

Aufnahme und Rückhalt des Sprengstoffs Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin (RDX) durch Rotfichten (*Picea abies*)

Uptake and retention of the explosive hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in Norway spruce (*Picea abies*)

Jakob O. Mueller^{1*}, Bernd Schoenmuth¹, Detlef Schenke², Carmen Büttner¹
und Willfried Pestemer¹

Einleitung

Der Nitraminsprengstoff Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin (Royal Demolition Explosive = RDX, Hexogen) ist Hauptbestandteil der meisten Sprengstoffgemische und zählt zu den wichtigsten Kontaminanten auf Rüstungs-Altstandorten und auch auf derzeit militärisch genutzten Flächen (KWON und FINNERAN 2006). RDX ist ein persistenter Bodenschadstoff mit humantoxischen und karzinogenen Effekten. Durch Niederschlagsauswaschung in Grund- und Oberflächengewässer gefährdet RDX die Trinkwasserressourcen.

Großflächig mit Sprengstoffen belastete Areale sind oft von Nadelwäldern bedeckt (SCHOENMUTH und PESTEMER 2004) und Koniferen zeichnen sich durch hohe Standorttoleranz auf armen Böden aus. Da kaum Ergebnisse zur RDX-Aufnahme von Koniferen bekannt sind, sollte festgestellt werden, ob Rotfichten (*Picea abies* (L.) H. Karst.) durch RDX-Aufnahme einen Beitrag zur Sanierung RDX-belasteter Flächen (Dendroremediation) leisten können. Dazu sollte ermittelt werden, in welchen Pflanzenteile RDX akkumuliert wird und in welchem Umfang eine Abfuhr der oberirdischen Biomasse, wie dies bei einer Holznutzung der Fall ist, zur Absenkung der RDX-Konzentration auf der Fläche beiträgt.

Material und Methoden

Fünffährige Bäume von *Picea abies* wurden von an den Wurzeln anhaftender Erde befreit und in hydroponischer Kultur für neun Tage einer wässrigen Lösung mit ¹⁴C-markiertem RDX bei einer Konzentration von 30 mg RDX l⁻¹ ausgesetzt. Nach dieser neuntägigen ¹⁴C-RDX-Applikation erfolgte die Weiterkultivierung der Bäume in RDX-freier Lösung für weitere 19 Tage. Vier Wochen nach Versuchsansatz wurden die Gehölze in ihre Kompartimente (tote und lebende Feinwurzeln, grobe Wurzeln, Wurzelstubben, Holz, Nadeln, Maitriebe) zerlegt, getrocknet und zu Pulver vermahlen. Konzentrationen und Massenanteile RDX-bürtiger ¹⁴C-Aktivität wurden durch Oxidizerverbrennung (Biological Oxidizer OX 500, Zinsser, Frankfurt/M., Germany) und anschließender Flüssigszintillationsmessung (LSC, LS 6500, Beckman, Fullerton, CA, USA) bestimmt und als RDX-Äquivalente (RD_Xeq) angegeben.

Um Gefahren einer potentiellen Wiederauswaschung des in das Pflanzenmaterial aufgenommenen Sprengstoffs abschätzen zu können, erfolgte eine Ermittlung der wasserextrahierbaren Anteile. Hierzu wurden je Kompartiment 0,5 g fein homogenisiertes Pflanzenmaterial in 20 ml de-ionisiertes Wasser gegeben und über 24 h auf einem Rotationsschüttler (180 rpm) bei 25°C inkubiert. Die wassergelösten RDX-Äquivalent-Anteile wurden durch LSC-Messung quantifiziert und zur nicht-extrahierten, durch Oxidizerverbrennung bestimmten Restradioaktivität in prozentuale Beziehung gesetzt.

Ergebnisse und Diskussion

Besonders auffällig ist, dass bei Rotfichten nach der RDX-Aufnahme mit etwa 60 % der größte RD_Xeq-Massenanteil im Wurzelbereich der Gehölze verbleiben (Abbildung 1). So hielten allein die lebenden und toten Feinwurzeln der Gehölze auf Grund hoher Konzentrationen von 216,3 bzw. 160,9 mg RD_Xeq kg⁻¹ TM schon über die Hälfte der bauminkorporierten RD_Xeq-Masse zurück. Grobe Wurzeln und der Wurzelstubben trugen weitere 14 % an RD_Xeq-Massenanteilen zum Rückhalt im unterirdischen Bereich bei.

Innerhalb der oberirdischen Biomasse wurde die höchste RD_Xeq-Konzentration in den Maitrieben ermittelt (67,0 mg RD_Xeq kg⁻¹ TM). Aufgrund ihres geringen Anteils an der Gesamtmasse der Bäume

betrug die von den Maitrieben zurückgehaltene RDXeq-Masse jedoch nur 3,7 % der aufgenommenen Gesamtaktivität. Höhere Anteile hatten Nadeln mit 20,6 % und das Holz der Stämme und Zweige mit 10 % der Gesamt-Massenbilanz. Insgesamt trugen die oberirdischen Baumteile nur zwei Fünftel zur Massenbilanz der bauminkorporierten Gesamtradioaktivität bei (Abbildung 1).

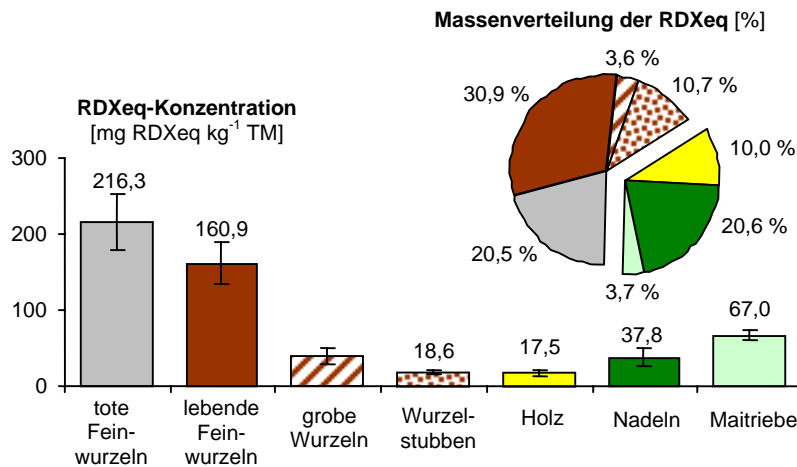


Abbildung 1:
Konzentrationsverteilung und Massenbilanz von RDXeq in *Picea abies*
(± Standardabw., n = 4)

Eine hohe RDX-Wurzelakkumulation der Rotfichten steht im Widerspruch zu Literaturbefunden an krautigen Pflanzen und jungen Laubbäumen (VILA et al. 2007, THOMSON et al. 1999) bei denen durchgängig eine überwiegende RDX-Akkumulation in oberirdischen Organen festgestellt wurde.

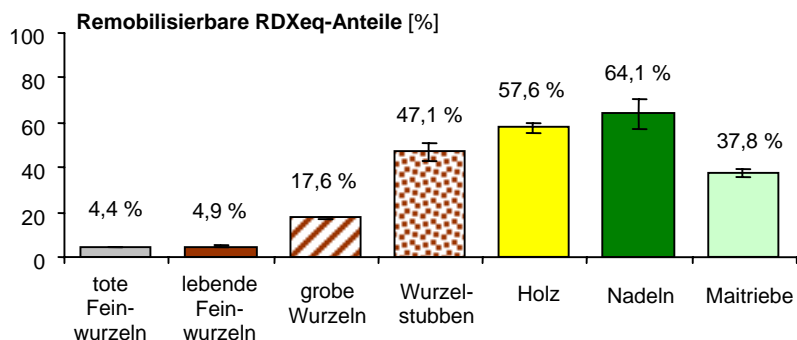


Abbildung 2:
Prozentualer Anteil remobilisierbarer RDXeq in *Picea abies*
(± Standardabw., n = 4)

Die Wiederauswaschbarkeit durch Regenwasser ist ein Maß für die Bindungsstabilität der akkumulierten RDX-Rückstände in Pflanzengewebe. Die prozentuale ¹⁴C-RDX-Auswaschbarkeit weist bei Rotfichten eine von den unterirdischen zu oberirdischen Baumteilen hin ansteigende Tendenz auf (Abbildung 2). In der Remobilisierbarkeits-Rangfolge Feinwurzeln (ca. 5 %) < Grobwurzeln (18 %) < Stubben (47 %), Holz (58 %) und Nadeln (64 %) spiegelt sich der aufwärtsgerichtet abnehmende RDX-Rückhalt auf dem Transpirationsweg wider. Lediglich die Maitriebe wichen mit 38 % von der aufgezeigten Tendenz ab.

Eine Abfuhr der gesamten oberirdischen, RDX-beladenen Fichtenmasse zum Zwecke energetischer Nutzung würde einen Teilbeitrag zur RDX-Abnahme kontaminierter Flächen leisten. Eine Kahlschlagsabholzung hätte aber auch zur Folge, dass durch Wegfall des Niederschlagsrückhalts (Kronenrückhalt und Transpiration) eine verstärkte Remobilisierung aus der nadelhaltigen Streuschicht zu befürchten ist.

Die Remobilisierungsgefahr aus den RDX-beladenen Wurzelteilen ist hingegen eher als schwach einzuschätzen, so dass mit der Verrottung abgestorbener Wurzeln eine Mineralisierung wurzelgebundener RDX-Rückstände erfolgen könnte.

Zusammenfassung

Auswaschungen aus militärisch genutzten Liegenschaften, die großflächig mit dem Sprengstoff Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin (RDX) kontaminiert sind, bedrohen wegen potentiell humantoxischer und karzinogener Eigenschaften die Trinkwasserressourcen.

Weil Militärstandorte oft von Nadelgehölzen bedeckt sind, wurde die RDX-Aufnahme- und Akkumulationsvermögen von fünfjährigen Rotfichten (*Picea abies*) mit Hilfe von ¹⁴C-markiertem RDX untersucht und darüber hinaus die Wiederauswaschbarkeit gehölzinkorporierter RDX-Rückstände quantifiziert.

RDX wird in Rotfichten zu ca. 60 % in den Wurzeln akkumuliert, wobei die Hauptanteile in den Feinwurzeln zu finden sind. Die RDX-Remobilisierungspotenz ist bei Feinwurzeln mit ca. 5 % als gering einzustufen. In die oberirdischen Baumkompartimente Holz, Nadeln und Maitriebe gelangen ca. 40 % der aufgenommenen RDX-Rückstände. Die Wiederauswaschbarkeit ist hier wesentlich höher als in unterirdischen Baumteilen und kann bei Nadeln bis zu 64 % erreichen.

Eine Abfuhr der oberirdischen, RDX-beladenen Fichtenmasse zum Zwecke energetischer Nutzung würde einen Teilbeitrag zur RDX-Abnahme kontaminierter Flächen leisten, birgt jedoch Risiken verstärkter RDX-Auswaschung aus der Streuschicht, den Wurzelresten und dem RDX-belasteten Boden.

Abstract

Large areas of military sites are polluted with the energetic compound RDX (hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine). Because of human toxic and potentially carcinogenic features of RDX, soil leaching of the explosive comprises a serious hazard for groundwater resources. Since military sites are often covered with forests, the potential of five-year old Norway spruce (*Picea abies*) for uptake and accumulation of ¹⁴C-labeled RDX has been investigated. Furthermore, the leaching of RDX residues from RDX-laden tree material was quantified.

In Norway spruce 60% of tree-located ¹⁴C-activity are accumulated in roots, predominately in fine roots. RDX residue leaching from homogenized fine roots is relative low (5%). In aerial spruce compartments like wood, needles, and spring sprouts 40% of tree incorporated ¹⁴C-RDX residues were recovered. Remobilisation risks in these compartments are considerably higher than in roots, reaching up to 64% in needles.

Removal of aboveground spruce biomass reduces the RDX content on polluted sites to some extend. Vegetation removal, however implies the risk of enhanced leaching of RDX residues from litter, root residues and bare RDX polluted soil.

Literatur

KWON MJ, FINNERAN KT, 2006: Microbially mediated biodegradation of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine by extracellular electron shuttling compounds. Appl. Environ. Microbiol. 72, 5933-5941.

SCHOENMUTH B, PESTEMER W, 2004: Dendroremediation of trinitrotoluene (TNT) Part 1: Literature overview and research concept. Environ. Sci. Pollut. Res. 11, 273-278.

THOMPSON PL, RAMER LA, SCHNOOR JL, 1999: Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine translocation in poplar trees. Environ. Toxicol. Chem. 18, 279-284.

VILA M, LORBER-PASCAL S, LAURENT F, 2000: Fate of RDX and TNT in agronomic plants. Environ. Poll. 148, 148-154.

Adressen der Autoren

¹ Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Department für Nutzpflanzen- und Tierwissenschaften, FG Phytomedizin, Lentzeallee 55/57, D-14195 Berlin

² Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Königin-Luise-Str. 19, D-14195 Berlin

* Ansprechpartner: Jakob O. MUELLER, Mail to: jakob.mueller77@gmx.de