastensanierung
des BMBF (FKZ: 14 50 85 81 3)
www.umweltbundesamt.de

Projektträger ab 2001: Forschungszentrum Jülich GmbH, PTJ-Berlin
(FKZ: 033 02 68)
<http://www.fz-juelich.de/ptj>, <mailto:u.wittmann@fz-juelich.de>

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 033 02 68 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

© Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft

Das Werk unterliegt dem Urheberrechtsgesetz. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen des Werkes ist nur mit Zustimmung des Autors zulässig.

Die Weitergabe der Langfassung des Berichtes in gedruckter oder elektronischer Form an Dritte ist nicht zulässig.



DendroRem-Home

Forschungsverbund: "Biologische Verfahren zur Bodensanierung"
Verbundvorhaben 3: "Biologische Sanierung von Rüstungsaltslasten"

Teilvorhaben 3.6:

Freilandversuche zur TNT-Dekontamination und [¹⁴C]-TNT-Aufnahme durch Gehölze

Projektleiter: Prof. Dr. Wilfried Pestemer
Projektbearbeiter: Dr. Bernd Schönmuth
Förderkennzeichen: BMBF 14 50 85 81 3 (PTJ 033 02 68)

Zusammenfassung:

Im Gegensatz zu krautigen Pflanzen ist das Phytoremediationspotential für sprengstofftypische Verbindungen bei Bäumen („Dendroremediation“) wenig untersucht. Vor allem an Bilanzierungen des Explosivstoffschicksals im System Boden/Baum mangelt es bisher.

Hauptziel der Untersuchungen war es daher, nach Möglichkeiten der Erfolgskontrolle eines Bodensanierungseffektes durch Nutzung des Dendroremediationspotentials von Laub- und Nadelgehölzen bei sprengstoffverseuchten Böden, die mit 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) und seinen Begleitstoffen kontaminiert sind, zu suchen.

Die Untersuchungen wurden an Weiden, Pappeln, Birken, Fichten und Kiefern durchgeführt. Es wurden Freilandbilanzierungen des Bodenschadstoffschicksals mit Laub- und Nadelgehölzen in Kleinlysimetern (Mitscherlichgefäßen), quantifizierende Dendrotoxizitäts- und Schadstoff-Verbleibsuntersuchungen mit neuartigen Dochtapplikationssystemen, Radiotracerbilanzierungen zu Verbleib und Kompartimentierung von [¹⁴C]-TNT in ausgereiften Bäumen sowie Pflanzenanalysen an Altlast-Bäumen durchgeführt und durch vergleichende Parzellenertragsmessungen ergänzt.

Als Ergebnis erfolgte der Freiland-Nachweis der Dendroremediation bei allen getesteten Gehölzen durch Bioindikation des Wachstums und durch chemisches Sickerwassermonitoring. Analysen von Bodenstichproben können die Dendroremediation nicht abbilden und sind nicht zur Freiland Erfolgskontrolle geeignet. Eine verlässliche Ermittlung des Dendroremediationspotentials juveniler und älterer Gehölze durch Messung der Dendrotoxizität, des Schadstoffverbleibs und der Kresse-Resttoxizität des Bodens ist nur bei definierbarer Schadstoff-Zufuhr möglich.

In Laub- und Nadelgehölzen gelang der erstmalige Nachweis der vollständigen [¹⁴C]-TNT-Inkorporation bzw. TNT-Metabolisierung zu bisher unbekanntem Metaboliten. Erstmals ist auch eine differenzierte Kompartimentierung des [¹⁴C]-TNT-Verbleibes in reifen Gehölzen nachgewiesen. Aus der Ergebnis-Verknüpfung von Dendrotoleranzexperimenten, Radiotracer-Untersuchungen und Freilandparzellenertragsmessungen lässt sich das Dendroremediationspotential anzupflanzender Gehölze und der Verlauf der „Natural Attenuation“ bestehender Altlastwälder berechnen. Sanierungsempfehlungen und Förderungsmöglichkeiten der „Natural Attenuation“ lassen sich daraus altlastspezifisch ableiten.

Schlüsselwörter (Keywords):

Dendroremediation, Phytoremediation, Natural Attenuation, Rüstungsaltslast, TNT, 2,4,6-Trinitrotoluol, DNT, Dinitrotoluol, ADNT, Aminodinitrotoluol, sprengstofftypische Verbindungen, Nitroaromate, Gehölze, Bäume, Weide, Pappel, Birke, Fichte, Kiefer, *Salix*, *Populus*, *Betula pendula*, *Picea abies*, *Picea glauca*, *Pinus sylvestris*, Dendroremediations-Potential, [¹⁴C]-TNT



1 Kurz-Darstellung des Schlussberichtes nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98

1.1 Problem / Aufgabenstellung

Problem

Großflächig mit dem Explosivstoff 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) und dessen Begleitsubstanzen, wie z.B. Aminodinitrotoluole (ADNT), Trinitrobenzol (TNB) oder Dinitrotoluole (DNT), kontaminierte Gebiete geringen und mittleren Belastungsgrades, sowie bisher nicht detektierte kleinräumige Schadstoffnester bedrohen als Hinterlassenschaft der Rüstungsproduktion des Dritten Reiches durch Auswaschung das Grundwasser oder sind fast 60 Jahre nach Kriegsende als Schadstofffahren in Grundwasserleitern anzutreffen.

Physikalisch-technische Bodensanierungsverfahren müssen in der Regel *ex situ* durchgeführt werden, sind damit sehr kostenintensiv und daher nur punktuell für die Dekontamination hochbelasteter Schwerpunkttorte einsetzbar. Auf der Suche nach bezahlbaren und gesellschaftlich akzeptierten Bodendekontaminationsmöglichkeiten schreitet die Erarbeitung bodenschonender, biologischer Sanierungstechniken somit auch aus wirtschaftlichen Gründen voran. Jedoch müssen auch die verschiedenen mikrobiologischen Sanierungsverfahren auf Schwerpunktkontaminationen beschränkt bleiben, da auch hier ein Bodenaushub und der Zuschlag organischer Cosubstrate notwendig ist.

Für die großflächig mit Sprengstoffen kontaminierte Areale geringen bis mittleren Belastungsgrades bietet sich die Suche nach kostengünstigen, pflanzenbasierten Sanierungsverfahren an. Die Labor- und Freilandarbeiten werden unter dem Begriff „Phytoremediation“ zusammengefasst. Die „Aspekte der Phytoremediation organischer Schadstoffe“ sind von Trapp (2000) [#L 11] übersichtlich beschrieben und die besondere Bedeutung der Gehölze wird hervorgehoben. Der Autor bemängelt, dass Phytotoxizität und Schadstoffbilanz im Freiland nur in wenigen Fällen dokumentiert sind.

Die Zahl der Arbeiten zur Phytoremediation ist in den letzten Jahren so stark angestiegen, dass es notwendig erscheint, die vergleichsweise wenigen Untersuchungen zum Sanierungspotential von Gehölzen mit Hilfe des bisher nur an der [Michigan State University](#) für Anorganika verwendeten Begriffes **Dendroremediation** von den Arbeiten mit krautigen Pflanzen abzugrenzen. Auch unterscheiden sich Gehölze von krautigen Pflanzen, trotz vielfältiger Übereinstimmungen in den physiologischen Reaktionen, vor allem durch die Nachhaltigkeit ihrer Einflüsse auf Boden und Wasserhaushalt, die andererseits erhebliche zeitlich-methodische Untersuchungsprobleme mit sich bringt.

Aufgabe

Die Tatsache, dass in Deutschland ein Großteil der explosivstoffverseuchten Gebiete und Verdachtsflächen von Wäldern, besonders von Nadel- aber auch von Mischwäldern bestanden ist, verlangt nach der parallelen Untersuchung der Remediationseignung von speziellen Gehölzen, die bereits für die Entwicklung pflanzenbasierter Sanierungsverfahren selektiert wurden (z.B. [Schönmuth 1996](#) [#L 5], [Schönmuth et al. 1997a](#) [#L 7], [Schönmuth et al. 1997b](#) [#L 8]) und des Dendroremediationspotentials von Gehölzen, die bereits seit Jahrzehnten auf den Altlastflächen wachsen. Die in der Vorhabensbeschreibung des [Projektantrags von 1997](#) [#L 6] vorgelegte Aufgabenstellung war daher auf folgende Teilaufgaben ausgerichtet:

1. Erprobung der Dekontaminationsleistung von im Vorläuferprojekt selektierten TNT-toleranten Weiden- und Pappelklonen sowie altlasttypischen Gehölzen (Fichte, Birke) unter Freilandbedingungen
2. Radiotracer-Untersuchungen mit ¹⁴C-TNT zur Bilanzierung der TNT-Aufnahme in Gefäßversuchen
3. Analytik ausgewählter Standortgehölze auf TNT-kontaminierten Flächen bezüglich der natürlichen Dekontaminationsfähigkeit dieser Gehölze



Ziel

Die hauptsächlichen Projektziele waren wie folgt festgelegt:

- Sanierungsvorschläge für TNT-kontaminierte Böden mittels definierter Gehölze für praktische Zwecke zu erarbeiten
- Orte, Umfang und Art der Nitroaromatenmetabolisierung in der Gehölzpflanze zu lokalisieren und zu quantifizieren
- Prognosehilfsmittel für den Einfluss der vorhandenen Altlast-Bewaldung auf die weitere Entwicklung der Bodenkontamination zu erhalten („Natural Attenuation“)

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die zeitlichen Voraussetzungen für die Gehölzuntersuchungen werden als sehr knapp eingeschätzt, da lange Vorkulturzeiten für die Vorbereitungen des Versuchsmaterials notwendig sind, insbesondere wenn mehrjährige Gehölze mit den Merkmalen adulter Pflanzen genutzt werden sollen.

Zur Bearbeitung des Projektes standen ein Wissenschaftler und 1,5 technische Mitarbeiterinnen zur Verfügung.

Die im Vorprojekt ([Schönmuth 1996](#) [#L 5]) selektierten, TNT-toleranten Klone von Weiden (*Salix*) und Pappeln (*Populus*), die im Gewächshausversuch ihre TNT/ADNT-Aufnahmepotenz bewiesen hatten, konnten für das Projekt genutzt werden. Die Zwischenvermehrung dieser Gehölz-Hybriden erfolgte während der Antragsphase (vgl. Abb. 1, Abb. 3). Weitere Gehölze, wie Birke (*Betula pendula*), Fichten (*Picea abies* und *P. glauca*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*) entstammten lokalen Baumschulen.

Es konnte die im [Projektantrag von 1997](#) [#L 6] dargelegte Infrastruktur des Instituts für Ökotoxikologie und Ökochemie im Pflanzenschutz der Biologischen Bundesanstalt genutzt werden. Dies betraf vor allem Freiflächen zur Mutterpflanzenkultur und Ertragstestung, Stellflächen für Kleinlysimeter der Freilandversuche und 1-m³-Lysimeter, die radioanalytischen Labors und die Labors für Rückstandsanalytik, Schwermetall- und Elementanalysen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Arbeits- und Zeitplan

Die einzelnen Phasen und Aktivitäten des Projektes sind detailliert der Abb. 1 zu entnehmen und entsprachen dem im Projektantrag vorgestellten bzw. dem im Zwischenbericht 1999 mit dem verschobenen Projektbeginn synchronisierten Zeitplan. Die inhaltliche Projektübersicht zeigt die Abb. 3.

Aus Gründen der besseren Erfolgskontrolle wurde auf ursprünglich geplante Mietenbepflanzungen verzichtet. Stattdessen erfolgten die Freiland-Versuche an 72 Kleinlysimetern (20-Liter-Mitscherlich-Gefäßen), die ein zusätzliches Sickerwassermonitoring ermöglichten und somit Bilanzierungsmöglichkeiten eröffneten.

Der Arbeitsplan wurde zusätzlich auf Dendrotoleranz/Dendrotoxizitäts-Untersuchungen bei quantifizierbarem TNT-Input mit verschiedenen Dochtgefäßsystemen erweitert.

Finanzierungsplan

Die Mittelausgaben erfolgten im Rahmen des Zuwendungsbescheides von 810.400,00 DM. Höhere Ausgaben im Personalbereich (durchschnittlich 9 %) wurden durch Einsparungen in den anderen Bereichen kompensiert.

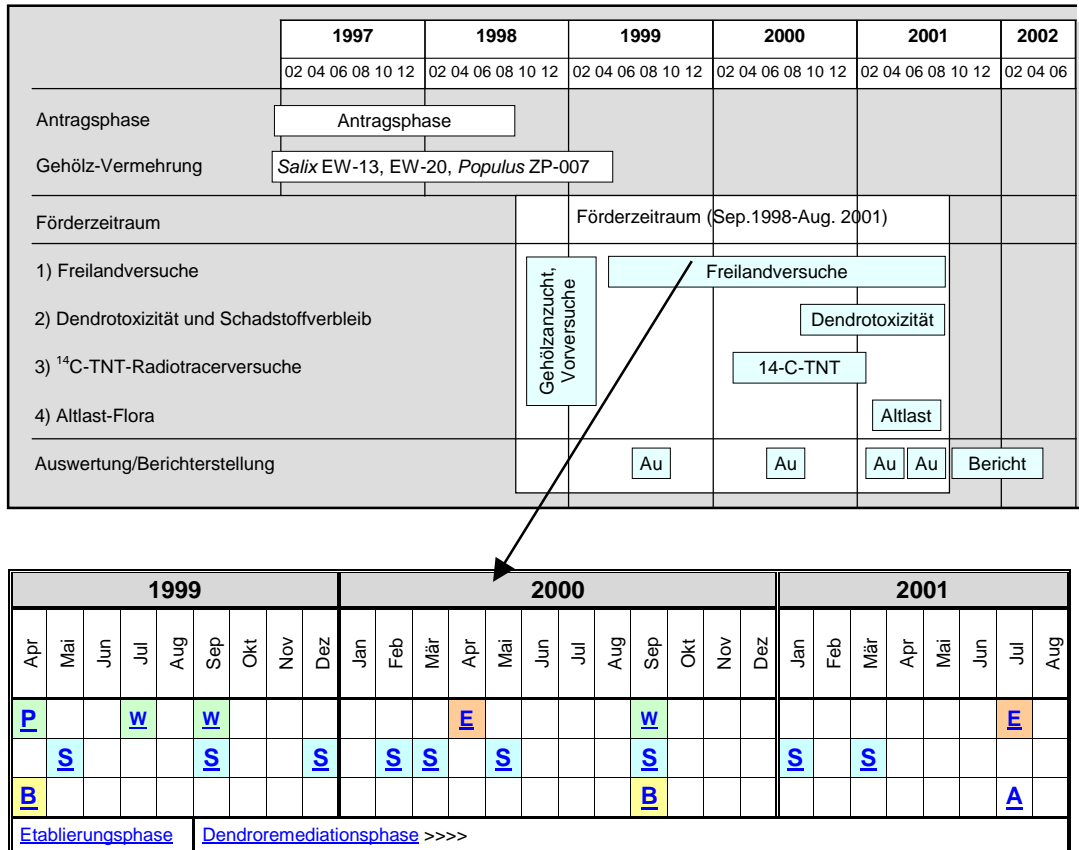


Abb. 1: Planung und Ablauf des Vorhabens

Freilandmessungen und Probenahmen:

- P** = Pflanzung **W** = Wachstumsmessung **E** = Ertragsmessung, Zwischenernte
- B** = Bodenbeprobung **S** = Sickerwassererfassung **A** = Analyse der Gehölzwurzeln

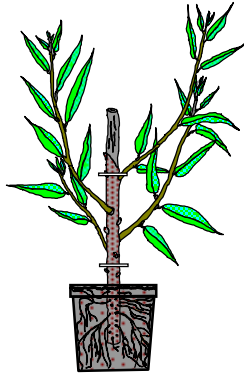
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand am Projektbeginn

Wissenschaftliche Ausgangsposition

Im Gegensatz zu krautigen Pflanzen ist das Phytoremediationspotential für sprengstofftypische Verbindungen bei Bäumen wenig untersucht. Nachweise über die Aufnahme von TNT, das hauptsächlich in Form der primären Reduktionsprodukte 4-Amino-2,6-dinitrotoluol (4-ADNT) und 2-Amino-4,6-dinitrotoluol (2-ADNT) im Gehölzgewebe wiedergefunden wurde, lagen nur von bewurzelten Steckholz-Jungpflanzen verschiedener Weidenklone (*Salix spec.*, z.B. Abb. 2) und Pappelhybriden (*Populus spec.*) vor ([Schönmuth 1996](#) [#L 5], [Schönmuth et al. 1997a](#) [#L 7], [Schönmuth et al. 1997b](#) [#L 8], [Thompson et al. 1998](#) [#L 9]). Über Aufnahme und/oder Metabolisierung von Explosivstoffen durch ältere Laubgehölze oder gar Nadelbäume sind auch zum Zeitpunkt der Berichterstellung keine Ergebnisse aus der Literatur bekannt.

Informations- und Dokumentationsdienste

Es wurde, neben den im [Projektantrag von 1997](#) [#L 6] aufgelisteten Literaturangaben, vorzugsweise das Internet und die [BBA](#)-eigenen Recherchemöglichkeiten zur Informationsfindung genutzt. Ein Abgleich der vom Autor mit Microsoft Access erstellten Literatur-Datenbank erfolgt mit den Datenbanken des Umweltbundesamtes. Eine vorläufige Auflistung der verwendeten Literatur ist mit ca. 1.000 Angaben auf der beigelegten CD als [references-2002.pdf](#) zu finden.



Kompartiment	TNT [mg/kg]	4-ADNT [mg/kg]	2-ADNT [mg/kg]	Summe [mg/kg]
1. Blätter	0,09	0,14	0,45*	0,68
2. Zweige	0,04	0,22*	0,77*	1,03*
3. Steckholz-Oberteil	0,06	0,00	0,02	0,08
4. Steckholz-Mittelteil	0,06*	0,26*	1,35*	1,67*
5. Steckholz-Unterteil	0,13*	1,22*	2,11*	3,46*
6. Wurzeln	2,27*	34,57*	34,78 *	71,61*
7. Boden	1,00*	5,55*	4,14*	10,69*

Abb. 2: Nachweis von TNT, 4-ADNT und 2-ADNT in *Salix* EW-027 nach 6 Monaten Altlastboden

Angaben nach Schönmuth 1996 [#L 5] [Schönmuth 1996]
 Dendroremediation unter TNT/ADNT-nachliefernden Bedingungen
 *) Signifikanz des Nachweises für $P > 0,95$.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Bereitstellung TNT-kontaminierter Böden, einschließlich begleitender Analysenzertifikate wurde dankenswerter Weise ermöglicht durch die gute Zusammenarbeit mit der [HIM GmbH](#) (Hessische Industriemüll GmbH), Projektleitung des Altlaststandortes Stadtallendorf (Herr Weingran).

1.6 Darstellung des erzielten Ergebnisses

Hauptziel der Untersuchungen war es, nach Möglichkeiten der Erfolgskontrolle eines Bodensanierungseffektes durch Nutzung des Dendroremediationspotentials von Laub- und Nadelgehölzen bei sprengstoffbelasteten Böden, die mit 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) und seinen Begleitstoffen kontaminiert sind, zu suchen.

Dazu wurden Freilandbilanzierungen des Bodenschadstoffschicksals mit Laub- und Nadelgehölzen in Kleinlysometern (Mitscherlichgefäßen), quantifizierende Dendrotoxizitäts- und Schadstoff-Verbleibsuntersuchungen mit neuartigen Dochtapplikationssystemen, Radiotracerbilanzierungen zu Verbleib und Kompartimentation von [^{14}C]-TNT in ausgereiften Bäumen, sowie Pflanzenanalysen an Altlast-Bäumen durchgeführt und durch vergleichende Parzellenertragsmessungen ergänzt.

Eine grafische Übersicht über die Verknüpfung von Voraussetzungen, Projektschwerpunkten, verwendeten Methoden, erzielten Haupt-Ergebnissen und Folgerungen wird in der Abb. 3 gegeben. An dieser Stelle erfolgt die Kurzdarstellung der Projektergebnisse. Zur ausführlichen Projektdarstellung wird auf die angefügte [Langfassung](#) des fachlichen Abschlussberichtes verwiesen.

1.6.1 Freilandversuche

Die Freilandexperimente wurden in 20-L-Mitscherlichgefäßen mit TNT/ADNT-Altlastböden in vier Belastungsstufen (0,06; 1,3; 36,7 und 152,5 mg TNT/kg Trockenboden) durchgeführt. Jede der vier Belastungsstufen (Bezeichnung: SA1, SA2, SA3, SA4) war mit folgenden sechs Bepflanzungsvarianten in drei Wiederholungen kombiniert: *Salix*-Hybriden EW-13 und EW-20, *Populus*-Hybride ZP-007, *Betula pendula*, *Picea abies* und die jeweilige unbepflanzte Kontrollvariante.

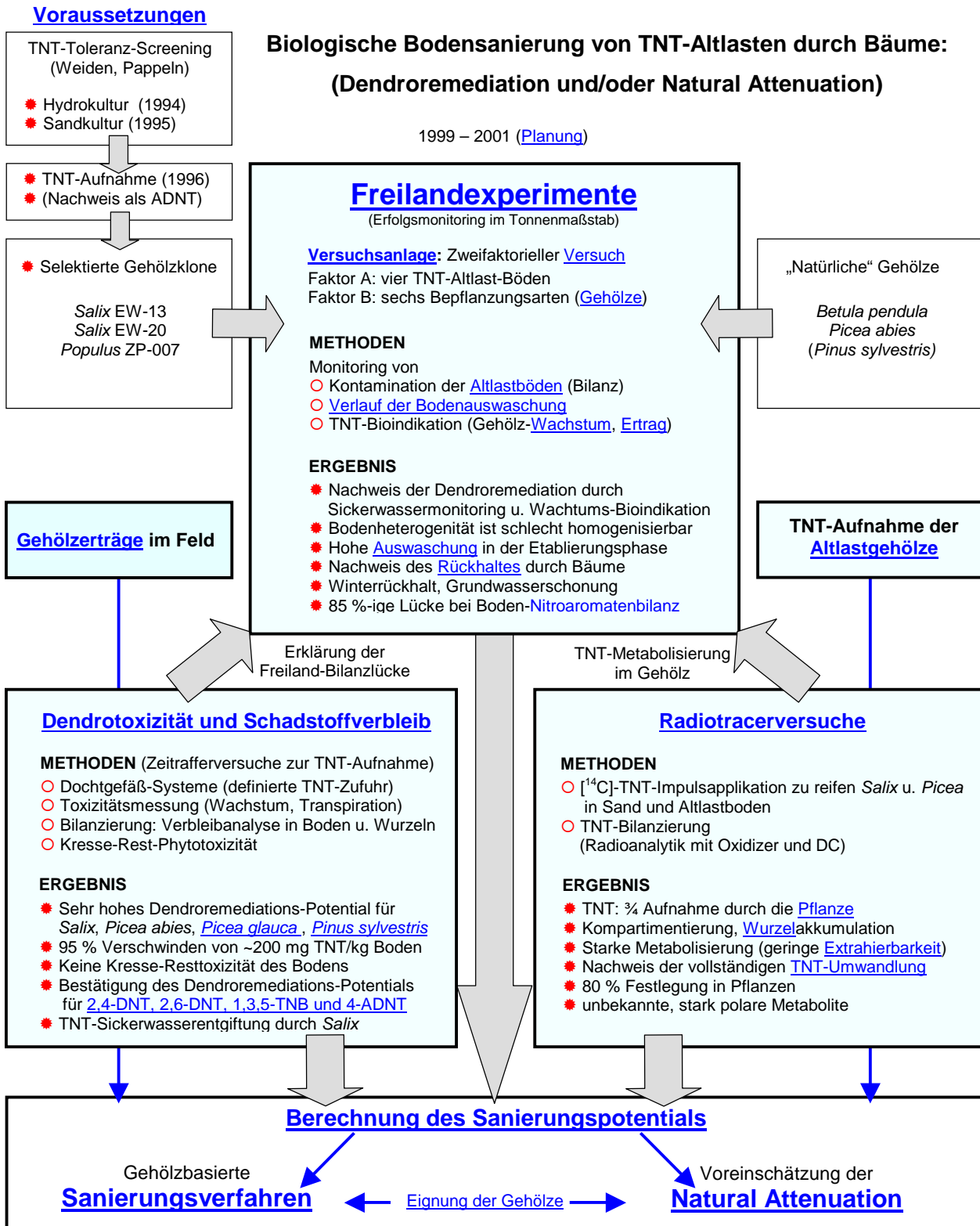


Abb. 3: Projektübersicht und Beweisnetzwerk der Dendroremediationspotenz



Die als zweifaktorieller Versuch konzipierte Versuchsanlage simuliert eine größere Fläche wechselnden Kontaminationsgrades mit 72 Messpunkten, die mit verschiedenen Gehölzen bepflanzt ist. Es herrschen Bodenbedingungen, die mit dem Zustand nach einer mechanischen *in-situ*-Bodenbehandlung (Bodenhomogenisierung durch Fräsen, Grubbern etc.) vergleichbar sind.

Im Gegensatz zu ursprünglich geplanten *in-situ*-Untersuchungen an gehölzbeplanten Bodenmieten bzw. Altlastflächen war mit unserem aktualisierten Versuchsansatz mit Kleinlysimetern eher eine Erfolgskontrolle im Sinne einer Bilanzierung möglich, da die Sickerwasserfrachten des gesamten Bodenkörpers quantitativ erfasst werden, interferierende Lateralverlagerungen durch Zu- und Wegstrom von Schadstofffrachten ausgeschlossen werden konnten und das gehölzdurchwurzelte Bodenvolumen definiert blieb.

Parameter zur Erfolgskontrolle waren der durch Bodenstechproben und Ethylacetat-Extraktion ermittelte Anfangs- und Restnitroaromatengehalt des Bodens, Sickerwassermonitoring sowie Wachstums- und Ertragsmessungen zur summarischen Schadstoff-Bioindikation des Gesamtbodenraums. Zur Erfolgssicherung wurde das Wachstumsmonitoring aller Gehölze parallel in Spiegelversuchen mit 1-m³-Lysimetern durchgeführt.

Bioindikation der Schadstoffe

Die bei den ersten Wachstumserfassungen vom Anfangs-Kontaminationsgrad des Bodens abhängigen Wachstumsunterschiede verlieren sich, bei allen Laubgehölzen übereinstimmend, schrittweise während der Dendroremediation. Bei Fichten bleibt das Bild wegen Kontaminationsinhomogenitäten der Böden im Gefäßversuch uneinheitlich. Die Absicherungsversuche in 1-m³-Lysimetern bestätigen jedoch die Tendenzen der Laubgehölzreaktionen. Der schrittweise Ausgleich der Wachstumsunterschiede und auch der Ertragswerte, spiegelt den abnehmenden Nitroaromatengehalt der Böden wieder, der auch durch abnehmende Sickerwasserfrachten bestätigt wird. Die Bioindikation des Schadstoffgehaltes ist dabei zuverlässiger als die Stichprobenanalytik des Bodens, wobei die *Salix*-Hybride EW-13 aus morphologischen Gründen die beste Eignung als Bioindikator zeigt.

Wachstumshemmungen halten nur beim „hoch“ kontaminierten Boden (SA4) bis zum Versuchsende nach anderthalb Jahren an und führen sogar zum gelegentlichen Absterben der Pflanzen. Als Ursache für diese, nicht mit dem Rest-Nitroaromatengehalt Bodens vereinbare Bioindikation, konnte eine zusätzliche Kontamination durch hohe Borgehalte ermittelt werden.

Sickerwasseranalysen

Die kumulative Bodenauswaschung (Zusammenrechnung aller Sickerwasseranalysen) ist bei unbepflanzten Varianten höher als bei beplanten Gefäßen. Diese Aussage gilt für die „sehr gering“, „gering“ und „mittel“ belasteten Böden (SA1-3). Beim „hochbelasteten“ Boden (SA4) ist eine Abhängigkeit der Auswaschung von der Bepflanzung nicht mehr eindeutig, was mit den Wachstumshemmungen und dem teilweisen Absterben der Pflanzen durch die zusätzlich Bor-Kontamination zu erklären ist. Die Bepflanzung hat bei allen vier Böden keinen Einfluss auf die GC-ECD-erfassbare Art der Zusammensetzung der Sickerwässer. Eine Erhöhung der TNT-Metabolitenanteile an der Nitroaromatenfracht durch den Bepflanzungseinfluss tritt in keinem Fall auf. Das TNT/ADNT-Verhältnis ist jedoch bei den vier verschiedenen Kontaminationsgraden der Böden unterschiedlich. Hohe Absolutwerte des TNT-Gehaltes bedingen auch einen höheren prozentualen TNT-Anteil.

Bodenanalysen

Nach zwei Vegetationsperioden im September 2000 durchgeführte Boden-Beprobungen erfolgten in zwei Ebenen. Wie bei der Anfangsbeprobung im Frühjahr 1999, traten sehr starke Schwankungen zwischen den zu vergleichenden Probenvarianten auf. Das teilweise partikulär oder kleinstlokal vorliegende TNT bzw. ADNT sowie unterschiedliche Bindungen an die anorganische und organische Bodenmatrix



bewirken eine hohe Variation der Analyseergebnisse. Generell ist eine starke Abnahme der Bodenkontamination nachweisbar, die jedoch auch in den unbepflanzten Varianten auftritt.

Unterscheidung in Etablierungs- und Dendroremediationsphase

Der Remediationsphase durch Gehölze („Dendroremediation“) ist eine Etablierungsperiode (rapide Anfangsauswaschungsphase) vorgeschaltet, die, ausgelöst durch die Strukturveränderung des Bodens während der Auskofferung und Homogenisierung, anscheinend eine hohe mikrobiologische Anfangsaktivität, aber auch durch die anfängliche Bodenbelüftung unspezifische Prozesse auslöst. Kennzeichnend für diese Anfangsphase, in der die Bodensackung, somit Verschluss von Makroporen und vor allem das Wachstum der Gehölze erst erfolgen muss, ist u.a. eine gegenüber der Dendroremediationsphase höhere Schadstoffauswaschungsgeschwindigkeit von TNT und ADNT.

Bei unserem Gefäß-Freilandmonitoring tritt während der Etablierungsphase der gleiche Effekt der starken Schadstoffminderung auf, der bei *in situ* durchgeführten mechanischen Bodenbearbeitungen anderer Projektgruppen als Sanierungsziel gilt.

Rückhaltfunktion der Gehölze

Weniger die Auswaschungsraten, als vor allem TNT-Abbauprozesse der Etablierungsphase überlagern und maskieren die mit der Bodendurchwurzelung und Transpirationssteigerung beginnende Dendroremediation.

Eine Phytoremediationswirkung ist erst nach Ablauf der Etablierungsphase als „gehölzbewirkte“ Verringerung der Sickerwasserfrachten eindeutig erkennbar. Diese geringeren Sickerwasserfrachten sind dabei nicht durch transpirationsbedingte Auswaschungsminderungen verursacht.

Der Rückhalteeffekt tritt bei geringeren TNT-Bodenkonzentrationen, die auch eine schnellere Gehölz-etablierung erlauben, schneller hervor, nicht jedoch bei Zusatz-Kontaminationsverhältnissen, die das Wachstum der Gehölze verhindern. Die Rückhaltfunktion ist sogar in Wintersickerwässern der blattabwerfenden Laubgehölze eindeutig nachweisbar, was vor allem deshalb sehr wichtig ist, weil in der Winterphase der Hauptteil der Grundwasserneubildung und damit der höchste Schadstoffeintrag erfolgt.

Bilanzlücke bei Bodenanalysen

Beim Vergleich des mit organischem Lösungsmittel extrahierten Anfangs- und Endnitroaromatengehaltes des Bodens bei gleichzeitiger Einrechnung des Sickerwasseraustrages und des Pflanzengehaltes zeigt sich eine Bilanzlücke von ca. 85 %, die mit den erwähnten Schwankungen in allen, auch in den gehölzfreien Varianten auftritt, somit Allgemeingültigkeit besitzt und nicht mit messtechnischen Ungenauigkeiten begründet werden kann. Diese erhebliche Bilanzlücke und die Tatsache, dass die Bodenkontaminationsanalysen eine nicht überwindbare Inhomogenität aufzeigen, forderten erweiternde Untersuchungen zum TNT-Schicksal, die u.a. durchgeführt wurden, um festzustellen, ob tatsächlich derart hohe TNT-Verluste im Boden/Baum-System auftreten können.

Bewertung der Bodenbeprobungen

Die Stichproben-Bodenbeprobung und die Extraktion mit organischen Lösungsmitteln können wegen der nicht überwindbaren Schadstoffinhomogenität die in den Sickerwässern und durch Bioindikation angezeigten Dendroremediationseffekte nicht hinreichend abbilden und sind trotz erheblichen quantitativen Aufwandes nicht geeignet, das Dendroremediationspotential von Gehölzen abzuschätzen.

Dies hat zu der entscheidenden Konsequenz geführt, dass bei zwangsläufig wesentlich gröber gerasterter *in-situ*-Untersuchungen von Altlastflächen Bodenstechproben lediglich der Groborientierung dienen können und beispielsweise schnelle Bodenhomogenisierungseffekte nachweisbar sind. Nachhaltige Phytoremediationseffekte werden *in situ* nicht durch Bodenproben nachweisbar sein, solange die Untersuchungszeiträume nur wenige Jahre betragen und laterale Schadstoffverlagerungen nicht ausschließbar sind.



Alternative Untersuchungsmöglichkeiten

Ein Ausweg zur Erfolgseinschätzung der Phytoremediation kann neben einer möglichen Bioindikation von pflanzenbedingten Sanierungseffekten darin liegen, den Schadstoff(TNT)-Eintrag in Phytoremediationssysteme kontrolliert quantifizierbar zu gestalten. *In situ* könnte ein durch Passivsammler berechenbarer Lateraleinstrom in einkapselbare, bislang unbelastete Kleinflächen, bei gleichzeitiger Toxizitätskontrolle des Wachstums der eingesetzten Pflanzen und engmaschiger Bodenanalytik, zur Berechenbarkeit von Sanierungseffekten führen, wobei es sich aus Gründen der hohen Transpirationsleistung, der Anpruchslosigkeit und der Langlebigkeit (Nachhaltigkeit) anbietet, Gehölze zu pflanzen oder bereits baumbestandene Flächen zu verwenden.

1.6.2 Dendrotoxizitäts- und Schadstoffverbleibsuntersuchungen

Zur schnelleren Einschätzung der Dendroremediationspotenz und als Querverbindung zu den Radiotraceruntersuchungen sind im vorliegenden Projekt zusätzlich einmonatige Zeitrafferversuche im Gewächshaus durchgeführt worden, die durch auswaschungssichere Dochtapplikationssysteme den bioverfügbaren TNT-Input durch temporäre Applikation von wassergelöstem TNT zu juvenilen und adulten Gehölzen definieren ließen. Gleichzeitig konnte die Dendrotoxizität durch Wachstums- und Transpirationssmessungen quantifiziert, der Nitroaromatenverbleib in Boden und Pflanze mittels GC-ECD-Analytik bilanziert und die Resttoxizität des Bodens im Kressetest überprüft werden. Als Gehölze fanden die, auch in den Freilandversuchen verwendeten Hybriden von *Salix* und *Populus* sowie *Picea abies* Verwendung. Zur Erhöhung der Allgemeingültigkeit des Ergebnis-Aussagewertes für Nadelgehölze wurden zusätzlich *Picea glauca* und *Pinus sylvestris* verwendet. Neben TNT, wurden auch wichtige TNT-Begleitstoffe, wie Dinitrotoluole (DNT), Trinitrobenzol (TNB) und Aminodinitrotoluole (ADNT) getestet.

Die aus den Versuchen resultierenden Ergebnisse und Folgerungen können zusammengefasst werden:

Nitroaromaten-Bilanz

- Quantitativ definierbare und zeitlich begrenzbar Zugaben bioverfügbarer Nitroaromaten erlauben **Bilanzen** des Schadstoffschicksals.
- Selbst zu abgelagertem Boden zugeführte Nitroaromaten (TNT, TNT-Metabolite, DNT) sind in hohem Maße nichtextrahierbarem Verschwinden unterworfen. Mit Ausnahme von 2,4-DNT mit ausreißenden Maximalwiederfindungen von ca. 10 % **verschwinden** mehr als **95 %** der temporär applizierten **Nitroaromate** im System Boden/ Pflanze, trotz der kurzen Nachwirkungszeit von ca. zwei Wochen.
- Die **absoluten Massen** des während der Dendroremediation verschwundenen TNT erreichen Werte im Bereich von **150-200 mg/kg**, bei *Picea glauca* sogar 230 mg TNT/kg Boden.
- **Hohe absolute Verschwinderaten/Abbauraten unter dendrotoxischen Bedingungen** im Bereich von 200 mg/kg Boden ergeben auch eine Möglichkeit der Erklärung für die 85 %-ige, gehölzunabhängige Bilanzlücke der Freilanduntersuchungen.
- Die gegenüber dem Boden allgemein höheren Konzentrationswerte bei der Nitroaromatenwiederfindung in Wurzeln haben wegen der geringen Masse der Wurzeln nur Bilanzanteile von unter 1 %.
- Die höheren Wurzelkonzentrationen sprechen dafür, dass die Schadstoffe durch den Transpirationssog die Pflanze erreicht, jedoch auf Grund der kurzen Erholungsphase noch nicht restlos aufgenommen oder metabolisiert worden sind. Es ist davon auszugehen, dass die an oder in den **Wurzeln aufgefundenen Nitroaromaten** weiter **metabolisiert** werden können, was die durchgeführten Radiotracerversuche an *Picea* und *Salix* beweisen.



- Es war in **keinem** behandelten Böden eine **Resttoxizität** im Bezug auf Wachstum und Transpiration von Kresse (*Lepidium sativum*) zu verzeichnen.

Nitroaromaten-Toleranz der Gehölze

- Die Bodenzufuhr an TNT bzw. TNT-Begleitstoffen ist transpirationsgesteuert. Die **Dendrotoxizität** ist eher von der Transpirationsgeschwindigkeit, somit vom Verhältnis von Zufuhr- zu Abbaugeschwindigkeit, abhängig, als von der absolut zugeführten Schadstoffmasse und weniger abhängig von der Art des Gehölzes.
- Es lässt sich die **Toleranz des Dendroremediationssystems** gegenüber wassergelösten Schadstoffen abschätzen. Dies ist sehr wichtig für die Zufuhr von kontaminierten Sickerwässern zu gehölzbasierten Pflanzenkläreinrichtungen oder für das zufällig durch austretende Bergwasser oder Run-off-Effekte (Starkregenereignisse, Schmelzwasserabfluss) erfolgende oder das gezielte Einleiten von kontaminierten Wässern in Waldbestände.
- Als **Toleranzgrenze** sollten Konzentrationswerte von **15 mg/l** angesehen werden. Bis auf die 2,4-DNT-Ausnahme, gilt diese Richtkonzentration für alle getesteten Nitroaromaten. Es tritt bei dieser Konzentration zwar eine relative Wachstumsminderung gegenüber der Kontrolle ein. Die Wachstums- und Transpirationsleistung bleibt aber auf einem akzeptablen Maß. Wie TNT-Applikationen zu Dochtschalen zeigten, sind TNT-bewirkte Wachstumshemmungen bei *Salix* EW-13 zudem reversibel. Auch der Neuaustrieb nach dem Zweigrückschnitt temporär DNT-behandelter *Salix* EW-13 ist unabhängig von der Vorbehandlungskonzentration.

Simulation der Dendroremediation

Durch den Transpirationsstrom der Gehölze angetrieben, **simulieren** die Versuche allein die **Dendroremediation des bodenwassergelösten Anteils** der Nitroaromaten.

Die Simulationen berücksichtigen nicht den Dendroremediationsanteil gegenüber reversibel an die organische Bodenmatrix oder Tonminerale gebundenen Nitroaromatenanteilen, die durch organische Lösungsmittel analytisch zugänglich wären. Unter natürlichen Bodenbedingungen sind Steigerungseffekte des Dendroremediationspotentials zu erwarten durch:

- die zusätzliche Phytoextraktionskraft der Gehölzwurzeln durch Ausscheidungen von Enzymen und organischen Säuren
- die Effekte der durch Wurzelexsudate geförderten mikrobiellen Rhizosphärenflora
- die vor allem für die Nadelgehölze wichtige Mykorrhizawirkung

Berechenbarkeit der Dendroremediation

In der Querverknüpfung mit den durchgeführten Parzellenertragsmessungen, den Radiotraceruntersuchungen und mit Literaturwerten zur Evapotranspirationsleistung ermöglichen die aufgezeigten Ergebnisse zur Dendrotoxizität (bzw. Nitroaromatentoleranz) und zum Schadstoffverbleib die Erstellung von Berechnungstabellen für die Dendroremediationsdauer von TNT-Böden bei angepflanzten oder vorhandenen Gehölzbeständen.

1.6.3 Radiotracer-Untersuchungen mit [¹⁴C]-TNT

Die für das Projekt qualitativ wichtigsten Ergebnisse lieferten die Radiotracer-Untersuchungen mit [¹⁴C]-markiertem 2,4,6-Trinitrotoluol an vierjährigen, stark verholzten Laub- und Nadelgehölzen (*Salix* EW-20 bzw. *Picea abies*) in Dochtgefäßen.

Durch gezielte Versuchseinstellung, die eine permanente TNT-Nachlieferung ausschloss (kurzer [¹⁴C]-TNT-Impuls in wässriger Form, sehr lange Nachwirkungszeit) konnte gezeigt werden, dass bei



Verwendung verholzter Bäume, diese durch die Antriebskraft ihrer Transpiration innerhalb von zwei Monaten in der Lage sind, sowohl über den Boden wie auch über basale Dochtbewässerung durch den Boden hindurchgeleitetes, appliziertes [^{14}C]-TNT zu über drei Vierteln in die Pflanze zu aufnehmen bzw. zu inkorporieren. Ca. 90 % dieser gehölzlokalisierbaren TNT-Radioaktivität befinden sich, sowohl bei Weiden als auch bei Fichten, in den Baumwurzeln. Die restlichen, in die oberirdischen Baumteile gelangten Anteile (ca. 10 %) sind bei Fichten überwiegend in den vorjährigen Nadeln (ca. 50 %), bei Weiden jedoch vor allem im rindenfreien Holz der Stämme (ca. 50 %) und in den Zweigen (25 %) zu finden.

Im quantitativ bedeutsamsten Wurzelkompartiment sind mindestens drei Viertel der wurzellokalisierten Radiaktivität fest inkorporiert. Selbst bei der erfolgreichsten, essigsäuren Extraktion sind nur noch 25 % (Fichtenwurzeln) bzw. 18 % (Weidenwurzeln) extrahierbar. Es hat offensichtlich eine intensive Metabolisierung des TNT im Wurzelholz und in der Wurzelrinde stattgefunden. Der geringe, noch extrahierbare Restanteil der TNT-bürtigen Radioaktivität ist ebenfalls metabolisiert. Bei dünnschichtchromatografischer Auftrennung sind weder TNT, noch die bekannten TNT-Metabolite (Aminodinitrotoluole, Diaminodinitrotoluole) zu finden. Nur noch sehr polare und polare TNT-Abkömmlinge sind in der quantitativ geringen Extraktfraktion nachweisbar.

Diese Ergebnisse der vollständigen [^{14}C]-TNT-Umwandlung an verholzten Bäumen und die differenzierte Kompartimentierung sind neuartig. Radiotracer-Ergebnisse mit [^{14}C]-TNT liegen bislang nur von juvenilen Pappelstecklingen vor (Thompson *et al.* 1998 [#L 9]). Dort waren jedoch noch Aminodinitrotoluole und Diaminodinitrotoluole als TNT-Metabolite auffindbar, was in einer Vielzahl von Arbeiten bisher als alleiniger Hinweis auf die TNT-Dendroremediationspotenz von Pappeln gewertet wird.

Von älteren Laubgehölzen oder von den für die deutschen Rüstungsaltposten so vegetationsdominanten Nadelbäumen sind bisher keine weiteren [^{14}C]-TNT-Bilanzierungsergebnisse bekannt.

1.6.4 Standortgehölzflora

Untersuchungen wurden an Altlastgehölzen (Salweide, Birke, Himbeere, Fichte) aus dem ehemaligen Sprengstoffwerk „Tanne“ in Clausthal-Zellerfeld (nahe ehem. Gebäude 110) durchgeführt. In der dortigen Gehölzflora ist die Fichte dominant.

Die Ergebnisse ergaben ein gemischtes Bild. In Gehölzwurzeln, deren Umgebungsboden TNT, bzw. auch Aminodinitrotoluole (ADNT) enthält, sind TNT und ADNT immer nachweisbar. Eine quantitative Zuordnung der sehr stark variierenden Nitroaromatengehalte zum Kontaminationsgrad des umgebenden Bodens ist bei Streuungen der Bodenproben von 1000 % und mehr jedoch nicht mehr sinnvoll.

Bei oberirdischen Anteilen von erwachsenen Bäumen ist die Rinde für Untersuchungen wegen des hohen Matrixpotentials ungeeignet. Auch Nadeln junger Fichten (ca. 1-3-jährig) sind wegen des Matrixpotentials und ihrer Bodennähe kaum analysierbar.

Allein das rindenfreie Holz (Weiden, Birken, Fichten) lässt sich mit vertretbarem Aufwand mittels GC-ECD analysieren. Die Proben-Entnahme aus dem inneren Stammbereich verhindert zudem die Messung von oberflächlichen Zufallskontaminationen, die vom Regenspritzwasser oder von Stäuben aus den umgebenden hochkontaminierten Böden herrühren.

In oberirdischen Bereichen (Stammhöhe bis 1 m) sind ADNT, aber kein TNT, im Holz von Salweiden in Spuren bis maximal 0,4 mg/kg nachweisbar, nicht im 1-m-Holz von Fichten und Birken. Im Frühjahrsblutungs saft von Birken von der Rüstungsaltposten Sythen (Nordrhein-Westfalen) waren ebenfalls keine Nitroaromaten nachweisbar.

Es zeigte sich jedoch, dass selbst die wenigen sicheren ADNT-Nachweise nicht bei jeder Beprobung gelangen. ADNT-Nachweise scheinen von der Witterung abzuhängen. Beprobungen zur frühen Mit-



tagszeit heißer Sommertage, zu Zeiten also, wo die Bäume am lebhaftesten transpirieren, haben die größte Aussicht auf eine ADNT-Nachweismöglichkeit. Jedoch sind auch diese nicht verlässlich.

Da aus den o.g. Radiotracer-Ergebnissen bekannt war, dass bodenbürtiges TNT in den Gehölzen festgelegt wird bzw. vollständig metabolisiert werden kann, sind die bei den Altlastgehölzen „mislungenen“ Nitroaromatennachweise, sowie Negativbefunde bei früheren Gehölz-Gefäßversuchen erklärbar. Mit der „kalten“ GC-ECD-Analytik sind nur dann bekannte TNT-Abkömmlinge erfassbar, wenn die TNT/ADNT-Nachlieferung in der Pflanze deren Festlegungs- bzw. Metabolisierungsgeschwindigkeit übersteigt. Eine quantitative Beziehung zwischen eventuell in Bäumen nachweisbaren Nitroaromaten und der Bodensanierungsleistung von Gehölzen ist nicht aufstellbar, solange der Wurzeleinzugsbereich und somit der TNT-Ausgangswert der Böden, die Evapotranspirationsleistung der Gehölzbestände und der Einfluss lateraler Schadstoffverlagerungen nicht exakt quantifizierbar ist.

Hinsichtlich der Holznutzung von Altlastwäldern ist von einer Unbedenklichkeit der Schadstoffgehalte des Holzes auszugehen. Durch Regenspritzwasser und staubenden Bodenkontakt verschleppte Bodenkontaminationen, die auch die analytischen Arbeiten erschwerten, sind weitaus eher als das Altlastholz als „Gefährdungsquelle“ zu berücksichtigen.

1.7 Verwertbarkeit des Ergebnisses

Methodisch-experimentelle Nutzungen

Die während des Projektes entwickelten Methoden zur Erfassung des Dendroremediationspotentials sind ausdehnbar auf weitere Schadstoffe des Rüstungsbereiches, aber auch auf andere gut bis mäßig mobile Organika und anorganische Schadstoffe. Hervorgehoben soll dabei die Eignung der entwickelten Dochtapplikationssysteme für adulte Gehölze werden. Die Doppeltragsysteme sind darüber hinaus so konzipiert, dass neben der angeführten Nutzung zur Flüssigapplikation bei Folgeuntersuchungen späterer Projekte der innere (untere) Trog mit originalkontaminiertem oder definiert dotiertem Boden befüllt und mit einstellbarer Wassersättigung zur Dendroremediationstestung genutzt werden kann.

Praktische Nutzung

Die Gesamtheit der Ergebnisse des Projektes führt zu unmittelbaren praktischen Nutzungsmöglichkeiten für gehölzbasierte Sanierungsverfahren, die wegen ihrer Anspruchslosigkeit und Nachhaltigkeit dem Einsatz krautiger Pflanzen zur Phytoremediation überlegen sind. In der Kurzfassung des Berichts können Nutzungsmöglichkeiten jedoch nur ansatzweise genannt werden.

Das Dendroremediationspotential von Neuanpflanzungen lässt sich bei den getesteten Gehölzen auf Grund experimenteller Ergebnisse und Freilandertragsmessungen berechnen und das Potential von mitteleuropäischen Altlastwäldern zur „Natural Attenuation“ lässt sich ebenfalls quantifizieren (Langfassung des Berichts). Abgeleitet von unseren Dochtschalenversuchen sind Nutzungsmöglichkeiten geeigneter Gehölze (s. Tab. 1) für gehölzbasierte Pflanzenklärsysteme besonders leicht abzuschätzen, da hier die Schadstoffzufuhr kontrollierbar bleibt.

Die Auswahl und konkrete Nutzung der untersuchten Gehölze zur Dendroremediation muss naturgemäß standortbezogen erfolgen, wobei die in der Tab. 1 zusammengefassten Eigenschaften und Eignungen der Gehölze eine erste Orientierung bieten können.

Langfristig, im Sinne der Nachhaltigkeit, ist Nadelgehölzen, die u.a. wegen ihrer Wintertranspiration und ihrer weitaus höheren Interception (Kronenrückhalt des Niederschlagswassers) eine geringere Versickerung bei Starkregenereignissen bewirken, der Vorzug vor Laubgehölzen zu gewähren, wobei Mischbepflanzungen mit späterer Ausdünnung der Laubgehölze einen schnelleren Anfangserfolg ermöglichen.



Tab. 1: Eigenschaften und Eignung der Gehölze zur Dendroremediation (DR)

Salix EW-27 wurde im vorliegenden Projekt nur für Vorversuche eingesetzt. n.b. = nicht bestimmt.

- X ja
- + gut
- ++ mittel
- +++ sehr gut
- wenig
- - überhaupt nicht

Gehölz	Salix EW-13	Salix EW-20	Salix EW-27	Populus ZP-007	Betula pendula	Picea abies	Picea glauca	Pinus sylvestris
Verfügbarkeit								
Lokale Forstbaumschulen					X	X	X	X
Biologische Bundesanstalt (BBA)	X	X		X				
Schönmuth			X					
Vermehrung								
Vegetative Vermehrbarkeit (Klonware)	++	+	+++	++	-	--	--	--
Sämlingsvermehrung					X	X	X	X
Austrieb								
Phänologisch (+ = früh, ± = mittel, - = spät)	++	+	±	±	±	--	-	-
Winterruhe/Knospenruhe	+	++	+	++	+++	+++	+++	+++
Bisherige Verwendung/Untersuchung								
Verwendung bei Freilandexperimenten	X	X		X	X	X		
Verwendung bei Dochtgefäß- und -Schalenversuchen	X	X		X	X	X	X	X
Verwendung bei Radiotracerversuchen		X			X			
Altlast-Gehölzanalysen		(X)			X	X		
Nachweise des TNT-Abbaus								
Nachweis von TNT bzw. ADNT (Wurzeln)	X	X	X	X	X	X	X	X
Nachweis von TNT bzw. ADNT (oberirdisch)	X	X	X	X	---	(X)		
14-[C]-TNT-Umwandlung als Radiotracer-Nachweis		X				X		
Sonstige Eigenschaften								
Etablierungsgeschwindigkeit	+++	++	+++	++	+	+	+	+
Temporäre Überflutungstoleranz	++	+	+++	++	-	--	--	--
Transpirationsleistung	++	++	+++	+++	+-	++	++	+
Trockenheitsresistenz (Dürre-resistenz)		++			+	+		++
Eignung zu schnellen Kompostierung des Holzes	+	+	+	+				
Mykorrhizierung zu DR-Verbesserung sinnvoll						+	+	+
Jahres-Trockenmasse-Ertrag im Parzellenversuch [dt/ha]	84	56	n.b.	86	55	78	n.b.	26
Jahres- Trockenmasse-Ertrag im Parzellenversuch [kg/m ²]	0,84	0,56	n.b.	0,86	0,56	0,78	n.b.	0,26
Eignung zur Kurzumtriebskultur (Schnellwachsender Rohstoff)	X	X	X	X				
Experimentell bestimmtes Sanierungspotential								
Jahres-Dendroremediationspotential [g TNT/m ²]	6,0	8,5	n.b.	4,2	5,2	1,9	n.b.	0,8
Eignung für experimentelle Dendroremediation								
Eignung für Dochtgefäßversuche	++	+	++	+	-	+	++	+
Eignung für Freiland-Bioindikation von TNT	+++	+	+	+	+	+	+	+
Eignung zur praktischen Dendroremediation								
Gehölzbasierte Pflanzenkläranlagen	++	+	+++	++	-	--	--	--
Hydraulische Kontrolle („hydraulic control“)	++	+	+++	++	-	--	--	--
Gehölz-Pufferstreifen an Gewässern (u.a. run-off-Minderung)	++	++	+++	++	+	+	+	+
Bepflanzung von Altlastboden-Mieten	+	++			+			
Eignung als „vegetation cover“ zur Sickerwasserminderung	+	++	+					
Eignung als Repositionspflanzen zur Revegetation	+	++			+			+
Dendroremediation von Altlastwäldern								
Anpflanzung von Wäldern nach Bodenhomogenisierung	+	+	+	+	+	+++	+	+++
Interception (Versickerungsminderung durch Kronenrückhalt)	+	+	+	+	+	++	++	+++
Förderung von Natural Attenuation Prozessen	+	+	+	+	+	+	+	+



Auf Bodenhomogenisierungen bei Neuanpflanzungen ist wegen der starken Anfangsauswaschungen unbedingt zu verzichten oder diese Bodenhomogenisierungen sind mit feinsten Bodenverteilung ausreichender Mengen organischer Substanz zur Nutzung der spontan expandierenden Mikroorganismenflora zu kombinieren. Das Zeitfenster von Ende April bis Anfang Mai ist als Bepflanzungstermin vor allem wegen der Niederschlagsentwicklung und ihres Einflusses auf die Grundwasserbilanz zu wählen. Dem sommerlichen Zusammenbruch homogenisierungsbedingt aktivierter Mikroorganismenpopulationen durch Bodentrockenheit und auch der dann eingeschränkten Wasserverfügbarkeit etablierter Junggehölze oder Altlastwälder (Transpirationseinschränkung!) kann durch grundwasserschonende, tensiometergesteuerte Bewässerung entgegengewirkt werden.

Für vorhandene Nadelholz-Altlastwälder und Einzelbäume auf besiedelten Altlasten ist ein erhebliches Sanierungspotential berechenbar. Eine Abholzung und/oder Ersatz durch schnellwachsende Laubbölzer ist daher zu vermeiden.

1.8 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In den USA werden als Gehölze vorwiegend Pappel-Hybriden für die Dendroremediation von Schwermetallen, Stickstoff (Nitrat, Ammonium) und Radionucliden als Vertreter der Anorganika geprüft. Bei organischen Kontaminanten werden ebenfalls Pappeln eingesetzt, seltener auch Weiden, Erlen und Eucalyptus. Zielstoffe der Phytoremediationsuntersuchungen sind dabei unter anderem Pestizide (Herbizide, z.B. Atrazin), halogenierte flüchtige Verbindungen (Chlorierte Lösungsmittel, z.B. Trichlorethylen, Holzschutzmittel), volatile und semi-volatile Erdölprodukte, BTEX, Formaldehyd und undefinierte Depo-niesickerwässer ([EPA-Bericht 600/R-99/107](#), Appendix B, 2000, [#L 12]).

Zur Phytoremediation von sprengstofftypischen Verbindungen werden u.a. pflanzenbasierte Klärmethoden („constructed wetlands“) mit Feuchtwasser- und Wasserpflanzen untersucht und z.T. in Großversuchen eingesetzt. Beispiele dafür sind die Grundwassereinigung in der [Milan Army Ammunition Plant](#), Milan Tennessee (TNT, RDX, HMX, DNT), [Volunteer Army Ammunition Plant](#), Chattanooga, Tennessee und [Iowa Army Ammunition Plant, Middletown, Iowa](#).

Das Potential von Pappeln zur Phytoremediation von Explosivstoffen wird in der Arbeitsgruppe um [Jerald Schnoor](#) im [Department of Civil and Environmental Engineering](#) der University of Iowa untersucht (z.B. #L 9, #L 10). Dendrotoxizitätsuntersuchungen mit TNT und ADNT sind an Pappeln geplant [#L 4].

In Dänemark wird die Dendroremediationswirkung von Weiden auf Tankstellenaltlasten geprüft [#L 14].

In Deutschland sind Untersuchungen zur Eignung von Gehölzen zur Sanierung sprengstoffkontaminierter Böden von der [Wasag-Decon GmbH](#) (Altlast Haltern-Sythen, Westfalen) geplant, nachdem Phytoremediationsversuche mit krautigen Pflanzen (*Medicago sativa*, *Carex buchananii* und *Miscanthus sinensis*) erfolgreiche Tendenzen zeigten [#L 1].

Im Rahmen des [BMBF](#)-Verbundprojektes „Biologische Sanierung von Rüstungsaltlasten“ wird ein Projekt von der [Universität Bremen](#) in Kooperation mit dem Sanierungsunternehmen [UMWELTSCHUTZ NORD GmbH & Co./Ganderkesee](#) mit dem Thema „Erprobung eines biologischen Sanierungsverfahrens mit höheren Pflanzen (Phytoremediation) auf dem Standort des ehemaligen Sprengstoffwerkes 'Tanne' bei Clausthal-Zellerfeld“ durchgeführt [#L 2, #L 3, #L 13].

Eine *in-situ*-Misch-Bepflanzung von 30-cm tief gefrästem TNT-Boden mit Schwarzem Holunder, Zitterpappeln und Rotfichten wird variantenreich mit dem Zusatz von Rindenmulch, Stroh, streuabbauenden Pilzen (*Pleurothous ostreatus*, *Trametes versicolor*) und Mykorrhiza-Pilzen (*Pisolithus tinctoris*, *Paxillus involutus*) kombiniert. Die Erfolgskontrolle erfolgt chemisch an Saugkerzen-Bodenlösungen und an Bodenstichproben durch chemische Analyse und durch bodenökologische Untersuchungen gemischter Stichproben mit sechsfacher Biotestbatterie. Eine *in-situ*-Bioindikation des Gehölzwachstums wird bisher nicht dokumentiert [#L 2, #L 3, #L 13].



Eine Schadstoffbilanzierung ist wegen der fehlenden Flächenbezugsmöglichkeit nicht möglich.

Der Wert der Projektergebnisse liegt vor allem im Aufbau eines komplexen chemisch-biologischen Monitoringprogramms. Die starke initiale Abnahme der TNT-Kontamination wird durch die Bodenhomogenisierung dominiert. Dendroremediationseffekte sind nach einem Untersuchungszeitraum von ca. 1,5 Jahren noch nicht fassbar [#L 3].

1.9 Erfolge oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

1.9.1 Erfolge Veröffentlichungen

Schoenmuth, B. 2002:

Freilandversuche zur TNT-Dekontamination und [¹⁴C]-TNT-Aufnahme durch Gehölze.
Veröffentlichung des Kurzberichts im Internet bei der TIB Hannover und unter
<http://www.dendroremediation.de/>

Schoenmuth, B., Pestemer, W. 2000:

Poster 28: Aufnahme und Verbleib von [¹⁴C]-Trinitrotoluol in Weiden und Fichten.,
2. Symposium "Natural Attenuation", 7.-8.Dez. 2000, DECHEMA e.V., Frankfurt a.M.,
Poster: <http://www.dendroremediation.de/bericht2002/zwischenberichte/Poster-natatt-2000.pdf>
Abstract: 3 S. <http://www.dendroremediation.de/pdf/poster-natatt-tnt2001a.pdf>, 312 KB

Bis zur Realisierung der unter 1.9.2 geplanten Teil-Veröffentlichungen muss die in gedruckter und auf Datenträger vorliegende Langfassung des Berichtes vertraulich behandelt werden.

1.9.2 Geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Geplant ist die Einrichtung eines Internet-Portals: „Dendroremediation“ mit Auszügen aus dem Projektbericht und einer thematisch differenzierten Bibliografie zur Phytoremediation von Explosivstoffen sowie die Erstellung internetverfügbarer Eignungs-Datenblätter die im Projekt untersuchten Gehölze.

Die zur Veröffentlichung in Fachzeitschriften geplanten Titel sind nachfolgend aufgelistet:

1. Schoenmuth, B., Pestemer, W. 2002:
Dendroremediation: Monitoring phytoremediation of explosives in out-door experiments with lysimeter pots using selected tree clones (*Salix*, *Populus*), and natural occurring trees (*Betula*, *Picea*).
2. Schoenmuth, B., Pestemer, W. 2002:
Dendroremediation: New methods for determination of explosives phytotoxicity to juvenile and older trees by monitoring growth and transpiration, using liquid application to soil based systems.
3. Schoenmuth, B., Pestemer, W. 2002:
Phytotoxic effects of dinitrotoluenes (DNT) and trinitrotoluene (TNT) metabolites on transpiration and growth of juvenile hybrid willow trees (*Salix* EW-13) in a soil based test system and fate of tested substances in soil and plants.
4. Schoenmuth, B., Pestemer, W. 2002:
Tolerance of juvenile hybrid *Salix* EW-13 and older trees of *Salix*, *Picea* and *Pinus* to the explosive 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and GC-ECD analysis of recovered TNT in soil and plant roots.
5. Schoenmuth, B., Pestemer, W. 2002:
Dendroremediation: Simple calculation of phytoremediation potential and quantification of natural attenuation of forests basing on experimental greenhouse results and yields in the field.
6. Schoenmuth, B., Pestemer, W. 2002:
Complete transformation of [¹⁴C]-trinitrotoluene (TNT) to unknown metabolites and mass balance of TNT in four years old deciduous trees (*Salix* EW-20) and conifers (*Picea abies*) after temporary TNT application.
7. Schoenmuth, B., Pestemer, W. 2002:
Sanierungsempfehlungen für den Einsatz von Laub- und Nadelgehölzen zur Phytoremediation explosivstoffverseuchter Flächen.



1.10 Im Kurzbericht zitierte Literatur („#L“)

- #L 1 Gerth, A., Böhler, A., Eulerling, B. und Thomas, H. 2000:
Biologische in-situ Sanierung TNT-kontaminierter Böden. TerraTech 4, 61-63
<http://www.wasag-decon.de/terratec.htm>
- #L 2 Koehler, H., T. Frische, I. Dobner, P. Behrend, M. Schaefer, H. Taubner, B. Jastorff, J. Warrelmann, U. Walter (2001a): Erprobung und Erfolgskontrolle eines Phytoremediationsverfahrens zur Sanierung Sprengstoff-kontaminierter Böden. Teil II: Ergebnisse eines Freilandexperimentes.
UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox. 13 (5): S. 291-300, siehe auch: <http://www.uft.uni-bremen.de/tanne/tanne.htm>
- #L 3 Koehler, H., Warrelmann, J., Behrend, P., Dobner, I., Frische, T., Heyser, W., Jastorff, B., Walter, U., 2001b: Erprobung und Erfolgskontrolle eines Phytoremediationsverfahrens zur Sanierung Sprengstoff-kontaminierter Böden: Teil III. Beurteilung des Verfahrens. UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox. 13: 359-368.
siehe auch: <http://www.uft.uni-bremen.de/tanne/tanne.htm>
- #L 4 Schnoor, J.L., Thompson, P.L., seit 2001 geplant
The toxicity of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and its metabolites to *Populus* sp.
Department of Civil and Environmental Engineering,
The University of Iowa, <http://www.cheec.uiowa.edu/seed/fy96/96i.html>
- #L 5 Schönmuth, B. 1996:
Dekontamination schadstoffbelasteter Böden mit Hilfe speziell selektierter Pflanzenarten bzw. -sorten mit hoher metabolischer Entgiftungskapazität.
Teilvorhaben 6 im BMBF-Verbundvorhaben „Biologische Sanierung von Rüstungsaltslasten“
Förderkennzeichen 14 50 85 8 3, Projekt-Abschlußbericht 1996,
Projekträger des BMBF für Abfallwirtschaft und Altlastensanierung, Umweltbundesamt Berlin,
39 S., <http://www.dendroremediation.de/bericht2002/bericht1996/abschlussbericht1996.pdf>
- #L 6 Schönmuth, B. 1997:
Projektantrag und Vorhabensbeschreibung (Fassung von 1997),
Verbundvorhaben „Biologische Sanierung von Rüstungsaltslasten“
Teilvorhaben: „Freilandversuche zur TNT-Dekontamination und [¹⁴C]-TNT-Aufnahme durch Gehölze“, 13 Seiten
<http://www.dendroremediation.de/bericht2002/antrag1997/antrag1997.pdf>
- #L 7 Schönmuth, B., Lyr, H., Burth, U. 1997a:
Dekontamination schadstoffbelasteter Böden mit Hilfe selektierter Pflanzenarten bzw. -sorten mit hoher metabolischer Entgiftungskapazität
Verbundvorhaben Biologische Sanierung von Rüstungsaltslasten, 3. Statusseminar 26.-27.2.97 Berlin; Umweltbundesamt Projekträger Altlastensanierung und Abfallwirtschaft, Vortrag M, 11 S.,
<http://www.dendroremediation.de/bericht2002/1997-drittes-statusseminar/Status1997-06-korr.pdf>
- #L 8 Schönmuth, B., Lyr, H. Burth, U. 1997b:
Sanierung TNT-verseuchter Flächen durch Gehölze. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem, Heft 327 (1997), S. 199-201,
In: Krasel, G.; Pestemer, W.; Bartels, G. (Hrsg.):
Strategien zum Bodenschutz in der pflanzlichen Produktion (Strategies for soil conservation in crop production),
223. S., Paul Parey Buchverlag Berlin,
ISSN 0067-5849, ISBN 3-8263-31624-1, <http://www.dendroremediation.de/bericht2002/pdf/1997-mitt328-TNT.pdf>
- #L 9 Thompson P.L., Ramer L. A., Schnoor, J.L. 1998:
Uptake and transformation of TNT by hybrid poplar trees.
Environmental Science & Technology, 32 (7), 975-980
- #L 10 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.
- #L 11 Trapp, St. 2000:
Aspekte der Phytoremediation organischer Schadstoffe. UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox. 12 (5) 246-255 (2000).
- #L 12 [US-EPA](http://www.epa.gov) 2000:
Introduction to phytoremediation. Report EPA/600/R-99/107, Febr. 2000, 93 Seiten
<http://www.epa.gov/swertio1/download/remed/introphyto.pdf>
<http://www.clu-in.org/download/remed/introphyto.pdf>
- #L 13 Warrelmann, J.; Koehler, H., Frische, T., Dobner, I.,; Walter, U., Heyser, W. (2000):
Erprobung und Erfolgskontrolle eines Phytoremediationsverfahrens zur Sanierung Sprengstoff-kontaminierter Böden. Teil I: Konzeption und Einrichtung eines Freilandexperimentes.
UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 12 (6): S. 351-357 ,
<http://www.scientificjournals.com/db/pdf/uwsf/2000.11/uwsf2000.11.032.pdf>
siehe auch: <http://www.uft.uni-bremen.de/tanne/tanne.htm>
- #L 14 Zambrano, K., Larsen, L.C., Trapp, S. 2001:
Bepflanzung einer Tankstelle mit Weiden.
UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 13(4), 227-236

