



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
Danksagung .....	VII
Widmung.....	IX
Abbildungsverzeichnis.....	XVI
Tabellenverzeichnis.....	XXII
Abkürzungsverzeichnis .....	XXV
<b>1. EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Stand der Forschung.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Problemstellung und Zielsetzung .....</b>	<b>4</b>
<b>2. RÜSTUNGSALTLASTEN .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Definition Rüstungsaltlasten .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 Verbreitung von Rüstungsaltlasten .....</b>	<b>11</b>
2.2.1 Nitroaromatenbelastungen im Vergleich .....	12
2.2.2 Belastungen des Grundwassers durch Rüstungsaltlasten.....	13
<b>2.3 Sprengstoffproduktion .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 Chemisch-physikalische Eigenschaften ausgewählter Nitroaromaten.....</b>	<b>18</b>
<b>2.5 Toxikologische Relevanz ausgewählter Nitroaromaten.....</b>	<b>23</b>
2.5.1 Aufnahmepfade.....	24
2.5.2 Säuger-Humantoxizität .....	25
2.5.3 Ökotoxizität .....	30
<b>2.6 Umweltverhalten ausgewählter Nitroaromaten.....</b>	<b>31</b>
2.6.1 Ausbreitungspfade .....	32
2.6.2 Metabolisierung.....	35
2.6.2.1 Biotransformation.....	36
2.6.2.2 Oxidative Transformation.....	39
2.6.2.3 Photolytische Transformation .....	40
2.6.3 Sorptionsmechanismen .....	40
2.6.3.1 Sorption an Tonmineralen .....	41
2.6.3.2 Bindung an Huminstoffen .....	44
2.6.3.3 Bindung an weiteren Bodenkompartmenten.....	45
2.6.3.4 Bindung am Boden .....	46
<b>2.7 Grenz-, Richt- und Orientierungswerte ausgewählter Nitroaromaten .....</b>	<b>47</b>
<b>2.8 Sanierung .....</b>	<b>52</b>



<b>3. METHODIK</b> .....	55
<b>3.1 Auswahl der Böden</b> .....	55
<b>3.2 Probennahme im Gelände</b> .....	57
<b>3.3 Nitroaromatenauswahl</b> .....	61
<b>3.4 Versuchsaufbau</b> .....	63
3.4.1 Säulenpräparation.....	64
3.4.2 Herstellung der Gipsblockelektroden .....	65
3.4.3 Methodenkritik zu Säulenversuchen .....	67
3.4.4 Versuchsaufbau im Labor .....	67
3.4.5 Aufbau der Freilandlysimeterstation.....	69
3.4.6 Aufbau der Klimastation.....	72
3.4.7 Methodenkritik zur Lysimeterstation.....	72
<b>3.5 Versuchsdurchführung</b> .....	73
3.5.1 Versuch V – Steigende Dotierung.....	73
3.5.2 Versuch IV – Variable Zeit .....	74
3.5.3 Versuch III – Variable Dotierungsart .....	75
3.5.4 Versuch I – Freiland-Lysimetersäulen .....	75
3.5.5 Versuch II – Labor-Lysimetersäulen .....	76
3.5.6 Versuchsvorbereitung .....	77
3.5.7 Laborberechnungsphase .....	79
3.5.8 Sickerwasserentnahme.....	80
3.5.9 Entnahme der Bodenproben.....	81
3.5.10 Versuche zur TNT-Lösungskinetik und TNT-Sorption .....	82
<b>3.6 Proben und Versuchssystematik</b> .....	82
3.6.1 Versuchssystematik .....	82
3.6.2 Probensystematik .....	84
<b>3.7 Chemisch-physikalische Labormethoden</b> .....	85
3.7.1 Probenkonservierung.....	85
3.7.2 Physikalische Bodenuntersuchungen .....	85
3.7.2.1 Wasserspannungskurve .....	85
3.7.2.2 Gesamtporenvolumen .....	86
3.7.2.3 Bestimmung der nFK, nFK <sub>(We)</sub> und LK.....	86
3.7.2.4 Packungsdichte, effektive Lagerungsdichte und Dichte .....	86
3.7.2.5 Gesättigte Wasserleitfähigkeit .....	87
3.7.2.6 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit .....	87
3.7.2.7 Korngrößenspektrum .....	88
3.7.3 Chemische Bodenaufschluss- und Labormethoden .....	88
3.7.3.1 Elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert.....	88
3.7.3.2 Kalkgehalt .....	88



3.7.3.3 Organische Substanz .....	89
3.7.3.4 C, N, P-Bestimmung .....	89
3.7.3.5 Alkali-, Erdalkali- und Schwermetallbodenaufschlüsse .....	90
3.7.3.6 Alkali-, Erdalkalimetallgehalte .....	90
3.7.3.7 Schwermetallanalysen .....	90
3.7.3.8 Pedogene Eisenoxidbestimmungen .....	90
3.7.3.9 Kationenaustauschkapazität .....	91
3.7.3.10 Tonmineralanalysen .....	92
3.7.4 Nitroaromatenbestimmung .....	93
3.7.4.1 Halbquantitative Bestimmung von NA mit dem Polarisationsmikroskop .....	93
3.7.4.2 Sickerwasserextraktion zur Gewinnung von Nitroaromaten .....	94
3.7.4.3 Bodenaufschlussverfahren für Nitroaromaten .....	96
3.7.4.3.1 TNT-Schnelltest .....	96
3.7.4.3.2 Immunologischer Schnelltest .....	96
3.7.4.3.3 Potentiometrischer Schnelltest .....	97
3.7.4.3.4 Soxhlet-Extraktion .....	97
3.7.4.3.5 Ultraschall-Eluation mit Methanol .....	97
3.7.4.4 Pflanzenaufschlussverfahren für Nitroaromaten .....	99
3.7.4.5 Chromatographische Anionentrennung (Bromid) .....	99
3.7.4.6 Chromatographische Trennanalysen für Nitroaromaten .....	102
3.7.4.6.1 HPLC-Trennung .....	103
3.7.4.6.2 GC-Trennung .....	104
3.7.5 Versuche zur Korngrößenspezifischen Lösungskinetik von TNT .....	106
3.7.6 Batch-Versuche .....	107
3.7.7 Geräteauflistung .....	109
<b>3.8 Charakterisierung der Bodenprofile .....</b>	<b>110</b>
3.8.1 Bb: Basaltbraunerde .....	111
3.8.2 Bs: Buntsandsteinbraunerde .....	116
3.8.3 K: Kolluvium (Kolluvisol) .....	121
3.8.4 L: Parabraunerde .....	126
3.8.5 S: Pseudogley .....	132
3.8.6 YY: Kultosol (Auftragsprofil) .....	137
3.8.7 Resümee .....	145
<b>3.9 Methodik Klimatologischer Kenndaten .....</b>	<b>145</b>
3.9.1 Temperaturbestimmung .....	146
3.9.2 Niederschlagsbestimmung .....	146
3.9.3 Verdunstungsberechnungen .....	146



<b>4. ERGEBNISAUSWERTUNG</b> .....	149
<b>4.1 Klimatologische und hydrologische Daten</b> .....	149
4.1.1 Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum .....	149
4.1.2 Niederschlagsverlauf .....	150
4.1.3 Temperaturverlauf .....	151
4.1.4 Berechnung der Wasserhaushaltsbilanz .....	153
4.1.5 Vergleich der Sickerwasserdaten mit Literaturwerten .....	158
4.1.6 Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen .....	159
4.1.7 Fazit und Zusammenfassung .....	159
<b>4.2 Korngrößenspezifische Lösungskinetik von 2,4,6-TNT</b> .....	160
4.2.1 Berechnung der Oberfläche .....	162
4.2.2 Ergebnisbewertung .....	166
4.2.3 Mathematischer Lösungsansatz .....	171
4.2.4 Anwendungsbeispiele .....	173
4.2.5 Fazit .....	174
<b>4.3 Ergebnisse der Batch-Versuche</b> .....	175
4.3.1 Ergebnisvergleich .....	181
4.3.1.1 Humuseinfluss .....	183
4.3.1.2 Einfluss der Kationenaustauschkapazität .....	184
4.3.1.3 Kaliumeinfluss .....	185
4.3.1.4 Calciumeinfluss .....	186
4.3.1.5 Einfluss von bodenlöslichem Natrium, Magnesium, Eisen und Mangan .....	187
4.3.1.6 Einfluss des Tonmineralgehaltes .....	189
4.3.1.7 Einfluss des pH-Wertes .....	191
4.3.1.8 Einfluss des Schluffanteils .....	191
4.3.1.9 Einfluss des Sandanteils .....	191
4.3.1.10 Zusammenfassung der Batch-Ergebnisse .....	191
<b>4.4 Massenbilanzierungen</b> .....	192
4.4.1 Berechnungs- und Schätzungsmethodik .....	192
4.4.2 Methodische Probleme der Stoffwiederfindung .....	192
4.4.3 Ergebnisse der Wiederfindungsraten und Schadstoffverteilung .....	194
4.4.4 Auswirkung der Dotierungsart auf Wiederfindungsraten und Schadstoffverteilung .....	194
4.4.5 Der Einfluss von Beregnungsunterbrechung und Dotierungsmenge auf Wiederfindungsraten und Stoffverteilung .....	196
4.4.6 Beschreibung der Wiederfindungsraten mit Hilfe der Sorptionskapazitäten .....	200
4.4.7 Bodenspezifische Sorptionskapazitäten und deren Einfluss auf Wiederfindungsraten .....	202
4.4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	207



<b>4.5 Bioverfügbarkeit</b> .....	208
4.5.1 Methodik .....	209
4.5.2 Analytische Auswertung .....	209
4.5.3 Ergebnisse zum Pflanzenwachstum .....	210
4.5.4 Nitroaromaten in Pflanzen .....	210
4.5.5 Fazit und Zusammenfassung .....	216
<b>4.6 Ergebnisse der Säulenversuche</b> .....	217
4.6.1 Grundlagen des Stofftransportes .....	217
4.6.2 Kinetische Ungleichgewichts-Adsorptionen .....	222
4.6.3 Bestimmung der Retardationsfaktoren .....	222
4.6.4 Versuchsergebnisse und Vergleiche mit Modellvorstellungen .....	223
4.6.5 Vergleich mit einem Simulationsmodell: ALTEX-1D .....	238
4.6.6 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	243
<b>4.7 Umweltverhalten</b> .....	245
4.7.1 Stoffspektrum .....	245
4.7.2 Hauptmetaboliten: A-DNT .....	251
4.7.2.1 Versuch II (gelöste Dotierung) .....	254
4.7.2.2 Versuch I (Freilandlysimeter) .....	266
4.7.2.3 Versuch III (Dotierungsform) .....	285
4.7.2.4 Versuch IV (Zeitabhängigkeit) .....	290
4.7.2.5 Versuch V (steigende Dotierungsmenge) .....	297
4.7.3 Abbau oder Verbleib von TNT .....	308
4.7.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Umweltverhalten .....	310
<b>5. SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK</b> .....	315
<b>5.1 Methodenkritik</b> .....	315
<b>5.2 Diskussion und Schlussfolgerung</b> .....	317
<b>5.3 Weiterer Untersuchungsbedarf</b> .....	325
<b>6. ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	327
<b>7. SUMMARY</b> .....	339
<b>8. QUELLENVERZEICHNIS</b> .....	351
<b>8.1 Literaturverzeichnis</b> .....	351
<b>8.2 Kartenverzeichnis</b> .....	365
<b>ANHANG (BAND II, CD)</b>	
<b>Inhaltsübersicht</b> .....	366