



LAND  
BRANDENBURG

Ministerium für Ländliche  
Entwicklung, Umwelt und  
Landwirtschaft

Boden,  
Umweltgeologie  
und Altlasten



Fachinformation des LUGV  
Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg  
Nr. 22

### **Arbeitshilfe**

**„Grundwasserkontaminationen mit sprengstoff-  
typischen Verbindungen im Land Brandenburg“**

**Behandlung, Aufnahmemechanismen,**

**Abbauverhalten**

**Stufe IB**

**– Umsetzung der Literaturrecherche und**

**Erarbeitung vertiefender Grundlagen –**

Landesamt für  
Umwelt,  
Gesundheit und  
Verbraucherschutz



## Vorwort

Rüstungsaltslasten sind gemäß der Definition in Brandenburg ([1] § 25 LAbfVG 1996) Altablagerungen und Altstandorte der chemischen Rüstungsproduktion, sofern von diesen nach den Erkenntnissen einer im einzelnen Fall vorausgegangenen Untersuchung und einer darauf beruhenden Beurteilung durch die zuständige Behörde eine Gefahr für die öffentliche Sicherheit und Ordnung ausgeht.

Bund und Länder haben in den letzten Jahren verschiedene Themen und Fragen im Zusammenhang mit Rüstungsaltslasten, dem Verhalten von sprengstofftypischen Verbindungen (STV) in der Umwelt sowie Möglichkeiten zur Bewertung und Sanierung eingehend untersucht.

Die Ergebnisse der Stufe IA der Arbeitshilfe - Literaturrecherche - wurden in der folgenden Stufe IB umgesetzt und hinsichtlich der Erarbeitung einer Handlungsempfehlung für das Land Brandenburg erweitert und vertieft. Der Überblick über die bundesweit gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen hinsichtlich der Stoffgruppe STV und der Sanierung von mit STV belasteten Wässern bzw. die Handhabung der belasteten Wasserwerke wurde ergänzend fortgeführt.

Die verfügbaren Daten der bundesweit ausgewählten Rüstungsstandorte hinsichtlich STV-Belastungen in Grund- bzw. Rohwasser, aber auch bezogen auf das Schutzgut Wasser allgemein werden in Form von Fallbeispielen vorgestellt. Die gewählte Form der Darstellung ist für eine Übertragung auf vergleichbare eigene Problemstellungen geeignet und stellt damit die Grundlage der Erarbeitung einer Handlungsempfehlung für das Land Brandenburg dar.

Besonderer Dank gilt allen angefragten Institutionen für ihre Mitwirkung, die Bereitstellung von Daten sowie für das Interesse an der vorliegenden Arbeitshilfe. Diese kann damit nicht nur landesweit angewendet, sondern auch bundesweit genutzt werden.

## Inhalt

Abkürzungen .....	5
Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	7
1    Veranlassung .....	8
2    Zielstellung und Aufgabe .....	10
3    Vorgehensweise.....	11
4    Grundlagen und derzeitiger Kenntnisstand STV .....	12
4.1  Stoffgruppen und Eigenschaften .....	12
4.2  Bewertung und Verhalten .....	14
4.3  Transformation .....	19
5    Vertiefende bundesweite Recherche bei Wasser-versorgern und Umweltbehörden/-institutionen .....	21
5.1  Vorgehensweise.....	21
5.1.1  Bundesweite Recherche bei betroffenen Wasserversorgern .....	21
5.1.2  Bundesweite Nachrecherche bei Umweltbehörden/-institutionen .....	22
5.2  Ergebnisse der Recherche .....	22
5.2.1  Betroffenheit von Wasserfassungen im Umfeld ehemaliger Rüstungsbetriebe durch STV .....	22
5.2.2  Betroffenheit von Grundwasser, Sickerwasser, Oberflächenwasser im Umfeld ehemaliger Rüstungsbetriebe durch STV .....	23
5.3  Fallbeispiele .....	24
5.3.1  Standort mit STV-Belastungen des Bodens und einer Sickerwasserbehandlung (Aktivkohle) – Espagit Hallschlag .....	24
5.3.2  Standort mit STV-Belastungen des Bodens/ Abwasser-Oberflächenwasser mit Abwasserbehandlung über Aktivkohle und Bio-Verfahren – „Werk Tanne“ in Clausthal-Zellerfeld .....	26
5.3.3  Standort mit Grund- bzw. Abwasser und Drainwasseraufbereitungsanlage mittels Aktivkohle-Adsorbern – WASAG Elsnig.....	27
5.3.4  Standort mit STV-Belastungen im Grundwasser mit Behandlung über Aktivkohle – Hessisch Lichtenau .....	29
5.3.5  Standort mit Grundwasserbelastung - Sythen in Haltern Am See.....	31
5.3.6  Standort mit Grundwasserbelastung und Behandlung mittels chemischer Oxidation – Leverkusen-Schlebusch .....	33
5.3.7  Standort mit Boden- und Grundwasserbelastungen sowie Sicherungselementen der hydraulischen Sicherung: - Standort Stadtallendorf.....	36
5.3.8  Zusammenfassende Darstellung der Fallbeispiele .....	39

5.4	Rechercheergebnisse hinsichtlich einer allgemeinen Vorgehensweise bei der Durchführung von Gefahrenabwehrmaßnahmen auf ehemaligen Rüstungsstandorten (Akzeptanz des Verfahrens – Bürgerbeteiligung, Öffentlichkeitsarbeit).....	41
6	Zusammenfassende Auswertung der beantworteten Fragebögen.....	43
7	Forschungsberichte.....	45
7.1	In-situ-Filterregeneration bei der TNT-Elimination aus Grundwasser: Anwendung des Verfahrens auf einen Faseraktivkohle-Adsorber.....	45
7.2	Begleitende analytische Untersuchungen bei der Entfernung von sprengstoffrelevanten Substanzen aus Gewässern durch Adsorption an Polymeren mit räumlich globularer Struktur (RGS)“, Universität Hamburg, Dissertation von York Zimmermann, 2007.....	45
7.3	Verfahrensgrundlagen für die Reinigung von Hexogen/ Hexyl-kontaminierten Grund- und Oberflächenwasser aus Rüstungsaltslasten mit Pilzen.....	46
7.4	Freiland-Dekontamination von TNT und <sup>14</sup> C-TNT-Aufnahme durch Gehölze ..	47
7.5	„Der Einsatz mykorrhizierter Gehölze in biologischen Sanierungsverfahren unter dem Aspekt TNT-belasteter Böden“ ..	47
7.6	„Reinigung sprengstoffbelasteter Wässer mit Hilfe einer Pflanzenkläranlage“ ..	50
7.7	„Untersuchungen der Transformationswege von 2,4,6-Trinitrotoluol in Oberflächengewässern und deren Nutzen als natürliche Schadstoffminderungsprozesse an einem ehemaligen Rüstungsstandort“ ..	51
7.8	„Bilanzierung eines kombinierten biologisch-chemischen Abbaus von <sup>14</sup> C-2,4,6-Trinitrotoluol (TNT)“ ..	52
7.9	„Entfernung von Sprengstoffen aus kontaminiertem Grundwasser: Analytik und Verfahrensentwicklung“ ..	54
	Literaturverzeichnis ..	55
	Anhang 1 - Fragebogen	

## Abkürzungen

ADNT	Aminodinitrotoluol
ANT	Aminomononitrotoluol
DAG	Dynamit AG
DNBS	Dinitrobenzoesäure
DNB	Dinitrobenzol
DNPh	Dinitrophenol
DNT	Dinitrotoluol
DWA	Drainwasseraufbereitungsanlage
FISAL	Fachinformationssystem Altlasten
FuE	Forschung und Entwicklung
HMX	Oktogen
GFS	Geringfügigkeitsschwellenwerte
GOW	Gesundheitliche Orientierungswerte
GW	Grundwasser
GWMS	Grundwassermessstelle
GWSA	Grundwassersanierungsanlage
LUIS	LandesUmwelt / VerbraucherInformationssystem Brandenburg
LUGV	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg
MNT	Mononitrotoluol
NB	Nitrobenzol
NBS	Nitrobenzoesäure
NHN	Normalhöhennull
RDX	Hexogen
RW	Rohwasser
STV	Sprengstofftypische Verbindungen
SW	Sickerwasser
TLW	Trinkwasserleitwerte
TNB	Trinitrobenzol
TNBS	Trinitrobenzoesäure
TNT	Trinitrotoluol
TÜP	Truppenübungsplatz
WASAG	Westfälisch-Anhaltische Sprengstoff-Actien-Gesellschaft
WW	Wasserwerk

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Metabolisierungswege des 2,4,6-TNT unter Einfluss von Licht (photochemisch) und von Mikroorganismen (mikrobiell) (Steinbach 2008) [10].....	20
Abbildung 2: Fallbeispiel Espagit Hallschlag - Verfahrensschema Sickerwasserbehandlung über Aktivkohle (bereitgestellt von der SGD Nord Trier).....	25
Abbildung 3: Fallbeispiel Werk Tanne - Verfahrensschema Constructed Wetland (Verfahrensdarstellung übernommen vom Verfahrensentwickler „VITA34 Leipzig“).....	27
Abbildung 4: Fallbeispiel WASAG Elsnig - Vereinfachtes Verfahrensflißschema der Drainwasseraufbereitungsanlage (zur Verfügung gestellt im Rahmen der Beantwortung des Fragenbogens durch LRA Nordsachsen).....	28
Abbildung 5: Fallbeispiel Hessisch Lichtenau – Verfahrensschema Wasseraufbereitungsanlage (Quelle: HIM, HMULV : Die Sanierung der ehemaligen Sprengstofffabrik Hessisch Lichtenau. Bodengut gemacht , Kapitel 5.6, 2013) [56].....	30
Abbildung 6: Fallbeispiel WASAG Stadtallendorf - Sicherungselemente der hydraulischen Sicherung und Bilanzebenen am Standort Stadtallendorf (aus Leitfaden KORA D3.5 – Abb. 62) [10].....	38

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Stoffgruppen der STV und deren Struktur (Zusammenstellung Joos 2012, erweitert 2013).	13
Tabelle 2:	TWL/GFS für sprengstofftypische Verbindungen/ GOW für weitere sprengstofftypische Verbindungen (Zusammenstellung Joos 2012, variiert 2013).....	15
Tabelle 3:	Ausgewählte Kontaminanten und deren wesentliche Transformationsprodukte in der gesättigten Zone und Oberflächengewässer (nach Joos, Knackmuss et al. 2008) [10].....	17
Tabelle 4:	Ausgewählte Kontaminanten und deren wesentliche Transformationsprodukte (aus Joos, Knackmuss et al. 2008) [10].....	19
Tabelle 5:	Auswertung der bundesweiten Recherche.....	23
Tabelle 6:	Fallbeispiel Espagit Hallschlag - Sanierungszielwerte Sickerwasser Auswertung des beantworteten Fragebogens – SGD Nord Trier).....	24
Tabelle 7:	Fallbeispiel WASAG Elsnig - Analytik auf sprengstofftypische Verbindungen (nach Auswertung des Fragenbogens, übermittelt durch das LRA Nordsachsen).....	29
Tabelle 8:	Fallbeispiel Hessisch Lichtenau - Auflistung der Prüfparameter in der Analytik (Informationen aus den Antworten zum Fragebogen vom Regierungspräsidium (RP) Kassel).....	30
Tabelle 9:	Fallbeispiel WASAG Sythen - Aufzubereitende Wässer, kategorisiert nach Entstehung der Belastung.....	32
Tabelle 10:	Fallbeispiel Carbonit AG Leverkusen - Auflistung der Prüfparameter und Prüfwerte (Informationen aus den Antworten zum Fragebogen der Stadtverwaltung Leverkusen).....	34
Tabelle 11:	Fallbeispiel Carbonit AG Leverkusen - Analyseparameter zur Erkundung und Bewertung der Grundwasserbelastung im Bereich der Waldsiedlung Leverkusen-Schlebusch (Informationen aus den Antworten zum Fragebogen der Stadtverwaltung Leverkusen).....	35
Tabelle 12:	Zusammenfassende Darstellung der Fallbeispiele - Schadenssituation und Sanierungsverfahren mit Standortbezug.....	40
Tabelle 13:	Zusammenfassende Darstellung der Fallbeispiele - Schadenssituation und Sanierungsverfahren ohne Standortbezug.....	40
Tabelle 14:	Gegenüberstellung wichtiger Ergebnisse aus Freilandhebungen am Standort 'Werk Tanne' und aus Laborexperimenten der vorliegenden Arbeit (aus Dissertation von I. Dobner: Tabelle 24) [73].....	49

# 1 Veranlassung

Im Land Brandenburg existieren auf Grund ermittelter Belastungen des Grundwassers mit sprengstofftypischen Verbindungen durch ehemalige Rüstungsstandorte spezielle Fragestellungen im Zusammenhang mit konkreten Gefahrentatbeständen für die Trinkwasserversorgung. Aus den in den letzten Jahren auf Bund- und Länderebene erarbeiteten Leitfäden und Arbeitshilfen zum Thema STV gehen bisher für die konkreten Fragestellungen keine auf das Land Brandenburg unmittelbar übertragbaren Lösungsmöglichkeiten hervor.

Die IABG mbH wurde daher vom Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LUGV) mit Vertrag vom 01.07.2012 beauftragt, den ersten Teil einer Arbeitshilfe „Grundwasserkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen (STV) im Land Brandenburg – Behandlung, Aufnahmemechanismen, Abbauverhalten“ zu erarbeiten.

Die Literaturrecherche der Arbeitshilfe (Stufe IA) gibt einen Überblick über die in den letzten 5 bis 10 Jahren gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen hinsichtlich der Stoffgruppe STV und der Sanierung von mit STV belasteten Wässern.

Damit ist die Recherche Voraussetzung für die Erarbeitung vertiefender Grundlagen für die Stufe IB, die auf dem zusammengestellten Stand des Wissens und der Technik aufbauen konnte.

Folgerichtig gliedert sich der Bericht der Stufe IA - Literaturrecherche - in:

1. Grundlagen und derzeitiger Kenntnisstand STV
2. Zusammenstellung technischer Verfahren zur Entfernung von STV aus Grund- und Rohwasser
3. Pfad Gießwasser-Boden-(Wild- und Nutz-)Pflanze-Mensch und Gießwasser-Boden-(Wild-, Nutz-)Pflanze-(Nutz-)Tier und Oberflächenwasser(Tränk-)-Nutztier
4. Erfahrungen mit landwirtschaftlicher Bewirtschaftung STV-kontaminierter Flächen – Bundesweite Recherche
5. Erfahrungsstand der Bundesländer

Im Rahmen der Literaturrecherche ist eine erste bundesweite Recherche erfolgt. Zunächst wurden insbesondere die Kontaminationen mit Bezug zum Gartenbau und zur Landwirtschaft sowie die bundesweiten Erfahrungen einbezogen. Die Ergebnisse weisen immer wieder darauf hin, dass die Kontaminationen der bundesweit bekannten Fälle bearbeitet wurden oder noch in Bearbeitung sind und auch Fragestellungen zu Belastungen der Trinkwasserversorgung bzw. der Grundwasser-Belastung allgemein beantwortet werden können. Damit haben sich Anhaltspunkte für eine erforderliche weitergehende Bearbeitung ergeben, in einer Folgestufe Detailinformationen herauszuarbeiten und auf die spezielle Fragestellung in Brandenburg zu übertragen.

Die Ergebnisse der Stufe IA der Arbeitshilfe - Literaturrecherche - werden im vorliegenden Bericht umgesetzt, erweitert und vertieft.

Für die Fortschreibung der Arbeitshilfe erhielt die IABG mbH am 15.07.2013 einen Auftrag zur Erarbeitung der Stufe IB „Umsetzung der Literaturrecherche und Erarbeitung vertiefender Grundlagen“.

Der Fokus liegt bewusst auf der Bearbeitung von Grundwasserbelastungen in Einzugsbereichen von Wasserwerken, die die Versorgung mit Trinkwasser auch weiterhin für das Einzugsgebiet gewährleisten müssen. Grundsätzlich zeigen einige Standorte mit STV-Belastungen die Betroffenheit des Schutzgutes Wasser allgemein auf, wobei hier standortspezifische Verfahrensweisen zur Eliminierung der Belastungen herangezogen werden.

Anhand von vergleichbaren Fallbeispielen aus anderen Bundesländern sind technisch machbare und wirtschaftliche Lösungen aufzuzeigen, die bereits mit Erfahrungen aus der Praxis belegt sind.

Resultierend aus der Zusammenstellung der technischen Verfahren zur STV-Eliminierung aus dem Wasser im Ergebnis einer vertiefend durchgeführten bundesweiten Recherche, gegliedert nach Standorttypen und betroffenen Wirkungspfaden, stellt die Arbeitshilfe Stufe IB zum einen die Grundlage für eine Handlungsempfehlung zur Anwendung auf vergleichbare Problemstellungen durch betroffene Behörden zur Verfügung [2-8]. Zum anderen wird die Arbeitshilfe „Grundwasserkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen im Land Brandenburg“ mit der vorliegenden Stufe IB fortgeschrieben.

## 2 Zielstellung und Aufgabe

Im Rahmen der Literaturrecherche ist eine erste bundesweite Recherche erfolgt, zunächst insbesondere auf Erfahrungen hinsichtlich Grundwasserkontaminationen durch STV mit Bezug zum Gartenbau und zur Landwirtschaft beschränkt. Aus den Ergebnissen der bundesweit bekannten Fälle, die bereits bearbeitet wurden oder sich noch in Bearbeitung befinden, haben sich Anhaltspunkte für eine weitergehende Bearbeitung ergeben, die in einer Folgestufe in Form von Detailinformationen herauszuarbeiten sind.

Die Literaturrecherche der Arbeitshilfe (Stufe IA) gibt einen Überblick über die in den letzten 5 bis 10 Jahren gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen hinsichtlich der Stoffgruppe STV und der Sanierung von mit STV belasteten Wässern.

Damit ist die Recherche Voraussetzung für die Erarbeitung vertiefender Grundlagen für die Stufe IB, die auf dem zusammengestellten Stand des Wissens und der Technik aufbauen kann.

Aufgrund der Ergebnisse der Literaturrecherche ergeben sich für die weiterführenden Arbeiten der vertiefenden Grundlagen folgende Schwerpunkte:

1. Bundesweite Recherche durch Befragung möglicherweise betroffener oder auch zuständiger Wasserversorger
2. Bundesweite vertiefende Recherche durch Befragung der jeweils zuständigen Umweltbehörden/-institutionen
3. Darstellung der STV-Problematik bezogen auf das Schutzgut Wasser (Roh-, Grund-, Sicker-, Oberflächen- bzw. Abwasser)
4. Vertiefende Zusammenstellung technischer Verfahren zur Entfernung von STV aus Grund- und Rohwasser bzw. Schicht-, Oberflächen- sowie Abwasser
5. Zusammenfassung des Erfahrungsstandes aus den einzelnen Bundesländern und Darstellung von repräsentativen Beispielen, bei denen bereits Aufbereitungsmaßnahmen durchgeführt werden (bezogen auf betroffene Schutzgüter, unter Berücksichtigung der konkreten Standortsituation und Verfahren in Abhängigkeit der Kosteneffizienz)
6. Darstellung des jeweiligen Verfahrens in einem entsprechenden Verlaufsschema

Anhand von vergleichbaren Fallbeispielen aus anderen Bundesländern sollen technisch machbare und wirtschaftliche Lösungen aufgezeigt werden, die bereits mit Erfahrungen aus der Praxis belegt sind.

Resultierend aus der Darstellung der bundesweit vorgestellten Fallbeispiele nach Standorttypen und betroffenen Wirkungspfaden wird die Arbeitshilfe „Vertiefende Grundlagen“ - Stufe IB - eine Grundlage für die in der Fallrecherche (Stufe II) zu betrachtenden Standorte im Land Brandenburg darstellen.

### 3 Vorgehensweise

Die Literaturrecherche der Stufe IA wird in der Fortführung umgesetzt, vertieft und mit zusätzlichen Daten konkretisiert. Der Überblick über die in den letzten Jahren bundesweit gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen hinsichtlich der Stoffgruppe STV und der Sanierung von mit STV belasteten Wässern bzw. die Handhabung der mit Problemstoffen belasteten Wasserwerke wird zum einen ergänzend fortgeführt.

Zum anderen werden die für den Bericht erforderlichen Daten im Rahmen einer bundesweiten Umfrage mittels Fragebogen von betroffenen Wasserversorgern und zuständigen Umweltbehörden/-institutionen zur Verfügung gestellt. Die verfügbaren Daten der bundesweit ausgewählten Rüstungsaltsstandorte hinsichtlich STV-Belastungen in Grund- bzw. Rohwasser, aber auch bezogen auf das Schutzgut Wasser allgemein, werden in Form von Fallbeispielen vorgestellt, die für eine Übertragung auf vergleichbare eigene Problemstellungen geeignet sind und mit dem aktuellen Stand des Wissens und der Technik ergänzt werden können.

Die für den Bericht erforderlichen Daten wurden per Fragebogen bei den Betreibern von Wasserwerken bzw. von Versorgern und zuständigen Umweltbehörden/-institutionen für das Grund- bzw. Rohwasser abgefragt. Darüber hinaus wurden auch allgemeine Fragestellungen im Zusammenhang mit der STV-Problematik in Bezug auf das Schutzgut Wasser recherchiert.

## 4 Grundlagen und derzeitiger Kenntnisstand STV

Die Literaturrecherche der Arbeitshilfe (Stufe IA 2012) beschreibt unter Punkt 4 das Thema „Grundlagen und derzeitiger Kenntnisstand STV“. Dieser Punkt wird, an die vorliegende Arbeitshilfe Stufe IB angepasst, zusammenfassend dargestellt [9, 10].

### 4.1 Stoffgruppen und Eigenschaften

Die bundesweit ausgewählten Fallbeispiele (vgl. Kap. 5.3.) weisen im Rahmen der historischen Betrachtung der Sprengstoffproduktion auf den Standorten TNT (2,4,6-Trinitrotoluol) und Hexogen als die relevantesten Sprengstoffe, die gehandhabt bzw. be- und verarbeitet wurden, aus. Das TNT, seine diversen Zwischen- und Nebenprodukte im Rahmen der Herstellung sowie die durch Transformation entstandenen, zumeist aromatischen, Nitroverbindungen, werden unter dem Begriff „Sprengstofftypische Verbindungen“ (STV) zusammengefasst.

Als die wichtigsten Sprengstoffe neben 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) werden Hexogen (RDX, Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin, Cyclotrimethylentrinitramin), 2,4,6-Trinitrophenol (Pikrinsäure), Pentaerythrittetranitrat (Nitropenta), Ethylendiamindinitrat (PH-Salz) und N-Methyl-2,4,6,N-tetranitroanilin (Tetryl) für eine Bewertung des Schadstoffpotentials aufgeführt. Während der beiden Weltkriege, in deren Zeit die Sprengstoffproduktion die größten Ausmaße annahm, wurden hauptsächlich 2,4,6-Trinitrotoluol, Hexogen, 2,4,6-Trinitrophenol und Ethylendiamindinitrat verwendet.

Zur Differenzierung werden die Sprengstoffe, die sich weitestgehend als aromatische Nitroverbindungen zusammenfassen lassen, in unpolare und polare Verbindungen nach der Extrahierbarkeit mit Dichlormethan aus der wässrigen Phase unterteilt [10].

Zu den unpolaren STV gehört TNT, es werden hierzu auch die Nitrotoluole, Nitrobenzole, Aminonitrotoluole sowie nachrangig Methylamine und Diaminonitrotoluole zugerechnet.

Nach obiger Definition werden zu den polaren STV die Stoffe gezählt, die nicht oder nur zu einem geringen Anteil extrahierbar sind. Demnach sind es die hauptsächlich sauren polaren Nitroverbindungen wie:

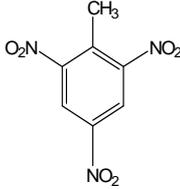
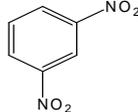
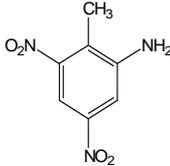
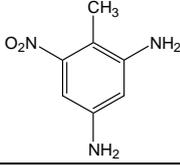
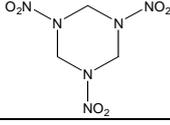
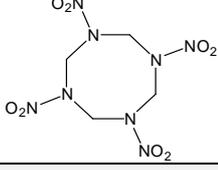
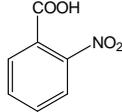
- Mono-, Di- und Trinitrobenzoesäuren
- Aminonitro- und Aminodinitrobenzoesäuren
- Hydroxynitro- und Hydroxydinitrobenzoesäuren
- Dinitrotoluolsulfonsäuren sowie
- Mono-, Di- und Trinitrophenole

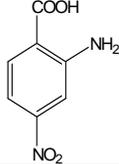
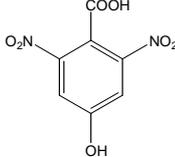
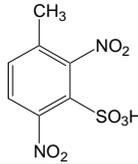
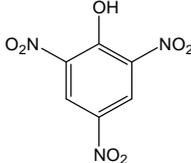
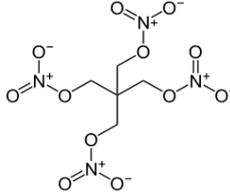
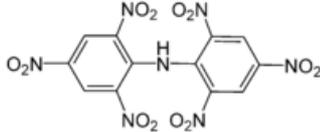
Die polaren STV sind im Hinblick auf ihr Vorkommen und ihr Verhalten in der Umwelt relevant, da sie sowohl als Nebenprodukt der Herstellung anfallen (Nitrotoluolsulfonsäuren (NTSS) und teilweise Nitrotoluolbenzoesäuren (NTBS)), als auch als Transformationsprodukte vorkommen.

Die Nitramine Hexogen und Oktogen zeigen in Anteilen eine Extrahierbarkeit mit Dichlormethan, sind aber als Grenzfälle zu betrachten. Beide Verbindungen werden immer wieder in Boden und Grundwasser von Rüstungsaltslasten nachgewiesen, wobei Oktogen persistenter als Hexogen ist.

In der nachfolgenden Tabelle werden für die benannten Stoffgruppen die jeweiligen Hauptvertreter aufgezeigt, die u.a. auch hinsichtlich einer Abschätzung des Gefahrenpotentials und zur Festlegung von Sanierungszielwerten oder Einleitwerten in Oberflächengewässer eine Rolle spielen [9, 10]:

**Tabelle 1: Stoffgruppen der STV und deren Struktur (Zusammenstellung Joos 2012, erweitert 2013)**

Stoffgruppe	Vertreter	Struktur
<b>Unpolare STV</b>		
Nitrotoluole (NT)	2,4,6-Trinitrotoluol (2,4,6-TNT)	
Nitrobenzole (NB)	1,3-Dinitrobenzol (1,3-DNB)	
Aminonitrotoluole (ANT)	2-Amino-4,6-dinitrotoluol (2-A-4,6-DNT)	
Diaminonitrotoluole	2,4-Diamino-6-nitrotoluol (2,4-DA-6-NT)	
Nitramin: Hexogen (RDX)	1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazacyclohexan	
Nitramin: Oktogen (HMX)	1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctan	
<b>Polare STV</b>		
Mono-, Di- und Trinitrobenzoesäuren,	2-Nitrobenzoesäure (2-NBS)	

Stoffgruppe	Vertreter	Struktur
Aminonitro- und Aminodinitrobenzoesäuren	2-Amino-4-nitrobenzoesäure (2-A-4-NBS)	
Nitrobenzoesäuren bzw. Hydroxydinitrobenzoesäuren	4-Hydroxy-2,6-dinitrobenzoesäure (4-OH-2,6-DNBS)	
Dinitrotoluolsulfonsäuren	2,4-Dinitrotoluolsulfonsäure-3 (2,4-DNTSS-3)	
Mono-, Di- und Trinitrophenole  Pikrinsäure (TNP)	2,4,6-Trinitrophenol 2,4,6-TNP	
<b>Weitere Verbindungen</b>		
Pentraerythritetranitrat (PETN),  Nitropenta	1,3-Bis(nitryloxy)-2,2-bis(nitryloxy-methyl)propan	
Hexanitrodiphenylamin  Hexyl	2,2',4,4',6,6'-Hexanitrodiphenylamin	

## 4.2 Bewertung und Verhalten

Nitroverbindungen aus Produktions- und Verarbeitungsprozessen von Munition oder Sprengstoffen, aber auch durch unsachgemäßen Umgang, Bombardierungen von Anlagen, Delaborierung, Demontage, Sprengungen und unkontrollierte Zerstörungen der Anlagen, insbesondere in Kriegszeiten, können als Umweltkontaminanten im Boden in verschiedener Art und chemischem Zustand (inhomogen) vorkommen. Belastungen betreffen ebenfalls das Schutzgut Wasser, wie Oberflächen- bzw. Grundwasser aber auch ausgetretenes Sickerwasser. Weiterhin wurde belastetes Abwasser über undichte Abwassereinrichtungen verfrachtet. Probleme bei der Trinkwasserversorgung auf Grund von Belastungen des zu fördernden Trinkwassers mit

sprengstofftypischen Verbindungen im Abstrom von ehemaligen Rüstungsstandorten wurden bereits nachgewiesen.

Aromatische und zykloliphatische Nitroverbindungen (z.B. Dinitrotoluole) zählen zu den wichtigsten Kontaminanten von Rüstungsaltstandorten, wobei für einige dieser Verbindungen in tierexperimentellen Studien Krebserkrankungen nachgewiesen wurden [11]. 1994 wurde erstmals versucht, das toxikologische Potential dieser Verbindungen in Form von toxikologischen Bewertungszahlen für Einzelverbindungen zu erfassen [12, 13].

Insbesondere die polaren STV als Bestandteil des Gesamtspektrums an STV stellen wegen ihrer hohen Mobilität im Wasser und ihrer toxischen Eigenschaften eine potentielle Gefahr für Grund- und Oberflächenwasser dar. In den letzten Jahren wurden in Boden und Grundwasser zunehmend polare sprengstofftypische Verbindungen wie Nitrophenole, Nitrobenzylalkohole, Nitrobenzoesäuren, Aminonitrobenzoesäuren und Nitrotoluolsulfonsäuren identifiziert. Sukzessiv mit Bekanntwerden dieser Verbindungen wurden toxikologische Kurzzeittests (Ames-Test, Chromosomenaberration) durchgeführt, um in einer ersten Phase ihr mögliches gentoxisches Potential zu erfassen [3, 14-16]. Es wurde festgestellt, dass die untersuchten Nitrophenole (NP) Nitrotoluolsulfonsäuren (NTSS), Aminobenzenoesäuren (ABS) und Monoaminomononitrobenzoesäuren nicht gentoxisch sind. Für die 2,4-Dinitrobenzoesäure konnte jedoch eine Gentoxizität nachgewiesen werden, für die 2,4,6-Trinitrobenzoesäure sowie 2-A-4,6-DNBS und 4-A-2,6-DNBS liegen Verdachtsmomente vor.

Als Bewertungshilfen für die STV werden neben den **Gesundheitlichen Orientierungswerten** (GOW) auch die **Trinkwasserleitwerte** (TWL) herangezogen. Das Wissen um die toxikologischen Eigenschaften und das Verhalten in den Umweltmedien der STV bedarf einer Beurteilung der Kontaminanten u.a. auch in Grund- und Oberflächenwasser sowie Rohwasser in Wasserwerken. Die Bewertung ihrer Anwesenheit im Trinkwasser folgt deshalb dem Vorsorge-Konzept der gesundheitlichen Orientierungswerte (GOW) für „nicht bewertbare“ Stoffe des Umweltbundesamtes [17]. Dieser GOW wurde nur vorläufig vergeben. Es wurden bisher für eine Reihe von STV Geringfügigkeitsschwellen (GFS) bzw. gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) festgelegt [9, 12, 18, 19], die zur Bewertung herangezogen werden können.

**Trinkwasserleitwerte** (TWL) wurden 2005 im Auftrag des Umweltbundesamtes für insgesamt 19 relevante trinkwassergefährdende Nitroverbindungen abgeleitet [19, 20]. Dies erfolgte auf der Grundlage verbesserter tierexperimenteller Daten beziehungsweise eines ästhetisch/organoleptischen Höchstwertes. Es handelt sich dabei um toxikologisch begründete, lebenslang gesundheitlich duldbare Höchstwerte.

Der umfassende Gewässerschutz beinhaltet neben dem Schutz des zur Trinkwasserversorgung genutzten Rohwassers auch geeignete Maßnahmen zum Schutz des Grund- und Oberflächenwassers. Für das Grundwasser wurden seitens der LAWA die abgeleiteten TWL unmittelbar als Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) übernommen.

**Tabelle 2: TWL/GFS für sprengstofftypische Verbindungen/ GOW für weitere sprengstofftypische Verbindungen (Zusammenstellung Joos 2012, variiert 2013)**

Stoff	Bewertungsgruppe	GFS ( $\mu\text{g/l}$ ) bzw. <u>GOW (<math>\mu\text{g/l}</math>)</u>
1,3,5-Trinitrobenzol	1	100
2,4,6-Trinitrophenol	1	0,2 <sup>a)</sup>
3-Nitrotoluol	1	10
4-Nitrotoluol	1	3
1,3-Dinitrobenzol	2	0,3
2,4,6-Trinitrotoluol	2	0,2

Stoff	Bewertungsgruppe	GFS (µg/l) bzw. <u>GOW (µg/l)</u>
2,4-Dinitrotoluol	2	0,05
2,6-Dinitrotoluol	2	0,05
2-Amino-4,6-dinitrotoluol	2	0,2 <sup>a)</sup>
2-Nitrotoluol	2	1
4-Amino-2,6-dinitrotoluol	2	0,2 <sup>a)</sup>
Hexyl	2	2 <sup>a)</sup>
Nitrobenzol	2	0,7
Tetryl	2	5
Hexogen	3	1
Nitropenta		10
Oktogen		175
3-Nitrotoluolsulfonsäure-4	4	<u>3</u>
2,4-Dinitrotoluolsulfonsäure-3	4	<u>3</u>
2,4-Dinitrotoluolsulfonsäure-5	4	<u>3</u>
2,6-Dinitrotoluolsulfonsäure-3	4	<u>3</u>
4-Amino-2-nitrotoluolsulfonsäure-3	4	<u>3</u>
2-Amino-4-nitrotoluolsulfonsäure-5	4	<u>3</u>
2,4,6-Trinitrobenzoesäure	6	<u>0,1</u>
2-Amino-4,6-dinitrobenzoesäure	6	<u>0,1</u>
4-Amino-2,6-dinitrobenzoesäure	6	<u>0,1</u>
2,4-Dinitrobenzoesäure	6	<u>0,1</u>
2-Amino-6-nitrotoluol	6	<u>0,1</u>
4-Amino-6-nitrotoluol	6	<u>0,1</u>
2-Amino-4-nitrotoluol	6	<u>0,1</u>
2,4-Diamino-6-nitrotoluol	6	<u>0,1</u>
2,6-Diamino-4-nitrotoluol	6	<u>0,1</u>

(a) vorläufiger Wert)

Die Zusammenfassung einzelner STV in Bewertungsgruppen orientiert sich an Stoffklassen und kanzerogener Wirkung [13, 17]. In der Bewertungsgruppe 1 werden Stoffe ohne Berücksichtigung kanzerogener Wirkung und in Gruppe 2 mit Berücksichtigung kanzerogener Wirkungen erfasst [21]. Die Bewertungsgruppe 3 umfasst nur Hexogen als einzigen nicht aromatischen Stoff. Weitere Stoffe, für die eine nur unzureichende Datengrundlage vorhanden war, wurden auf der Grundlage von Untersuchungen/Empfehlungen des Umweltbundesamtes [12, 17] den Bewertungsgruppen 4 bis 6 zugeordnet. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist keiner der Stoffe

der Gruppen 3 und 4 als gentoxisch zu bewerten. Stoffe der Gruppe 6 sind aufgrund von Strukturanalogien mit oder als Primärmetabolite gentoxischer Stoffe vorerst als gentoxisch einzustufen.

Den Bewertungsgruppen wurden dann **gesundheitliche Orientierungswerte (GOW)** zugewiesen. Der GOW ist ein Vorsorgewert für humantoxikologisch nur teil- oder nicht bewertbare trinkwassergängige Stoffe [17]. Er ist so bemessen, dass eine spätere humantoxikologische Bewertung mit Sicherheit zu einem lebenslang duldbaren **Leitwert (LW)** führen wird, der gleich oder größer als der GOW ist.

Die Wirkung von Stoffgemischen der STV muss mit in die Bewertung einbezogen werden. Da STV häufig in Stoffgemischen vorkommen und ein ähnliches Wirkungsspektrum aufweisen, sind Kombinationswirkungen der Stoffe zu berücksichtigen.

Für die Bereiche gesättigte Zone und Oberflächenwasser wurden im Rahmen von Untersuchungen zur natürlichen Schadstoffminderung von STV für ausgewählte Stoffe die sich bildenden wesentlichen Transformationsprodukte systematisiert [10]. Diese Aufstellung hat qualitativen Charakter. Welche Transformationsprodukte hauptsächlich entstehen, ist zum einen von der Zusammensetzung des Schadstoffinventars und zum anderen von den Milieubedingungen abhängig und muss daher im Einzelfall für jeden Standort speziell ermittelt werden.

**Tabelle 3: Ausgewählte Kontaminanten und deren wesentliche Transformationsprodukte in der gesättigten Zone und Oberflächengewässer (nach Joos, Knackmuss et al. 2008) [10]**

Stoff	Bewertungsgruppe	GFS ( $\mu\text{g/l}$ ) bzw. <u>GOW (<math>\mu\text{g/l}</math>)</u>
1,3,5-Trinitrobenzol	1	100
2,4,6-Trinitrophenol	1	0,2 <sup>a)</sup>
3-Nitrotoluol	1	10
4-Nitrotoluol	1	3
1,3-Dinitrobenzol	2	0,3
2,4,6-Trinitrotoluol	2	0,2
2,4-Dinitrotoluol	2	0,05
2,6-Dinitrotoluol	2	0,05
2-Amino-4,6-dinitrotoluol	2	0,2 <sup>a)</sup>
2-Nitrotoluol	2	1
4-Amino-2,6-dinitrotoluol	2	0,2 <sup>a)</sup>
Hexyl	2	2 <sup>a)</sup>
Nitrobenzol	2	0,7
Tetryl	2	5
Hexogen	3	1
Nitropenta		10
Oktogen		175
3-Nitrotoluolsulfonsäure-4	4	<u>3</u>
2,4-Dinitrotoluolsulfonsäure-3	4	<u>3</u>

Stoff	Bewertungsgruppe	GFS ( $\mu\text{g/l}$ ) bzw. <u>GOW (<math>\mu\text{g/l}</math>)</u>
2,4-Dinitrotoluolsulfonsäure-5	4	<u>3</u>
2,6-Dinitrotoluolsulfonsäure-3	4	<u>3</u>
4-Amino-2-nitrotoluolsulfonsäure-3	4	<u>3</u>
2-Amino-4-nitrotoluolsulfonsäure-5	4	<u>3</u>
2,4,6-Trinitrobenzoesäure	6	<u>0,1</u>
2-Amino-4,6-dinitrobenzoesäure	6	<u>0,1</u>
4-Amino-2,6-dinitrobenzoesäure	6	<u>0,1</u>
2,4-Dinitrobenzoesäure	6	<u>0,1</u>
2-Amino-6-nitrotoluol	6	<u>0,1</u>
4-Amino-6-nitrotoluol	6	<u>0,1</u>
2-Amino-4-nitrotoluol	6	<u>0,1</u>
2,4-Diamino-6-nitrotoluol	6	<u>0,1</u>
2,6-Diamino-4-nitrotoluol	6	<u>0,1</u>

Für einen vollständigen Abbau zu  $\text{CO}_2$ , anorganischem Stickstoff und Wasser (Mineralisierung), wie sie für die Sanierung von kontaminierten Bereichen bzw. Medien angestrebt wird, ist die Spaltung des aromatischen Rings erforderlich. Die Entaromatisierung und Ringöffnung erfordert entweder oxidative (hydroxylierende) [22] oder hydrogenolytische [23] Initialreaktionen durch aerobe Bakterien. So wurde beispielsweise beim Abbau der Dinitrotoluole die Bildung von Nitrit nachgewiesen. Der Nachweis der dabei entstehenden Zwischenprodukte gelang in natürlichen Versuchssystemen mit gesättigtem Boden und Wasser nicht [24, 25].

Die polaren Stoffgruppen der Nitrobenzoesäuren, Nitrotoluolsulfonsäuren und Nitrophenole liegen oft als Co-Kontaminanten neben den unpolaren Nitroaromaten (TNT, DNT und MNT) in Rüstungsaltslasten vor.

**Tabelle 4: Ausgewählte Kontaminanten und deren wesentliche Transformationsprodukte (aus Joos, Knackmuss et al. 2008) [10]**

Stoff	Milieu- und Randbedingungen	Wesentliche Transformationsprodukte/ Metabolite
NBS 2,4,6-TNBS	Reduktion – Oxidation	4-Amino-2,6-dinitrobenzoesäure und 2-Amino-4,6-dinitrobenzoesäure Aminodinitrobenzoesäuren durch Oxidation der Aminodinitrotoluole [26].
NBS (3-NBS, 4-NBS)	Aerob – mikrobiell in ungesättigter Zone	Mononitrotoluole (3-NT, 4-NT) [27, 28].
NTSS		NTSS relativ persistent
NP		Bildung aus NT ([29])
NP (3-NT)	Mikrobielle Oxidation	Zu 3-NP
NP (mono-NP)		2-NP und 4-NP (über Nitritabspaltung – Monooxygenase) [30]; [31])
NP 2,4,6-TNP und 2,4-DNP	Mineralisierung	2,4-DNP - 4,6-Dinitrohexanoat [32].

### 4.3 Transformation

Bei der Beurteilung eines Standortes mit seiner spezifischen Schadstoffsituation ist zu berücksichtigen, dass nicht nur ein Transformationsprozess isoliert stattfindet. Abhängig ist dieser vom Kontaminationsspektrum insgesamt und den betroffenen Schutzgütern.

In Abb. 1 werden beispielhaft die wichtigsten Metabolisierungswege des 2,4,6-TNT dargestellt [10].

In Batchversuchen zur photochemischen und mikrobiellen Transformation von 2,4,6-TNT sowie einiger sprengstofftypischer Verbindungen konnten Informationen über die verschiedenen Metabolisierungswege gewonnen und somit das Auftreten einiger in Oberflächenwässern gefundener Metabolite erklärt werden.

1,3,5-TNB entsteht durch photochemische Transformation aus 2,4,6-TNT und 2,4,6-TNBS, die ebenfalls photolytisch aus TNT gebildet werden. Bei der Phototransformation des TNT ergibt sich als einer der Hauptmetabolite 2-A-4,6-DNBS. Aminodinitrotoluole werden lediglich unter mikrobiellem Einfluss mit einer weiteren photochemischen Umwandlung zu den zugehörigen Aminodinitrobenzoesäuren gebildet. 2-A-4,6-DNBS als auch 4-A-2,6-DNBS können auch durch mikrobiellen Umbau entstehen. 3,5-DNA metabolisiert hauptsächlich nur mikrobiell.



## 5 Vertiefende bundesweite Recherche bei Wasserversorgern und Umweltbehörden/-institutionen

### 5.1 Vorgehensweise

Die Literaturrecherche der Arbeitshilfe (Stufe IA 2012) [9] stellt grundlegende Informationen, insbesondere zu bereits vorliegenden Veröffentlichungen mit Erkenntnissen der letzten 5 bis 10 Jahre, hinsichtlich der Stoffgruppe STV sowie von Sanierungsmaßnahmen, das Schutzgut Wasser betreffend, zur Verfügung. Dies beinhaltet zum einen die Darstellung der Grundlagen zu Stoffgruppen, Herstellung, Eigenschaften, chemischem Verhalten, Transformationsmechanismen und Analytik sprengstofftypischer Verbindungen und zum anderen eine erste Zusammenstellung technischer Verfahren zur Entfernung von STV aus Grundwasser und Rohwasser von Wasserversorgungsanlagen. Weiterhin werden mögliche STV-Belastungen über den Wirkungspfad Boden-Pflanze in der landwirtschaftlichen Nutzung und im Gartenbau betrachtet.

Im Rahmen der vorliegenden Berichtsstufe IB werden vertiefende Kenntnisse hinsichtlich der Aufbereitungsmethoden STV-belasteten Rohwassers zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung bundesweit ausgewertet. Es fließen jedoch auch Ausführungen bzgl. durchgeführter Gefahrenabwehrmaßnahmen auf Grund von STV-Belastungen im nicht mehr genutzten Oberflächenwasser, Grundwasser, Schichtwasser bzw. Abwasser in die Arbeitshilfe ein. Hier wurden auch relevante Rechercheergebnisse über den 5 bis 10-Jahreszeitraum der Arbeitshilfe IA hinaus eingebracht.

Neben einer Fortführung der Auswertung recherchierter Literatur wurde ein Fragebogen erarbeitet, der die grundlegenden Fragestellungen zu STV-belastetem Rohwasser bei potentiell betroffenen Wasserversorgern anspricht. Darüber hinaus berücksichtigt die Abfrage auch Fragestellungen im Zusammenhang mit vorgesehenen bzw. bereits eingeleiteten Maßnahmen bzgl. der Schutzgutbetroffenheit von Gewässern durch STV allgemein.

Zusätzlich wurden zuständige Umweltbehörden bzw. -institutionen zu Sanierungszielen, Zielwerten und angewandten Sanierungsmethoden angefragt.

#### 5.1.1 Bundesweite Recherche bei betroffenen Wasserversorgern

Der Fragebogen an ausgewählte Wasserversorger enthält insgesamt 10 Fragen. Im Vorspann wird die Ziel- und Aufgabenstellung kurz erläutert, so dass bereits vor der Durchsicht/Bearbeitung der einzelnen Fragen zu erkennen ist, welche Ergebnisse aus der Beantwortung der Fragen hinsichtlich der Art der vorliegenden Probleme an Standorten mit STV-Belastungen, Behandlungsmethoden, Sanierungsmaßnahmen, sowie der Anlagentechnik zu erwarten sind. Damit Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen (Vergleich Kosten-Nutzen) mit einfließen können, wurden Angaben zum finanziellen Aufwand erfragt.

Werden entsprechende STV-Belastungen im Wasser aufgeführt, ergibt sich die Frage nach dem Untersuchungsspektrum zur Überprüfung des Rohwassers und der gesetzlichen Grundlage zur Wasserentnahme bzw. Aufbereitung. Die abschließenden Fragen zielen auf Festlegungen zu Aufbereitungsmaßnahmen für belastetes Wasser bzw. zur Handhabung der Wassergewinnung ab, beispielsweise in Form von Nutzungseinschränkungen bzw. -aufgabe oder Umbindung der gesamten Versorgung.

Zunächst wurden die Wasserversorger der betroffenen Gemeinden/Städte angefragt. Aufgrund ihrer Zuständigkeit mussten auch die überregionalen Versorgungsbetriebe beteiligt werden. Für außerhalb der Gemeinde im Abstrom zu ehemaligen Rüstungsstandorten befindliche betroffene Wasserfassungen wurden abschließend mehrere zuständige oder betroffene Wasserversorgungsbetriebe einbezogen.

Neben den Wasserversorgern wurden parallel die zuständigen Umweltbehörden mit in die bundesweite Abfrage eingebunden, u.a. bzgl. Festlegungen von Sanierungszielwerten.

Der vollständige Fragebogen ist im Anhang 1 zu ersehen.

### 5.1.2 Bundesweite Nachrecherche bei Umweltbehörden/-institutionen

Die hinsichtlich der Durchführung von Gefahrenabwehrmaßnahmen auf Grund von Rüstungsaltslasten zuständigen örtlichen bzw. überörtlichen Umweltbehörden der Bundesländer wurden bereits im Rahmen der Stufe IA der Arbeitshilfe im Jahr 2012 zu ihren ehemaligen Standorten angefragt. Erste Erkenntnisse konnten übermittelt werden, die im Rahmen der Arbeitsstufe IB 2013 in Form einer bundesweiten Nachrecherche zu vertiefen waren. Konnten keine weiteren Informationen zur Belastungssituation ehemaliger Rüstungsstandorte sowie zu bereits durchgeführten, in der Durchführung befindlichen oder geplanten Gefahrenabwehrmaßnahmen recherchiert werden, wurde nach entsprechender Genehmigung auf veröffentlichtes Informationsmaterial zurückgegriffen.

## 5.2 Ergebnisse der Recherche

### 5.2.1 Betroffenheit von Wasserfassungen im Umfeld ehemaliger Rüstungsbetriebe durch STV

Als Ergebnis kann herausgestellt werden, dass die Wasserversorgung bei allen angeschriebenen Wasserversorgern trotz teilweiser Betroffenheit durch sprengstofftypische Verbindungen gewährleistet werden kann.

Eine Vielzahl der Wasserwerke nutzt aktuell insbesondere Brunnen bzw. Wasserentnahmestellen, die mit den ehemaligen Rüstungsstandorten nicht in räumlicher Verbindung stehen. Bei einigen Standorten wurden nach den ersten Gefahrenerkundungsmaßnahmen STV im Einzugsbereich der Wasserentnahmestellen nachgewiesen, die eine Behandlung des Rohwassers erforderlich machten. Nach Feststellung des Schadens wurden kurzfristig Aufbereitungsmaßnahmen mittels Aktivkohle installiert, bis die Wasserversorgung auf anderem Wege gewährleistet werden konnte. U.a. wurden andere Brunnen/Entnahmestellen zur Wasserversorgung bzw. unbelastete Brunnen im Anstrom herangezogen sowie in entsprechender Entfernung zu den Rüstungsstandorten neu errichtet. Dadurch wurde keine weitere Behandlung von STV-belastetem Grundwasser erforderlich.

Kritischer wurden die Belastungen von Grundwasser dort bewertet, wo u.a. in Wohn- oder Gewerbegebieten private Grundwasserbrunnen bzw. Entnahmemöglichkeiten bestanden. In diesen Fällen wurde die Grundwasserentnahme mittels Nutzungseinschränkungen untersagt. Beispielsweise wurde in Sythen-Lehmbraken im Jahr 2010 die Allgemeinverfügung zum Verbot der Grundwasserförderung von Seiten der Kreisverwaltung Recklinghausen erlassen: „Bekanntmachung über die Allgemeinverfügung zum Verbot der Grundwasserförderung und -nutzung im Bereich Sythen-Lehmbraken in Haltern am See“ [33].

Die Stadt Leverkusen hat Einschränkungen in Form von „allgemeinen Nutzungsrestriktionen“ zur Grundwassernutzung in der Waldsiedlung in Leverkusen-Schlebusch erlassen. Nach der Feststellung von STV-Grundwasserbelastungen wurde ein generelles Grundwassernutzungsverbot in der betroffenen Waldsiedlung ausgesprochen, die erstmalige Allgemeinverfügung stammt aus dem Jahr 1990. Weiterhin wurde die Empfehlung eines Verzichts auf Nutzpflanzenanbau, Regenwasserversickerung und bodenrelevante Eingriffe ausgesprochen.

Grundsätzlich ist zu vermeiden, dass STV-Belastungen ins Trinkwasser gelangen. Daher sollte Grundwasser nur dort gewonnen werden, wo eine STV-Kontamination ausgeschlossen werden kann. Aufgrund der entsprechenden Überlegungen wurden auch Brunnen außer Betrieb genommen, wenn eine STV-Belastung generell zu vermuten war. Dies betrifft u.a. auch das Grundwasser aus tieferen Grundwasserschichten, die mit dem belasteten Grundwasserhorizont nicht korrespondieren, weil ausreichend geschützte Zwischenschichten vorhanden sind. Beispielsweise erfolgte eine Schließung der Brunnen aus vorsorgenden Gründen im Bereich von Hessisch Lichtenau-Hirschhagen, obwohl für den eigentlichen Grundwasserleiter kein analytischer Nachweis auf STV vorliegt. Dies heißt für die Handhabung der Förderung von Rohwasser, dass das Risiko von STV-Belastungen auf ein Minimum reduziert wird und in der Regel die betroffene Wasserfassung umgebunden wird.

## 5.2.2 Betroffenheit von Grundwasser, Sickerwasser, Oberflächenwasser im Umfeld ehemaliger Rüstungsbetriebe durch STV

Die Betroffenheit von Wasserfassungen im Umfeld ehemaliger Rüstungsbetriebe stellt einen Schwerpunkt der Arbeitshilfe dar. Es werden jedoch auch relevante STV-Belastungen in Grund-, Sicker-, Oberflächen-, Schicht- und Abwasser auf den Standorten selbst und im Umfeld ehemaliger Rüstungsbetriebe aufgezeigt. Größtenteils wurden dort bereits Sanierungen bzw. Maßnahmen zur Behebung der festgestellten Schäden eingeleitet bzw. abgeschlossen oder befinden sich in Planung.

Insgesamt konnten bundesweit 20 Standorte, u.a. auch ein Standort als Übungsgelände oder Handgranatenwurfplätze in Thüringen, in die Auswertung der rückgesandten Fragebögen einbezogen werden. Standorte, die sich in einer Bearbeitungsphase befinden, die eine konkrete Einstufung der Betroffenheit des Schutzgutes Wasser noch nicht zulässt bzw. für die abschließenden Verfahrensmaßnahmen noch weitere Erkundungen notwendig sind, wurden in die Bearbeitung nicht mit einbezogen. Es verbleiben sieben Standorte, für die im Sinne der Aufgabenstellung der Arbeitshilfe ausreichend Informationen aus der Internetrecherche und/oder aus den Rückmeldungen der Umfrage vorliegen. Von diesen sieben detaillierter betrachteten Standorten sind vier ehemalige Rüstungsstandorte direkt von Grundwasserbelastungen, einer von Schichtwasser- und zwei von Abwasserbelastungen betroffen.

**Tabelle 5: Auswertung der bundesweiten Recherche**

Bundesland/ Standort	Phase Erk.	Nachgewiesene Belastungen				Fb	Sonst. Infos	Sanierungs- Maßnahmen				Sanierung erfolgt		
		B	W	GW	TW			B	W	GW	SiW	W	SiW	Sonst.
<b>Bundesweite Anfrage (Anzahl der Standorte: 20 in 10 Bundesländern)</b>														
20, davon:	5	14	13	10	1 (5)		1 1	6	6	4		1	5	
<b>Hessen</b>														
Ehem. Sprengstofffabriken DAG, WASAG Stadtallendorfs														
		X	X	X	X		X	X	X				(Si) (Mo) X	
Sprengstoffwerk Hessisch Lichtenau- Hirschhagen														
		X	X	X	(X)	X	X	X	X	X	X	X	X	
<b>Niedersachsen</b>														
„Werk Tanne“ in Clausthal-Zellerfeld														
		X	X			X	X	X	X		X		X	
<b>Nordrhein - Westfalen</b>														
WASAG Sythen in Haltern Am See														
		X	X	X	(X)	X	X	X	X	X			X	X
Sprengstofffabrik Carbonit AG Leverkusen Schlebusch														
		X	X	X	(X)	X	X	X	X	X			X (Mo)	
<b>Rheinland - Pfalz</b>														
Espagit Hallschlag														
		X	X			X	X	X			X	X	X	X
<b>Sachsen</b>														
WASAG Elsnig														
		X	X	X	(X)	X	X	X	X		X	X	X	X

Erk.= Phase Erkundung; Fb=Infos aus Fragebogen; Sonst. Infos: Infos u.a. aus Internetrecherche; Belastungen/Sanierungen: B = Boden, W = Wasser, GW = Grundwasser, TW = Trinkwasser/Rohwasser, SiW = Sickerwasser; (Mo) = Monitoring; Si = Sicherungsmaßnahmen

## 5.3 Fallbeispiele

Im folgenden Kapitel werden die in Tabelle 5 aufgelisteten Standorte an Hand ihrer Schutzgutbetroffenheit und der standortbezogen durchgeführten Gefahrenabwehrmaßnahmen charakterisiert und vorgestellt.

### 5.3.1 Standort mit STV-Belastungen des Bodens und einer Sickerwasserbehandlung (Aktivkohle) – Espagit Hallschlag

Der Standort „Espagit“ in Hallschlag diente von 1915 bis 1920 zur Sprengstoffherstellung, es handelte sich um eine ehemalige Pulverfabrik für Giftgas und Munition. In erster Linie wurden TNT und Dinitrobenzol hergestellt. Die Fabrik wurde im Mai 1920 durch eine Explosion zerstört, der Betrieb wurde nicht wieder aufgenommen. Als morphologische Besonderheit des Standortes in der Eifel ist hervorzuheben, dass die ehemalige Fabrik auf einem Höhenrücken (ca. 630 m ü.NHN) liegt. Dieser stellt eine Wasserscheide dar, die einerseits nach Norden Richtung Nordrhein-Westfalen und andererseits Richtung Süden in eine Vorflut in Rheinland-Pfalz entwässert. Bezogen auf die Altlastensituation wurden die geologischen Gegebenheiten - Standort auf einer dichten Klerf-Schicht erbaut – als sehr günstig eingeschätzt, daher erfolgten die Sicherungsmaßnahmen der Restkontamination in Form einer Abdeckung.

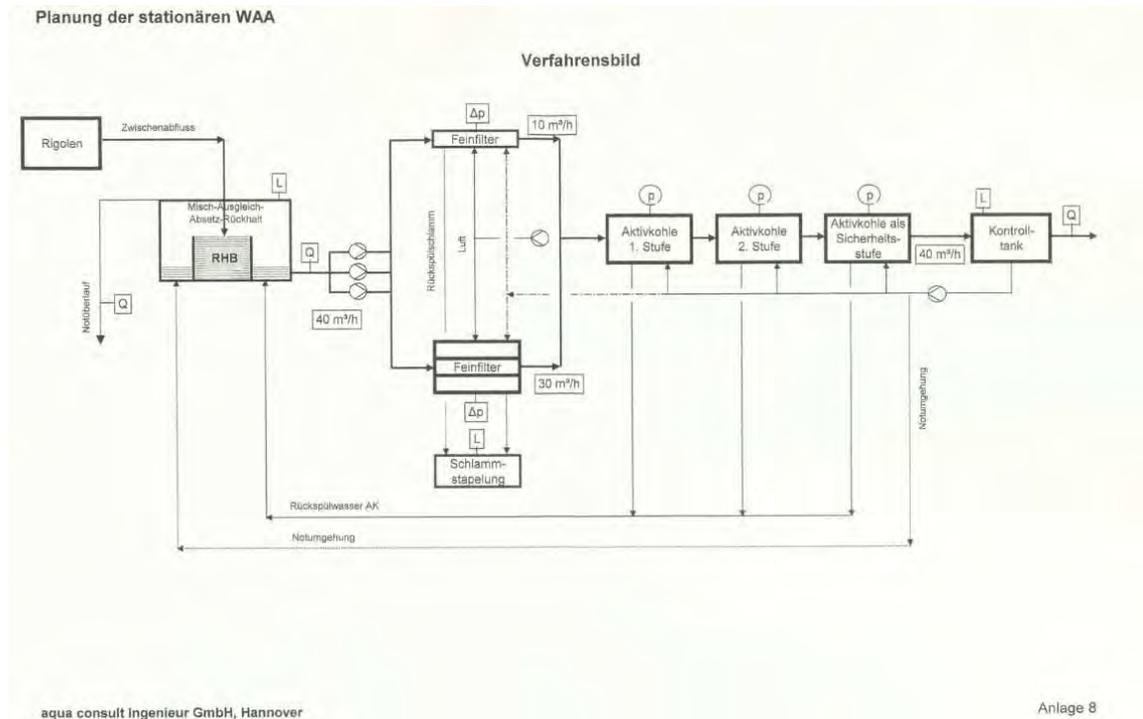
Im Rahmen der historischen Erhebung und der Gefahrerforschung wurde die massive Belastung des Schutzgutes Boden festgestellt. Während der Munitionsbergung wurden auch Giftgasgranaten ausgehoben und entsorgt, die Betroffenheit des Schutzgutes Luft ließ sich für den Zeitraum bis zur vollständigen Entmunitionierung nicht vollständig ausschließen. Die durch die Explosion versprengte Munition bis in die benachbarte landwirtschaftliche Fläche hinein stellt eine Betroffenheit der Schutzgüter Mensch und Tiere/Pflanzen dar. Gemäß Internetrecherche muss auch das Schutzgut Wasser/Sickerwasser als belastet aufgenommen werden. Die Betroffenheit des Trinkwassers der nächstgelegenen Wasserentnahmestellen wurde aufgrund der diesbezüglich günstigen geologischen Gegebenheiten ausgeschlossen.

In den 1990er Jahren begannen Maßnahmen zur Erkundung des Gefahrenpotentials, der Bodensanierung und dadurch bedingt der Gebäude- und Anlagendemontage sowie der Munitionsberäumung im Kernbereich bis hin zu den Außenbereichen. Grundwasserbelastungen wurden nicht festgestellt. Jedoch kam es im Rahmen der Bodensanierung zu mit STV belasteten Sickerwasseraustritten bzw. austretendem Schichtwasser, sog. Zwischenabfluss. Die verbliebenen Kampfmittel wurden mit einer geeigneten Abdeckung gesichert. Über ein umlaufendes Rigolensystem wurde der Zwischenabfluss einer Behandlungsanlage zugeführt. Das insbesondere über Aktivkohlefilter gereinigte Wasser konnte in die nächste Vorflut südlich des Standortes geleitet werden.

Die Reinigung des anfallenden Sickerwassers ist weitestgehend auf organische Schadstoffe ausgerichtet. Es wurden folgende Qualitätsziele für die Einleitung in den Seifenbach definiert:

**Tabelle 6: Fallbeispiel Espagit Hallschlag - Sanierungszielwerte Sickerwasser Auswertung des beantworteten Fragebogens – SGD Nord Trier)**

Parameter	Max. Konzentration
Summe Nitroaromate (ohne Nitrophenole)	5,0 µg/l
Summe Pikrinsäure/ Pikraminsäure	2,0 µg/l
Summe 16 PAK nach EPA	0,5 µg/l
Gesamt Arsen	10,0 µg/l



**Abbildung 2: Fallbeispiel Espagit Hallschlag - Verfahrensschema Sickerwasserbehandlung über Aktivkohle (bereitgestellt von der SGD Nord Trier)**

Wie in dem Verlaufsschema zu ersehen ist, sind die einzelnen Verfahrensschritte hintereinander geschaltet: Das Sickerwasser aus dem Rigolensystem wird in einem Absetzbecken gesammelt und hierüber der Filteranlage zugeführt. Nach dem Absetzbecken gelangt das Abwasser durch rückspülbare Drucktrommelfilter mit Tuchbespannung in die Feinfiltration zur Behandlungsstufe für Fest- und Schwebstoffe mit einer hydraulischen Leistungsfähigkeit von 40 m<sup>3</sup>/h. Die Filteranlage besteht aus 2 Einzelfiltern für 10 m<sup>3</sup>/h sowie drei Feinfiltereinheiten mit insgesamt 6 Filtern für 30 m<sup>3</sup>/h. Entsprechend des hydraulischen Erfordernisses ist das Zuschalten der Feinfilter möglich. Der Schlamm aus den Filtern wird in einem Container mit 10 m<sup>3</sup> Nenninhalt gesammelt, die abgeschätzte Schlammmenge beträgt ca. 130 m<sup>3</sup>/a.

Die Aktivkohlefilterung wurde als einstraßiges, dreistufiges System ausgerichtet, wobei 2 Filter zur Schadstoffelimination und ein Filter als Sicherheitsstufe dienen. Die Behälter besitzen jeweils ein Füllvolumen von 15 m<sup>3</sup>, die minimale Kontaktzeit bei einer Durchsatzleistung von 40 m<sup>3</sup>/h je Filter wurde mit 22 Minuten festgelegt. Die Anlage ist so konzipiert, dass sie weitestgehend automatisiert arbeitet. Es wurde vorab ein Zeitaufwand von ca. 4 Stunden pro Woche mit reinem Routineaufwand hinsichtlich Kontrolle und Wartung veranschlagt.

Entmunitonierung, Bodensanierung bzw. Sicherungsmaßnahmen wurden Mitte der 1990er Jahre in die Wege geleitet. Weitere Maßnahmen sollten verhindern, dass durch den belasteten Boden entstandenes Sickerwasser zu weiteren Kontaminationen führt. Das belastete Sickerwasser wurde über ein Drainagesystem in einem Pufferbecken aufgefangen und ab 2001 über eine provisorische bzw. ab August 2006 über die o.g. Reinigungsanlage (Aktivkohle) gefiltert. Die Sanierung und Sicherung der Bodenbelastungen, Entmunitonierung und Sickerwasserbehandlung gelten nach derzeitigem Stand als vorläufig abgeschlossen. Durch die Filteranlage werden die von der zuständigen Behörde festgelegten Zielwerte nicht überschritten; es erfolgen abschließend regelmäßige Kontrolluntersuchungen.

Insgesamt schlug die Entmunitonierung bzw. Sanierung der ehemaligen Fabrik mit einem Betrag von 54,3 Millionen Euro zu Buche. Es wurden ab den 1990er Jahren im Zeitraum der Entmunitonierung 6.316 Granaten, davon 506 mutmaßliche Giftgasgranaten, und zehn mit dem Reizstoff „CLARK“ gefüllte Sprengkörper geborgen. Es wurden außerdem mehr als fünf Tonnen

Sprengstoff, über 36 Tonnen Zündladungen und 56 Tonnen Munitionsteile (insbesondere aus Sprengtrichtern, sogenannten „Exotrichtern“) zusammengetragen und entsorgt.

Für die Sickerwasserreinigung belaufen sich die Betriebskosten ab dem Jahr 2007 auf ca. 130.000 Euro jährlich [34].

(Quelle: Von Seiten der zuständigen Umweltbehörde wurden Unterlagen zur Verfügung gestellt, die neben den Informationen aus der Internetrecherche in die Standortdarstellung einfließen [35-49].)

### **5.3.2 Standort mit STV-Belastungen des Bodens/ Abwasser-Oberflächenwasser mit Abwasserbehandlung über Aktivkohle und Bio-Verfahren – „Werk Tanne“ in Clausthal-Zellerfeld**

Das ehemalige „Werk Tanne“ in Clausthal-Zellerfeld wurde mit einer Fläche von 120 ha im Zeitraum von 1935 bis 1938 als Munitionswerk errichtet. Ab 1939 wurden etwa 100.000 t TNT produziert und in Bomben, Granaten und Minen abgefüllt.

Im späteren Verlauf des Krieges ereigneten sich mehrere Unglücke im Werk, das schwerste war die Explosion der Nitrierungsanlage am 6. Juni 1940. Am 7. Oktober 1944 griffen die Alliierten die Sprengstofffabrik an. Sie zerstörten 70 Gebäude, danach war eine weitere TNT-Produktion, hauptsächlich wegen des zerstörten Leitungsnetzes, bis zum Kriegsende nicht mehr möglich. Die Bombenabfüllung arbeitete jedoch weiter bis zur Besetzung durch die US-Armee im April 1945.

Neben den Ergebnissen des Fragebogens, der von Seiten der Umweltbehörden und des Eigentümers ausgefüllt zur Verfügung gestellt wurde, wurden auch Unterlagen der mit den Maßnahmen (Gefahrenerforschung bis hin zur Sanierung) betrauten Firmen übermittelt [10, 50, 51].

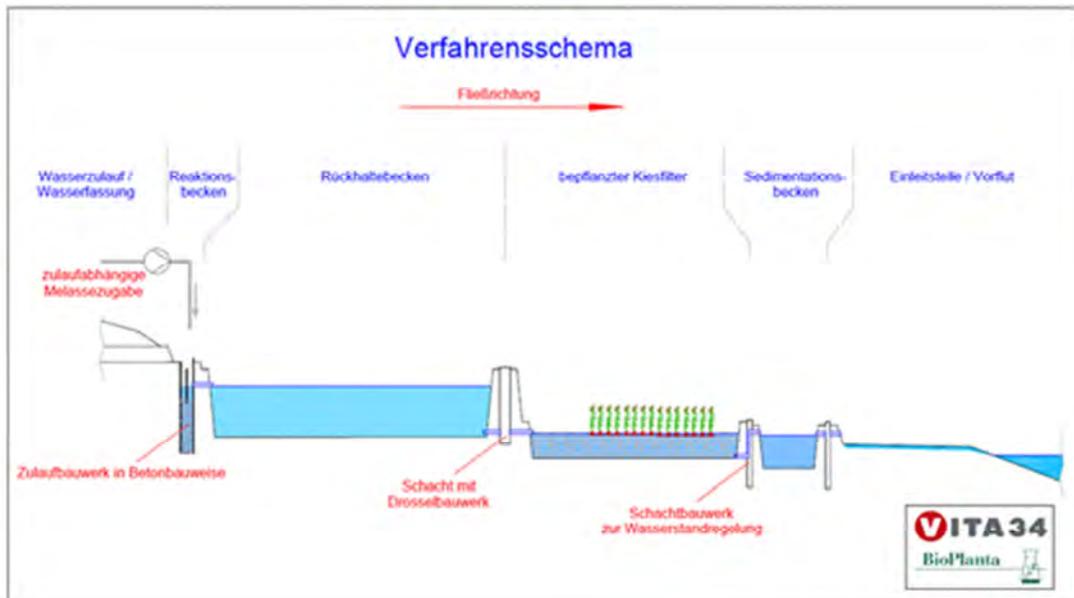
Seit Mitte der 1990er Jahre besteht die sog. Sickerwasserreinigungsanlage auf dem Standort, die als klassische Aktivkohleanlage konzipiert ist. Es werden kontaminierte Sickerwässer erfasst, über ein offenes Pufferbecken (Erdbecken) gesammelt und der Aktivkohlefilteranlage zur Reinigung zugeführt. Dieser Bereich liegt nicht in einem Trinkwasserschutzgebiet. Die Reinigungsanlage arbeitet in Abhängigkeit des diskontinuierlichen Wasseranfalles. Berücksichtigt werden hierbei polare und unpolare STV [10]. Das gereinigte Abwasser wird in ein stehendes Gewässer, den Vorfluter „Pfaunteich“, eingeleitet.

Die Sickerwasserreinigungsanlage in Form einer klassischen Aktivkohleanlage lässt sich durch folgenden Prozessablauf beschreiben:

Das unbehandelte Sickerwasser wird in einem ersten Schritt über einen Kiesfilter (Mehrschichtfilter mit Quarzkies und einer Körnung von 0,4-0,8 mm) und anschließend über Aktivkohlefilter (Aktivkohle Silcarbon S 835 mit einer Körnung von 0,5 – 2,8 mm) geführt. Die Anlage kann im Reihen- (18 m<sup>3</sup>/h) als auch im Parallelbetrieb (36 m<sup>3</sup>/h) betrieben werden.

Zusätzlich befindet sich für ein Teileinzugsgebiet des Werksgeländes ein weiteres Sanierungsverfahren in der Planung: Ein sogenanntes „Constructed Wetland“, das unter Zugabe von Eisen und Melasse nach dem Prinzip einer Pflanzenkläranlage biologisch funktioniert.

Grundlage dieses Verfahrens ist die abiotische und biotische Transformation von Nitroaromaten. Die für die Abtrennung und Transformation der in dem Wasser enthaltenen polaren und unpolaren Nitroaromaten erforderlichen Milieubedingungen werden in einer passiv biologischen Behandlungsanlage („Constructed Wetland“) eingestellt.



**Abbildung 3: Fallbeispiel Werk Tanne - Verfahrensschema Constructed Wetland (Verfahrensdarstellung übernommen vom Verfahrensentwickler „VITA34 Leipzig“)**

Für eine effiziente Abtrennung der Nitroaromaten wird eine mehrstufige Behandlungsanlage eingesetzt. Diese umfasst ein Reaktionsbecken, ein Rückhaltebecken, einen bepflanzten Kiesfilter und ein nachgeschaltetes Sedimentationsbecken (s. Abbildung 3).

Im Reaktionsbecken erfolgt durch die Zugabe von Melasse eine Initiierung der Sauerstoffzehrung. Das Rückhaltebecken gleicht hydraulische Spitzenzuflüsse, beispielsweise nach der Schneeschmelze oder einem Starkniederschlagsereignis, aus. In dem nachfolgenden bepflanzten Kiesfilter findet die mikrobielle Transformation der Nitroaromaten statt. Diese läuft bevorzugt unter reduzierenden Bedingungen im sauerstofffreien Milieu ab. Die reduzierten Transformationsprodukte sind reaktiv und gehen starke Bindungen mit den Oberflächen von organischen Materialien und Mineralien ein. Das nachgeschaltete Sedimentationsbecken dient dem Rückhalt von möglicherweise verfahrensbedingt im Wasser vorhandenem Eisen.

In die Kostenkalkulation müssen die Realisierungskosten der Anlage (Technische Ausrüstung mit Ingenieurleistungen), die Betriebskosten (Überwachung, Nutzung der Melasse, Wartung und Versorgung) sowie die Monitoringkosten (Probenahme, Analytik u.a.) einberechnet werden.

### 5.3.3 Standort mit Grund- bzw. Abwasser und Drainwasseraufbereitungsanlage mittels Aktivkohle-Adsorbern – WASAG Elsnig

Die Munitionsfabrik der Westfälisch-Anhaltischen Sprengstoff AG (WASAG“ in Elsnig bei Torgau war als sog. Werk „Vogelsang“ von 1936 bis 1945 in Nutzung, wobei es sich um die drittgrößte Sprengstofffabrik zu dem Zeitpunkt handelte. Während des Zweiten Weltkrieges wurden ca. 145.000 t TNT sowie mehrere Tausend Tonnen Marinesprengstoff und Leuchtpurmunition (u.a. Hexanitrodiphenylamin und K-Salz/Hexogen) produziert. Nach Kriegsende wurde die Fabrik demontiert und Teile des Standortes wurden gesprengt. Zum späteren Zeitpunkt erfolgte eine Nutzung zunächst als Munitionslager, später als Munitionsinstandsetzungsbasis.

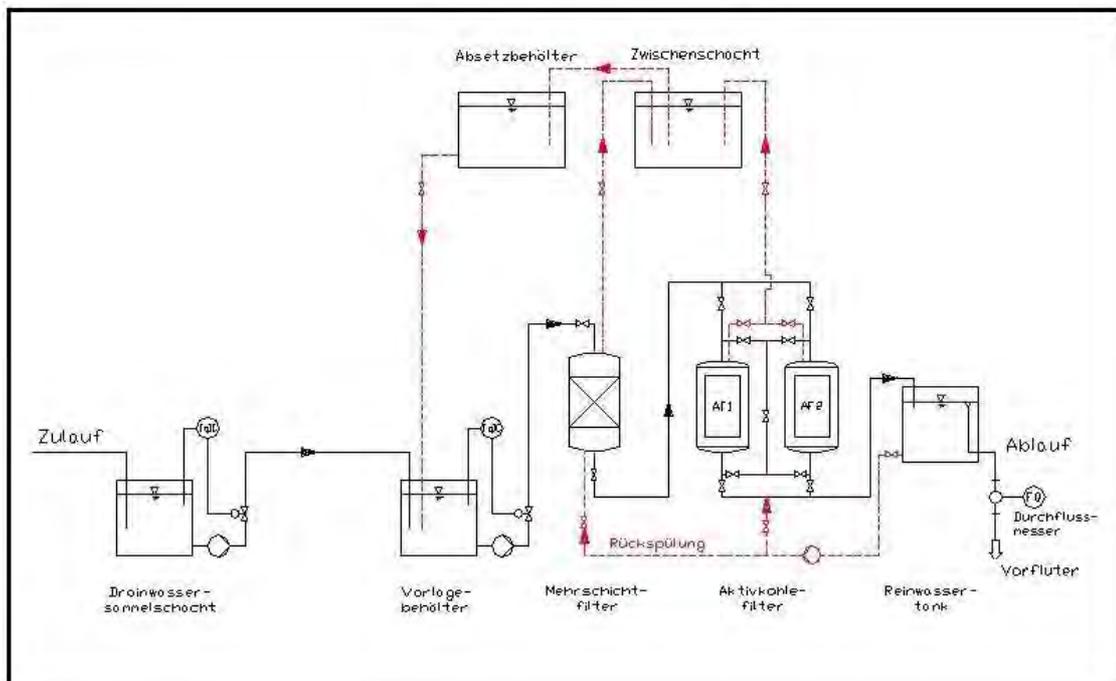
Die folgende Darstellung basiert auf der Grundlage der im Rahmen der Beantwortung des Fragebogens übermittelten Daten von Seiten der beteiligten Umweltbehörde und der Ausführungen aus KORA TV5, „5.3. Forschungsbericht zum FuE-Projekt – Rüstungsalblast Elsnig/Torgau“ [10, 52].

In den 1990er Jahren erfolgte die Altlastenerkundung beginnend mit der historisch-genetischen Recherche und der Untersuchung der Verdachtsflächen. Auf dem Standort wurden altlastverdächtige Flächen mit STV-Belastungen vermutet und bestätigt. Vorab existierte ein Förderbrun-

nen als Grundwasserentnahmestelle, in dem sich Belastungen zeigten und im Grundwasser erst Diethylether und anschließend auch Hexogen-Belastungen nachgewiesen wurden. Nach der Prüfung und Abwägung der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten wurde die Förderung eingestellt und das Wasserwerk stillgelegt. Die im weiteren Abstrom gelegenen aktuellen Trinkwasserfassungen wiesen zu keinem Zeitpunkt Beeinträchtigungen auf, obwohl sich die nachgewiesenen STV-Belastungen im unterirdischen Einzugsgebiet der Fassungen befinden. Zur Sicherung einer unbedenklichen Grundwasserförderung wird die Situation im Grundwasserabstrom der ehemaligen Munitionsfabrik durch ein regelmäßiges Monitoring überwacht.

Auf dem Standort wird eine Reinigungsanlage für STV-kontaminiertes Dränagewasser (somit Abwasser) betrieben.

Die Reinigung in der Drainwasseraufbereitungsanlage - DWA - verläuft über Aktivkohle-Adsorber (siehe Fließschema Abbildung 4).



**Abbildung 4: Fallbeispiel WASAG Elsning - Vereinfachtes Verfahrenfließschema der Drainwasseraufbereitungsanlage (zur Verfügung gestellt im Rahmen der Beantwortung des Fragenbogens durch LRA Nordsachsen)**

Wie aus dem Verfahrensschema zu erkennen ist, wird das mit STV belastete Drainwasser, das aus dem nördlichen Vorland der ehemaligen Sprengstofffabrik WASAG Elsning als Grundwasser zufließt, in einem Schacht gesammelt und über einen Vorlagebehälter dem Filtersystem zugeführt. Das Grundwasser drückt als Fremdwasser aus dem Untergrund in die oberen Bodenschichten bis in den Drängraben. Den Aktivkohlefiltern ist ein Mehrschichtfilter vorgeschaltet. In der DWA werden zwei hintereinander geschaltete Filter mit je 3 m<sup>3</sup> Aktivkohle vom Typ Aqua S 830 X betrieben. Das Reinwasser wird über ein Kanal- und Grabensystem in den Vorfluter abgeschlagen. Bei Bedarf kann das Wasser aus dem Reinwassertank nochmals über den Mehrschichtfilter bzw. die Aktivkohlefilter rückgeführt werden. Gemäß wasserrechtlicher Erlaubnis sind folgende Einleitwerte für den Ablauf der DWA festgelegt:

**Tabelle 7: Fallbeispiel WASAG Elsrig - Analytik auf sprengstofftypische Verbindungen (nach Auswertung des Fragebogens, übermittelt durch das LRA Nordsachsen)**

<b>Unpolare STV (sog. Elsrig-Liste)</b>	<b>Einleitwerte für Ablauf der DWA</b>
2-Nitrotoluol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
3-Nitrotoluol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
4-Nitrotoluol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
2,4-Dinitrotoluol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
2,6-Dinitrotoluol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
3,4-Dinitrotoluol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
2,4,6-Trinitrotoluol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
2-Amino-4,6-Dinitrotoluol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
4-Amino-2,6-Dinitrotoluol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
1,3,5-Trinitrobenzol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
1,3-Dinitrobenzol	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
Hexogen	$\leq 10\mu\text{g/l}$
Oktogen	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
Hexyl (wurde tlw. analysiert)	Einzelstoffe $\leq 1\mu\text{g/l}$
	Summenkonzentration $\leq 10\mu\text{g/l}$

In dem 18jährigen Betrieb der DWA wurden die Ablaufwerte grundsätzlich eingehalten. Die Konzentrationen aller analysierten Einzelparameter liegen dabei regelmäßig unterhalb der Bestimmungsgrenze, wobei somit gleichzeitig die UBA-Leitwerte für Trinkwasser eingehalten werden.

#### **5.3.4 Standort mit STV-Belastungen im Grundwasser mit Behandlung über Aktivkohle – Hessisch Lichtenau**

Der Standort Hessisch Lichtenau wurde im Zeitraum von 1938 bis 1945 als Munitionsfabrik ausgebaut und umfasste bei Kriegsende ca. 400 Gebäude auf ca. 230 ha Werksgelände. In der Fabrik wurden insgesamt rd. 135.000 t Sprengstoff (TNT) und ca. 7.000 t Geschoss-Treibmittel (Pikrinsäure), in Spitzenzeiten bis zu 81 t TNT täglich, produziert.

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden von den Alliierten Teile der Liegenschaft zerstört bzw. demontiert - insgesamt 148 Gebäude, wie Kraftwerke, Sprengstofflager, und Abfüllstationen. Ab dem Jahr 1946 erfolgte die Umnutzung des Werksgeländes. Die Produktionsbereiche wurden als Gewerbe- und Industriestandorte hergerichtet, die ehemaligen Arbeitslager wurde zu Wohnsiedlungen umgewandelt.

Von Seiten der zuständigen Umweltbehörde wurden im Rahmen der Beantwortung des Fragebogens informative Unterlagen zur Verfügung gestellt, die neben den Informationen aus der Internetrecherche in die Standortdarstellung einfließen [53-55]. Insbesondere wurde auf die Broschüre „Boden gut gemacht, 2013“ verwiesen, aus der entsprechend Daten in die Standortbeschreibung eingearbeitet wurden [56].

Belastungen mit STV konnten im Grundwasser nachgewiesen werden. Daraufhin wurden in den 1970er Jahren Grundwasservorkommen neu erschlossen, die außerhalb des Einflussbereichs der Rüstungsalast liegen. Die vorher genutzten Gewinnungsanlagen wurden aufgrund der STV-Problematik stillgelegt.

Belastetes Grund- bzw. Sickerwasser fällt über Brunnen, Quellaustritte und aus Haltungsabschnitten der ehemaligen Werkskanalisation auf dem Werksgelände an. Das belastete Wasser wird über eine zentrale Wasseraufbereitungsanlage gereinigt und der lokalen Vorflut zugeleitet.

Im Rahmen von Sicherungsmaßnahmen erfolgt ein Grundwassermonitoring auf unpolare und polare STV mit Messstellen auch im weiteren Umfeld, wozu auch einzelne Brunnen der aufgegebenen Wassergewinnungsanlagen gehören.

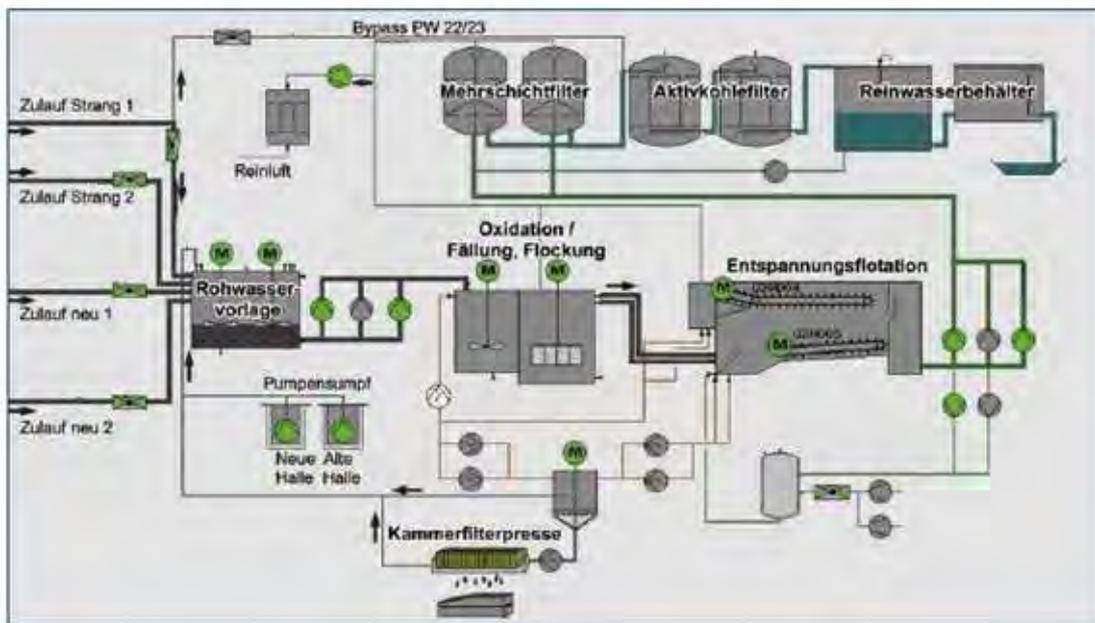
**Tabelle 8: Fallbeispiel Hessisch Lichtenau - Auflistung der Prüfparameter in der Analytik (Informationen aus den Antworten zum Fragebogen vom Regierungspräsidium (RP) Kassel)**

Unpolare STV (10 Einzelparameter)	Polare STV (6 Ep)
2-Nitrotoluol	2,4-DNT-Sulfonsäure-3
3-Nitrotoluol	2,4-DNT-Sulfonsäure-5
4-Nitrotoluol	2,4,6-Trinitrobenzoesäure
2,4-Dinitrotoluol	2-Amino-4,6-Dinitrobenzoesäure
2,6-Dinitrotoluol	4-Amino-2,6-Dinitrobenzoesäure
3,4-Dinitrotoluol	2,4-Dinitrobenzoesäure
2,4,6-Trinitrotoluol	
2-Amino-4,6-Dinitrotoluol	
4-Amino-2,6-Dinitrotoluol	
1,3,5-Trinitrobenzol	

Die Einleitung der aufbereiteten Wässer in die Vorflut erfolgt nach Festlegung durch die zuständige untere Wasserbehörde über den Prüfwert für unpolare STV (10er-Liste) mit  $< 5 \mu\text{g/l}$  in der Summe. Es wird darauf verwiesen, dass der Prüfwert in der Regel deutlich unterschritten wird.

Zur Überwachung der polaren STV wurde folgende Verfahrensweise gewählt: Liegen die Analysenwerte der polaren Anteile in zwei im Abstand von einer Woche aufeinander folgenden Messungen oberhalb der Nachweisgrenze, ist hinsichtlich der Gewährleistung einer optimalen Wasseraufbereitung ein Wechsel der Aktivkohle erforderlich.

Die Aufbereitung der mit STV belasteten Wässer erfolgt nach Enteisenung/Entmanganung und Entfernung von Trübstoffen (Fällung/Flockung, Mehrschichtfiltration) über Aktivkohlefilter (Haupt-/Nachfilter).



**Abbildung 5: Fallbeispiel Hessisch Lichtenau – Verfahrensschema Wasseraufbereitungsanlage (Quelle: HIM, HMULV : Die Sanierung der ehemaligen Sprengstofffabrik Hessisch Lichtenau. Boden gut gemacht , Kapitel 5.6, 2013) [56]**

### 5.3.5 Standort mit Grundwasserbelastung - Sythen in Haltern Am See

Bei dem Standort „WASAG Sythen in Haltern Am See“ handelt es sich um eine Sprengstofffabrik aus dem Jahr 1898, die auf einer Fläche von 1.500 m<sup>2</sup> im Wald errichtet wurde. Die Munitionsproduktion begann im April 1898, im Zeitraum des Ersten Weltkrieges wurde im Rahmen der Produktion von Kriegsmunition ausgebaut. Zwischen den beiden Weltkriegen diente die Fabrik der Herstellung von Bergbau- und Gesteinssprengstoffen (Untertagesprengstoff auf der Grundlage von Sprengöl). Während des Zweiten Weltkrieges wurde die Produktion der Wehrmachtsmunition wieder gesteigert. Durch die Luftangriffe der Alliierten wurden Produktionsstätten zerstört und die Munitionsproduktion eingestellt. Aufgrund der Bergbaurelevanz der Region wurde die Produktion für Bergbausprengstoffe bereits wieder im August 1945 aufgenommen. Mit dem Rückgang und der Stilllegung von Zechen nach den 1960er Jahren ging auch die Nachfrage nach Bergbausprengstoffen zurück, so dass sich die Produktion am Standort stark reduzierte.

Neben den Ergebnissen aus der Anfrage an den zuständigen Wasserversorger und die zuständigen Umweltbehörden wurden auch Unterlagen aus der Internetrecherche und der mit den Maßnahmen betrauten Firmen in die Standortdarstellung einbezogen [33, 40-44, 57].

Hinsichtlich der Nachnutzung der ehemaligen Sprengstofffabrik ist die Entstehung der Wohnsiedlung Sythen-Lehmbraken in der direkten Umgebung zu sehen.

An verschiedenen Stellen des Werksgeländes sind sprengstofftypische Bodenbelastungen nachgewiesen worden, die sich bis ins Grundwasser ausgebreitet haben. Durch umfangreiche Boden- und Grundwasseruntersuchungen wurden bereits in den 1990er Jahren Belastungen sowohl des Grundwassers, auch weit außerhalb des Werksgeländes der WASAG, als auch im bebauten Bereich des Ortsteils Sythen-Lehmbraken ermittelt. Somit ist neben dem Schutzgut Boden auch das Schutzgut Grundwasser betroffen. Die aktuelle Trinkwasserförderung der Gelsenwasser AG ist nicht beeinträchtigt. Die Wasserentnahme befindet sich im Abstrom der Grundwasserkontamination in ausreichender Entfernung zum Ende der Schadstofffahne.

Die Grundwasserförderung auf dem Standort ist von der Historie her zu betrachten: Auf dem Gelände der WASAG Sythen wurde seit 1897 aus insgesamt 8 sukzessive in Betrieb genommenen Brunnen Brauchwasser und Trinkwasser gefördert.

Unmittelbar nach dem Nachweis von Belastungen durch Nitroaromaten im Brunnenwasser Ende der 1980er Jahre wurde die Wasserversorgung kurzzeitig über Aktivkohlefilter betrieben. Danach wurden alle Brunnen stillgelegt und durch einen Brunnen im Anstrombereich der Schadstofffahne ersetzt. Im Abstrom befinden sich zahlreiche Hausbrunnen. Die Nutzung dieses Wassers wurde per Allgemeinverfügung des Kreises Recklinghausen untersagt (vgl. auch Kap. 5.5 der Arbeitshilfe IA) [9]. Es erfolgte dadurch bereits 1999 und 2001 die Empfehlung, die private Grundwassernutzung zu unterlassen. In der Folgezeit wurden weitere umfangreiche Erkundungen auf dem Werksgelände selbst, im unmittelbaren Abstrom des Geländes und auch in den Ortsteilen Lehmbraken und Sythen durchgeführt. Zum Schutz der menschlichen Gesundheit vor Gefahren durch die Förderung und Nutzung des möglicherweise belasteten Grundwassers trat am 06. Januar 2010 ein Grundwassernutzungsverbot in Kraft. Der sich abzeichnende Anstieg der Grundwasserbelastung und die gleichzeitige Beobachtung, dass die Empfehlungen aus 2001 nicht beachtet wurden, machten eine solche Verfügung notwendig. Nach der abschließenden Ergebnisauswertung der Grundwasseruntersuchungen des Jahres 2012 wurde aus Vorsorgegründen das Verbotsgelände erweitert. Betroffen von dieser Erweiterung ist auch das Freizeitgelände im Norden (Freibad-Brunnen in Sythen). Bisher wurden dort keine sprengstofftypischen Verbindungen nachgewiesen, so dass die Freizeitnutzung unter der Bedingung regelmäßiger Nachweise der Schadstofffreiheit durch eine kontrollierte Grundwasserentnahme ermöglicht wurde.

Insbesondere im Bereich des ehemaligen Füllwerks zeigten sich weitläufige Bodenbelastungen. Durch die großräumige Verteilung des kontaminierten Gebäudeabbruchmaterials nach dem Ersten Weltkrieg und durch Schüttverluste während des Zweiten Weltkrieges wurden Kontaminationen in Bereichen der Versickerungsstellen und durch Austritte aus dem Kanalsystem verursacht. Die Bodenbelastungen wurden durch Sanierungsmaßnahmen wie Auskoffern und Offsite-Entsorgung behandelt. Weitere Maßnahmen, wie Sicherung durch Oberflächenabdichtung,

wurden so durchgeführt, dass eine weitere Auswaschung ins Grundwasser verhindert wurde bzw. wird.

Hinsichtlich der nachgewiesenen Grundwasserbelastung wird folgender Sachverhalt unterschieden bzw. ist von folgenden aufzubereitenden Wässern auszugehen:

**Tabelle 9: Fallbeispiel WASAG Sythen - Aufzubereitende Wässer, kategorisiert nach Entstehung der Belastung**

Aufzubereitendes Wasser	Parameter
"Wasser mit Belastungen hervorgerufen während des 1. Weltkriegs"	Dinitrobenzol Dinitronaphthalin Dinitrotoluol
"Wasser 2. Weltkrieg"	Trinitrotoluol vorrangig Hexogen (RDX) untergeordnet
"Mischwasser 1. Weltkrieg, 2. Weltkrieg"	Dinitrobenzol Trinitrotoluol Dinitronaphthalin Dinitrotoluol untergeordnet.

Die durchgeführten Grundwasseruntersuchungen bestätigten die STV-Kontaminationen im Bereich des Werksgeländes.

Weitere Untersuchungen aus dem Jahr 2009 belegen im Bereich des Ortsteils Sythen-Lehmbraken ein Ansteigen der STV-Konzentration im Grundwasser. Mit ca. 13.000 µg/l wurde der bis dahin höchste Wert ermittelt. Im Rahmen weiterer Grundwasseruntersuchungen in 2012 wurde die bisher höchste Belastung im Grundwasserabstrom (Bereich des Gebäudes 40) mit ca. 30.000 µg STV/l gemessen. Ebenfalls hohe Belastungen treten in weiteren Grundwasser-messstellen auf dem Werksgelände mit mehreren Tausend µg STV/l auf.

Um die räumliche Ausdehnung der Schadstofffahne und ihre mögliche weitere Ausbreitung bewerten zu können, wurden zahlreiche weitere Brunnen, unter anderem Tiefbrunnen bis zu über 100 Meter Tiefe, errichtet. In den Jahren 2010 bis 2012 wurden jeweils an über 60 Beprobungsstellen Grundwasserproben gewonnen und analysiert. Wie bereits ausgeführt, wurden aufgrund der resultierenden Erkenntnisse Nutzungseinschränkungen bzw. Verbote von Grundwasserförderungen erlassen. Daneben wurden weitere Erkundungsmaßnahmen zur Klärung des Ausbreitungsverhaltens der großen Schadstofffahne im Rahmen einer hydraulischen Modellierung durch erste Versuche zur In-situ-Behandlung und hydraulische Sicherungen von kleineren Schadstofffahnen durchgeführt.

In Bezug auf die Wasseraufbereitung haben sich folgende Aspekte gezeigt: Nach Einsetzen der Maßnahme geht die Belastung nach anfänglich hohen Werten sehr schnell auf geringe Konzentrationen zurück, die sich dann nach einer Abpumpzeit von drei Monaten auf in etwa konstante Werte einpegeln. Lediglich nach Pumpenstillstand, z. B. durch Wartungsarbeiten, kommt es zu einem signifikanten Wiederanstieg der Gehalte. Nach sehr kurzer Zeit reduzieren sich die höheren Werte wieder.

Für die hydraulischen Sicherungsmaßnahmen gilt daher, ein Behandlungsverfahren zu entwickeln, das große Wassermengen mit vergleichsweise geringen Belastungen kostengünstig aufbereitet. Die Wasseraufbereitung durch Aktivkohle ist Stand der Technik. Untersuchungen vor Ort haben jedoch gezeigt, dass der Durchbruch von polaren Abbaustoffen, z. B. der Dinitrobenzoesäure sehr frühzeitig erfolgt. Trotz örtlich vergleichsweise sehr geringer natürlicher Störstoffe, ablesbar an geringen DOC-Werten, ist das Verfahren von geringer Wirtschaftlichkeit. Es wurden daher Untersuchungen durchgeführt, langfristig wirtschaftlich zu betreibende Verfahren zu entwickeln.

Überlegungen zur Behandlung von belastetem Grundwasser im Gebiet gingen Erkundungen voraus, die in Laborversuchen entsprechend getestet wurden:

Durch zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen wurde gezeigt, dass eine vollständige chemische Oxidation sprengstofftypischer Verbindungen prinzipiell möglich ist. Folgende Oxidationsmittel wurden in Laborversuchen getestet:

- Ozon (O<sub>3</sub>)
- Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)
- FENTONs-Reagenz: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mit Fe(II)
- Varianten der FENTON-Reaktion
- Calciumperoxid (CaO<sub>2</sub>)

Im Rahmen von Pumpversuchen vor Ort (Feldversuche) fielen Wassermengen bis jeweils ca. 100 m<sup>3</sup> an, die in einem Feuerlöschteich zwischengespeichert wurden. Diese sich aus praktischen Überlegungen ergebende Versuchsanordnung wurde im Hinblick auf einen photolytischen Abbau als Großversuch vor Ort ausgewertet.

Zunächst wurde Wasser untersucht, das nahezu ausschließlich durch TNT belastet war. Bis zum vollständigen Abbau des TNTs und dessen im Grundwasser vorhandener Metabolite, wie die Aminodinitrotoluole, wurde ein Zeitraum von etwa 2 Monaten angesetzt. Die polaren Zwischenabbauprodukte, wie die Aminodinitrobenzoesäuren, konnten noch bis 5 Monate danach nachgewiesen werden.

In drei weiteren „statischen“ Versuchen wurde der photolytische Abbau von jeweils 100 m<sup>3</sup> Wasser in einem Aufbereitungsbecken untersucht. Dazu wurde ein Mischwasser mit Belastungen aus DNB, Dinitronaphthalin (DNN), DNT und untergeordnet TNT verwendet. Es wurden 3 unterschiedliche Versuchsanordnungen gewählt:

- Versuch mit einer Schlammschicht am Grund des Aufbereitungsbeckens als Resultat des Laubfalls im vorausgegangenen Herbst,
- Versuche im gereinigten Aufbereitungsbecken ohne Schlamm,
- Versuche im gereinigten Aufbereitungsbecken ohne Schlamm und unter ständiger Wasserbewegung durch einen Belüfter.

Der vollständige Abbau der Nitroaromaten erfolgte in einem Zeitraum von mehreren Wochen, die besten Ergebnisse eines Abbaus wurden bei kontinuierlicher Wasserbewegung in etwa 2 Wochen erzielt.

Aus den Ergebnissen der Vorversuche wurde ein Aufbereitungsbecken mit einem Vorbecken entwickelt, in das der Wasserbelüfter zur Erzeugung von Zirkulationsströmungen eingebracht wurde und einem Hauptbecken, in dem sich die Wasserbewegung wieder beruhigen kann. Das Becken wird kontinuierlich durchströmt, wobei die Durchströmung variabel gehalten ist und die Aufenthaltszeit zwischen 20 und 200 Stunden beträgt. Die Versuche dauern noch an. Es werden Reinigungsgrade bis 50 % erzielt.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Laborversuche wurde vorerst eine On-site-Anlage zur Ozonierung des geförderten Wassers im Technikumsmaßstab installiert. Sie ist für eine Aufbereitung von maximal etwa 4 m<sup>3</sup> Wasser pro Stunde ausgelegt. Mit dieser Aufbereitungsanlage wird ein Versuchsbetrieb gefahren, bei dem unterschiedlich belastete Wässer in unterschiedlichen Verdünnungsstufen unter variablen Randbedingungen untersucht werden. Die aus den Vorversuchen favorisierte Technik des In-situ-Ozoneintrags wird zur Anwendung kommen. Bislang wurde Grundwasser mit vorrangiger Dinitrobenzol- und Dinitronaphthalinbelastung behandelt. Die Ergebnisse des ersten Technikeinsatzes ergeben Reinigungsgrade bis 70 %. [57].

### 5.3.6 Standort mit Grundwasserbelastung und Behandlung mittels chemischer Oxidation – Leverkusen-Schlebusch

Der in diesem Beispiel dargestellte Standort in Leverkusen-Schlebusch war als Sprengstofffabrik mit einer Fläche von ca. 80 ha von 1887 bis 1926 in Nutzung.

Im Jahr 1887 nahm das Werk im Gebiet der heutigen Waldsiedlung unter der Firmierung Schmidt & Bichel die Produktion auf. Die vor allem auf Wetter-Sprengstoffe für den Untertagebau ausgerichtete Firma nannte sich ab 1890 „Sprengstoff-Aktiengesellschaft Carbonit“. Während des Ersten Weltkrieges stand die Rüstungsfertigung im Vordergrund, in den letzten Kriegsjahren wurden allein ca. 600 Tonnen TNT im Monat produziert. Im Jahr 1926 wurde nach einer schweren Explosion der Betrieb eingestellt und die Werksanlagen in den Folgejahren abgebrochen. Im Rahmen der Umnutzung des Standortes entstand ab Mitte der dreißiger Jahre auf dem Gelände eine Wohnsiedlung.

Neben den Ergebnissen aus der Anfrage an die Wasserversorgungsbetriebe und die städtische Umweltbehörde wurden im Internet verfügbare Unterlagen in die Standortrecherche einbezogen [45-47].

Im Rahmen der Altlastenuntersuchungen wurden in den neunziger Jahren die ersten Erkundungen durchgeführt:

- Erstbewertung im Jahr 1990
- Gefährdungsabschätzung 1992
- Sanierungsuntersuchung 1993-1997
- Sanierungsplanungen mit Umsetzung 1998-2001

Die Untersuchungen zeigen eine Betroffenheit der Schutzgüter Boden und Grundwasser auf dem Standort auf. Das nächstgelegene Wasserschutzgebiet - Wasserwerk in Leverkusen-Rheindorf - liegt nordwestlich des Rüstungsalstandortes. Das entsprechende Einzugsgebiet ist auf Grund seiner Entfernung nicht betroffen. Anfang des 20-sten Jahrhunderts wurde u.a. auf Grund der auffälligen Färbung des Wassers das damals für die Gemeinde Schlebusch genutzte ehemalige Wasserwerk „Im Kunstfeld“ - auf Kölner Stadtgebiet - außer Betrieb genommen.

Die phasenweise Sanierung von belasteten Grundstücksflächen wurde im Jahr 1997 geplant und anschließend begonnen. Zwischenzeitlich wurden durch die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) aktuelle Bodenorientierungswerte bzw. Prüfwertvorschläge Boden auch für die Gruppe der Nitroaromaten entwickelt. Unter Berücksichtigung der Überarbeitung sind aktuell folgende Werte für die Waldsiedlung maßgeblich [46].

**Tabelle 10: Fallbeispiel Carbonit AG Leverkusen - Auflistung der Prüfparameter und Prüfwerte (Informationen aus den Antworten zum Fragebogen der Stadtverwaltung Leverkusen)**

Nitroaromaten-Parameter	Prüfwertvorschläge Boden [mg/kg]	Sonstige Parameter	Prüfwertvorschläge Boden [mg/kg]
2-Nitrotoluol	0,4	Arsen	50
2,4-Dinitrotoluol	6	Blei	400
2,6-Dinitrotoluol	0,4	Quecksilber.	20
2,4,6-Trinitrotoluol	40	Benz(a)pyren	4
1,3-Dinitrobenzol.	30		
2-Amino-4,6-Dinitrotoluol	40		
4-Amino-2,6-Dinitrotoluol	40		

Auf der Grundlage der festgestellten Ergebnisse erfolgte eine Bodensanierung auf einzelnen Grundstücken im Oberbodenbereich nach der folgenden Vorgehensweise:

- Räumen der Sanierungsflächen auf den jeweiligen Grundstücken
- Aushub, Separation makroskopisch sichtbarer TNT-Anteile über Förderbänder, Abtransport des verunreinigten Bodenaushubs (bis zu 1m tief)

- Einbau von Füllboden und kulturfähigem Oberboden
- landschaftsgärtnerische Wiederherstellung
- Entsorgung der Wurzelstubben und des verunreinigten Bodenaushubs

Die Gesamtsanierung umfasst einen Bodenaushub mit schädlichen Verunreinigungen von ca. 14.000 t und separierten Nitroaromaten von ca. 500 kg auf einer Fläche von ca. 12.000 m<sup>2</sup>.

Neben den Bodenbelastungen wurden auch erhebliche Kontaminationen des Grundwassers ermittelt, was zu einem Grundwassernutzungsverbot für die Waldsiedlung über eine Allgemeinverfügung (veröffentlicht am 12./13.4.1990) geführt hatte [45].

Für die Erkundung und Bewertung der Grundwasserbelastung auf dem Altstandort Carbonit AG wurden im Laufe der Jahre insgesamt rd. 60 Grundwassermessstellen (GWMS) eingerichtet, für die z.T. über einen Zeitraum von rd. 20 Jahren Analysenwerte vorliegen. Die Grundwassermessstellen der Waldsiedlung liegen überwiegend im ersten Grundwasserstockwerk bei, in Abhängigkeit der örtlichen Lage, variierendem Grundwasserflurabstand von ca. 5 - 12 m. Ferner ist an 3 GWMS das zweite Grundwasserstockwerk bis in Tiefen von ca. 50 m erschlossen.

Als Belastungsschwerpunkte wurden ermittelt:

- Bereich und Umfeld der ehem. TNT-Waschhäuser
- Ehem. TNT-Produktionsbereich
- Bereich der ehem. Ammonsalpeterproduktion
- Ehem. Abwasserteiche

Zur Erkundung und Bewertung der Grundwasserbelastung im Bereich Waldsiedlung wurden und werden nachfolgende Parameter geprüft:

**Tabelle 11: Fallbeispiel Carbonit AG Leverkusen - Analyseparameter zur Erkundung und Bewertung der Grundwasserbelastung im Bereich der Waldsiedlung Leverkusen-Schlebusch (Informationen aus den Antworten zum Fragebogen der Stadtverwaltung Leverkusen)**

Nitroaromaten, unpolare (standardmäßig untersuchte Parameter)	Nitroaromaten, polare: (im Zusammenhang mit der Sanierungsuntersuchung/-planung untersuchte Parameter)	im Sonderfall untersuchte Parameter
2-Nitrotoluol; 3-Nitrotoluol; 4-Nitrotoluol; 2,4-Dinitrotoluol; 2,6-Dinitrotoluol; 2,3-Dinitrotoluol; 3,4-Dinitrotoluol; 2,4,6-Trinitrotoluol; 4-Amino-2,6-Dinitrotoluol; 2-Amino-4,6-Dinitrotoluol; 2-Amino-6-Nitrotoluol; 2-Amino-4-Nitrotoluol; Nitrobenzol; 1,2-Dinitrobenzol; 1,3-Dinitrobenzol; 1,4-Dinitrobenzol; 1,3,5-Trinitrobenzol;	2-Nitrobenzoesäure; 3-Nitrobenzoesäure; 4-Nitrobenzoesäure; 2,4-Dinitrobenzoesäure; 2,4,6-Trinitrobenzoesäure; 2-Amino-4,6-dinitrobenzoesäure; 4-Amino-2,6-dinitrobenzoesäure; 2,4-Dinitrotoluol-3-sulfonsäure; 2,4-Dinitrotoluol-5-sulfonsäure; 2,4-Dinitrophenol; 3,5-Dinitrophenol; 2,4,6-Trinitrophenol;	2,4,6-Trinitrobenzylalkohol; 4-Amino-2,6-Dinitrobenzylalkohol; 2,6-Dinitrobenzoesäure;

Die Bodensanierung wurde Ende der 1990er Jahre begonnen und im Jahr 2001 abgeschlos-  
sen. Zur Gefahrenabwehr erfolgte auf sanierungsbedürftigen Grundstücken (Wirkungspfad Bo-  
den-Mensch) ein Bodenaustausch bis max. 1,0 m Tiefe. Eine Grundwassersanierung ist in Pla-  
nung.

### **5.3.7 Standort mit Boden- und Grundwasserbelastungen sowie Sicherungselemen- ten der hydraulischen Sicherung: - Standort Stadtallendorf**

Im Jahr 1941 wurde die Sprengstofffabrik „Ehemalige Sprengstofffabriken DAG, WASAG Stadt-  
allendorf Hessen“ mit einer Fläche von ca. 600 ha in Betrieb genommen. Bis zur Aufgabe der  
Produktion am 28. März 1945 wurden ca. 130.000 t Roh-TNT produziert und für Bomben und  
Granaten verarbeitet. Im Werk „Allendorf“ der DAG mit insgesamt 430 massiven Produktions-  
gebäuden existierten zwei Granaten- und drei Bombenfüllstellen. Die bei der Produktion anfal-  
lende Abfallsäure wurde in Säureaufbereitungs- und Denitrationsanlagen aufbereitet, die Neu-  
realisationsschlämme wurden auf der sog. TRI-Halde deponiert. Zur Brauchwassergewinnung  
waren im Werk 33 Tiefbrunnen abgeteuft worden. Im Werk „Herrenwald“ der WASAG wurden  
ca. 6.000 t Marinesprengstoff produziert und dort u.a. in Minen verfüllt. Nach dem Zweiten Welt-  
krieg wurde das Werk „Allendorf“ als Munitionssammelstelle genutzt, in der im Zeitraum von  
1947-1949 ca. 20.000 t Munition im Auftrag der Alliierten delaboriert bzw. gesprengt wurden  
[58].

Die Nachnutzung des Geländes erfolgte im Jahr 1946 mit dem Beginn der Demontage der Fab-  
rik, anschließend folgte die Umnutzung für eine zivil- gewerbliche Nutzung bzw. ab 1949 zu  
Wohnzwecken. Im Jahr 1955 wurden auf dem Gelände die Wasserwerke 1 und 2 in Betrieb  
genommen.

Die Ergebnisse aus der Internetrecherche und veröffentlichte Unterlagen gemäß den Hinweisen  
der Umweltbehörden wurden in die Standortbeschreibungen einbezogen [10, 37-39, 50, 59-64].

Die ersten Belastungen der Schutzgüter Boden und Wasser (Oberflächen-, Grund-, Sicker- und  
Abwasser) durch STV wurden bereits frühzeitig festgestellt.

Das Gefahrenpotential der TRI-Halde wurde erkannt, so dass Maßnahmen zur Gefahrenminde-  
rung eingeleitet wurden. Im Jahr 1954 wurde die TRI-Halde erstmalig abgedeckt und 1970 mit  
einer zweiten Abdeckung versehen. 1979 wurden die Brunnen ASB1 und 2 (u.a. ASB1 bei der  
späteren hydraulischen Sicherung im Bereich der TRI-Halde) erbaut und das Wasserwerk  
Stadtallendorf mit einer Aktivkohlefilteranlage ausgerüstet. Im Oktober 1984 wurde die Anlage  
mit Aktivkohlefiltern für die TRI-Halde eingerichtet und betrieben.

Folgende Maßnahmen zur Gefahrenabwehr wurden seit 1986 durchgeführt:

Ab 1986 wurde die Begutachtung des Standortes im Rahmen einer Gefährdungsabschätzung  
eingeleitet; im Jahr 1990 erfolgte die weitere systematische Erkundung im Rahmen der Altlas-  
tenbearbeitung. Im Zeitraum 1990 - 1994 wurde das F+E-Vorhaben MOSAL Teil 1 realisiert  
(MOSAL: Modellhafte Sanierung von Altlasten am Beispiel des TNT-Sanierungsprojektes  
Stadtallendorf/Hessen; [62]). Im März 1995 lag eine Sanierungskonzeption (mit der HIM-ASG  
als Sanierer – ausführende Stelle und des Regierungspräsidiums Gießen als der Genehmi-  
gungs- und Aufsichtsbehörde) mit festgelegten Sanierungszielwerten vor und die Sanierungs-  
/Sicherungsmaßnahmen wie Inbetriebnahme der hydraulischen Sicherung Wasserwerk III, Bio-  
monitoring, Kanalerkundung begannen. Von September 1996 bis Juli 1997 wurde eine Testflä-  
che saniert, darauf folgten die konkreten Maßnahmen - Thermische Bodenbehandlung und  
Kanalstilllegung - am DAG-Standort. Ab 2000 wurden Teilflächensanierungen u.a. im Bereich  
Sprengstoffbunker, verschiedener Flächen wie im Waldbereich nahe Südschule, Pumpstation  
Kirchhain, Münchbach/TRI-Graben eingeleitet. Im Jahr 2009 wurde das F+E-Vorhaben  
MONASTA abgeschlossen (MONASTA: Monitored Natural Attenuation Stadtallendorf; [61]). Als  
Ziel des F+E-Vorhabens wurde unter Einbeziehung eines numerischen Stofftransportmodells  
die Aufstellung einer Gesamtbilanz der Schadstoffe in Boden und Grundwasser ermittelt und  
Kriterien für den weiteren Umgang mit der Sicherung der Trinkwassergewinnung aufgestellt.

Ziel des Forschungsvorhabens war es weiterhin, die Auswirkungen der verbleibenden Stoffe auf das Grundwasser und auf die Trinkwassergewinnung im Festgestein (Buntsandstein) zu untersuchen. Im Einzelnen wurden folgende Aufgaben definiert:

- Beschreibung der Reaktions- und Transportbedingungen ausgewählter sprengstofftypischer Verbindungen und Metabolite im Hinblick auf die Bestimmung eines Selbstreinigungspotenzials im Festgesteinsgrundwasser
- Prognose der Schadstoffausbreitung mittels eines reaktiven Transportmodells: Hierzu ist die Ermittlung von Feldparametern im Grundwasser sowie die Quantifizierung von Transformations- und Transportverhalten im Grundwasser erforderlich
- Entwicklung von Lösungsansätzen zum Umgang mit kontaminierten Bereichen außerhalb der hydraulisch gesicherten Bereiche
- Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Fortführung der hydraulischen Sicherung

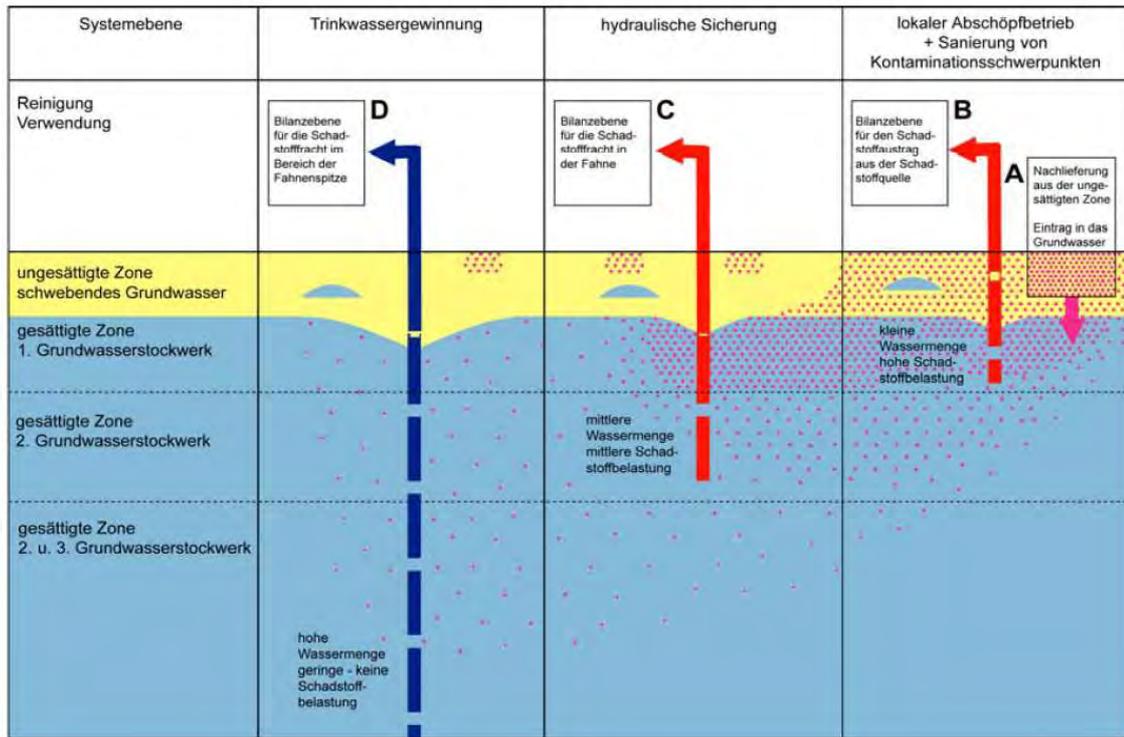
Eine wesentliche Fragestellung im Rahmen des F+E-Vorhabens war, bis zu welchem Punkt es sinnvoll und notwendig ist, die hydraulischen Sicherungsmaßnahmen am Standort zu betreiben. Hierzu wurden neben der Bewertung von natürlichen Selbstreinigungsprozessen die Gefährdungssituation sowie ökobilanzielle und administrative Kriterien herangezogen.

Die Bodensanierung wurde auf einer Testfläche im Jahr 1996 begonnen und bis 2005 auf verschiedenen Teilflächen fortgesetzt. Nach deren Abschluss erfolgte eine hydraulische Sicherung derart, dass ein Zustrom von belastetem Grundwasser zu den Trinkwasserförderbrunnen verhindert wurde (vgl. folgendes Schema aus Leitfaden KORA-Themenverbund 5 – Teil D3 – Seite 170 – Abb. 62; [10]).

Im Bereich der lokalen Belastungsschwerpunkte, wie der TRI-Halde, wurden entsprechende Sicherungsbrunnen angelegt. Weiterhin wurden im 2. Hauptgrundwasserstockwerk 5 Sicherungsbrunnen mit Förderraten zwischen 5 und 15 m<sup>3</sup>/h betrieben. Diese dienen zur Verhinderung des Abstroms von belastetem Grundwasser in Richtung der betriebenen Trinkwasserförderbrunnen. Zusammengefasst sieht die hydraulische Sicherung den dauerhaften Betrieb von fünf Brunnen sowie die Förderung der lokalen Belastung der TRI-Halde mit vier Brunnen vor. Zusätzlich wird über eine Tiefendränage im Abstrom über weitere sechs Brunnen sowie an einem Sickerwasserschacht der oberflächennahe Abfluss der TRI-Halde erfasst.

Die TRI-Halde stellte mit ca. 80.000 t abgelagertem Material den Sanierungsschwerpunkt dar. Ab 1995 wurde ein, im Ergebnis einer Machbarkeitsstudie entwickeltes, Konzept umgesetzt, welches den Abtrag der Halde im Schutz einer dichten Halle mit Fassung und Reinigung der Hallenluft und Konditionierung der Schlämme zur Verbesserung der Transporteigenschaften vorsah. Der Abschluss der Maßnahme erfolgte Ende des Jahres 2006.

Im Jahr 2010 wurde ein Konzept zur Fortführung der Sanierung umgesetzt: Im Rahmen eines Großversickerungsversuchs wurde die Gasdrainage der Halde genutzt, um Wasser einzuspeisen und die Lösung der Schadstoffe voranzutreiben. Im Jahr 2012 erfolgten die vorbereitenden Arbeiten zur Sanierung der Hot-Spots im Bereich der Halde. Es wurden sowohl Injektionslanzen als auch Saugkerzen eingesetzt, über die das Wasser in den kontaminierten Bereich eingebracht wird. Mit dem erfolgreichen Testversuch war für 2013 eine kontinuierliche Spülung zur Effektivierung der hydraulischen Sicherung an der TRI-Halde geplant.



**Abbildung 6: Fallbeispiel WASAG Stadtallendorf - Sicherungselemente der hydraulischen Sicherung und Bilanzenebenen am Standort Stadtallendorf (aus Leitfaden KORA D3.5 – Abb. 62) [10]**

Eine weitere Möglichkeit zur Sanierung STV-belasteten Grundwassers (hier: MNT-Abbau in der Kleinniederung) stellt ein Testverfahren mit Alkoholspülung dar (vgl. auch Leitfaden KORA D3.5 [10]). Die Laborversuche mit einer Ethanollösung zeigen eine Austragsrate mit einem stark erhöhten Faktor (10 gegenüber Wasser). Die Umsetzung des Verfahrens verspricht die Möglichkeit eines relevanten Einsparpotentials und einer zeitlichen Verkürzung des Monitorings.

Eine Veröffentlichung in 2013 verweist darauf, dass nach der Entwicklungsphase und den Pilotversuchen das Verfahren optimiert wurde und zur sicheren Handhabung bei Quellsanierungen geführt hat. Als Fazit wurde hierbei festgehalten, dass im Falle eines Quellgebietes mit leicht löslichen Schadstoffen, die nicht als eigenständige Phase getrennt vom Grundwasser mobilisierbar waren, eine In-situ-Wäsche mittels Alkohol getestet wurde, die zur Eliminierung der Schadstoffe aus dem Grundwasser führte. Die Alkohol-Waschtechnologie wurde damit als eine zeit- und kostensparende Ergänzung zu bestehenden „Pump and Treat“-Verfahren oder zur Tensidwäsche vorgestellt [65].

Durch Untersuchungen, die von Dr. Jim Spain an der GATECH (Georgia Institute of Technology, Atlanta USA) durchgeführt wurden, sollte geklärt werden, ob NA-Prozesse der Mononitrotoluole (MNT) am Standort Kleinniederung in Stadtallendorf stattfinden und wie weit diese durch einen produktiven mikrobiellen Abbau erklärt werden können.

Im Ergebnis wurde ein MNT-Abbau in 4 Proben dieses Standortes nachgewiesen, sofern es sich um frische Boden- oder Grundwasserproben handelte. An Proben, die über ein Jahr bei 4°C gelagert wurden, fehlte z. T. Aktivität, die aber durch Beimpfen mit aktivem Material wieder hergestellt werden konnte.

Bodenproben, in denen weder durch Beimpfen noch durch Nährstoffzugabe Abbauaktivität gemessen werden konnte, stammten aus hoch kontaminierten Arealen, die möglicherweise zusätzliche toxische Kontaminanten enthielten.

Die mit Hilfe von  $^{14}\text{C}$ -Markierung gewonnenen Ergebnisse belegen eindeutig, dass innerhalb der Kontaminationsfahne Mikroorganismen indigen und ubiquitär vorhanden sind, die MNT vollständig abbauen (mineralisieren). Offensichtlich ist NA innerhalb der Fahne aktiv, solange nicht-toxische Konzentrationen ( $\leq 1 \text{ mg/l}$ ) vorliegen und Sauerstoffmangel den Abbau nicht limitiert.

Die vorliegenden Ergebnisse erlauben jedoch keine Aussage zur In-situ-Abbauaktivität. Zweifelsohne gibt es die abbauaktiven Mikroorganismen vor Ort, der sichere Nachweis eines MNT-Abbaus vor Ort erfordert eine weitergehende Charakterisierung des Standortes und Modellbetrachtungen.

Eine Methode zur exakten Quantifizierung der 2-NT-Biodegradation in-situ bietet die  $^{15}\text{N}$  Isotopenfraktionierung, die gegenwärtig am Nitrobenzol im Labor von Dr. Jim Spain angewendet wird. Ebenso wird mittels Analyse des Fraktionierungsmusters der Abbau von 2 NT an wachsenden Reinkulturen mit dem Ziel untersucht, die Ergebnisse direkt am Feldversuch zu erproben.

Eine MNT-abbauende Mischkultur mit besonders hoher Abbauaktivität konnte von der Oberfläche eines GAC-Filters der Grundwasserbehandlungsanlage gewonnen werden. Diese könnten als Bioreaktoren für die Behandlung von MNT-kontaminierten Wässern dienen. Außerdem kann die von der GAC gewonnene Biomasse als Inokulum für Bioaugmentationen im Rahmen von ENA-Maßnahmen (ENA – Enhanced Natural Attenuation) eingesetzt werden.

### 5.3.8 Zusammenfassende Darstellung der Fallbeispiele

STV-belastete Wässer können in verschiedener Form anfallen, wie aus den ausgewählten Fallbeispielen abgeleitet werden kann. Belastungen im Trinkwasserbereich für aktuell bestehende Wasserentnahmeanlagen zeigte die Auswertung der beantworteten Fragebögen relativ selten.

Brunnen mit festgestellten Belastungen wurden im Schadensfall umgebunden und somit nicht mehr weiter genutzt. Im Zeitraum, in dem eine alternative Wasserversorgung gewährleistet werden musste, wurde das Rohwasser über Aktivkohle behandelt.

Die vorgestellten Sanierungsmaßnahmen von STV-belastetem Wasser betreffen Grundwasser, Schichtwasser, Sickerwasser bzw. Abwasser sowie Oberflächenwasser in Abwasserteichen. Obwohl es sich bei den Standorten größtenteils um vergleichbare Sprengstofffabriken handelt, begründen Historie, Zeitraum und Intensität der Nutzung und besondere Ereignisse wie Unfälle, Explosionen oder Bombardierungen ein sehr unterschiedliches Vorgehen. Einzelfallbezogen wurden geeignete Dekontaminationsmaßnahmen der jeweiligen Standortsituation angepasst.

Die nachfolgenden Tabellen 12 und 13 geben einen zusammenfassenden Überblick über die Schadenssituation, die betroffenen Medien, die technischen Verfahren zur Sanierung einschließlich des aktuellen Stadiums ihrer Umsetzung mit Bezug auf die beispielhaft vorgestellten Rüstungsstandorte sowie ohne Standortbezug.

**Tabelle 12: Zusammenfassende Darstellung der Fallbeispiele - Schadenssituation und Sanierungsverfahren mit Standortbezug**

lfd	Bundesland	Standort	Medium	Technische Idee	Stadium	Leitparameter	Bemerkung
1	Bayern	Geretsried	GW?				GW-Belastung vermutet, GW-Erkundungen noch nicht abgeschlossen
2	Hessen	RU Hirschhagen bei Hessisch Lichtenau	GW	A-Kohlefilter mit Enteisung/Entmanganung	Anlage	STV	Vor Aktivkohle vorgeschaltet Enteisung/Entmanganung und Entfernung von Trübstoffen (Fällung/Flokkung, Mehrschichtfiltration)
3		Stadtallendorf	GW	Hydraulische Sicherung	Anlage	STV	
		Stadtallendorf Kleinniederung	GW	Waschverfahren Infiltration mit Alkohol	FuE, Pilotversuch im Testfeld	MNT	
4	Niedersachsen	Clausthal-Zellerfeld	SW	A-Kohlefilter	Anlage	STV	
		Clausthal-Zellerfeld	SW	Fe-Reduktion, Humifizierung, A-Kohle	Technikum, Pilotmaßstab	STV	
		Clausthal-Zellerfeld	SW	Pflanzenklärung, Reduktion, biolog. Transformation	Technikum, Pilotmaßstab	STV	Pflanzenkläranlage (Constructed Wetlands)
5		Nordostbereich TUP Munster	GW	Grundwassersanierungsanlage - GSA Munster	Mehrstufige Anlage	u.a. STV	Seit Ende der 90er Jahre im Betrieb
6		Luft/ Bodenschuttplatz Nordhorn-Ränge	GW			STV - Hexogen	Bislang noch keine aktiven Sanierungsmaßnahmen zur Reinigung des GW eingeleitet
7		Rüstungsstandort Herzberg am Harz	Abw. (SW)			STV	Sanierung des durch Abwässer belasteten Mühlengraben durch Bodenaushub, Sickerwasserbelastung noch nicht abschließend geklärt
8	Nordrhein-Westfalen	Carbonit Schlebusch Leverkusen Waldsiedlung	GW	Ozonierung, UV-Licht	Labor- und Pilotversuche mit Standortwasser	Polare u. unpolare STV	
9		WASAG Sythen in Haltern Am See	GW	Ozonierung	Technikum im Versuch	STV	Ergebnis des ersten Technikeinsatzes 70% Reinigungsgrad
10	Rheinland-Pfalz	Espargit Hallschlag	SW	A-Kohle für Sickerwasser	Anlage	STV	Keine Belastung bekannt Standort liegt an Wasserscheide Einzugsgebiet WW NRW und RLP
11	Saarland	Saarwellingen	--				Keine Belastung bekannt
12	Sachsen	WASAG Eilsnig	GW	Aktivkohle-Adsorbern	Anlage	Eilsnig-Liste	
13	Sachsen-Anhalt	Sprengstoffwerk Schönebeck					Sanierungen durch Bodenaustausch (u.a. auch des Tabulagers)
14	Schleswig-Holstein	DWM/MfM Lübeck Schlutup	SW			Hexogen	Weitere Gefährdungsmaßnahmen sind im Gange, u.a. auch für GW

**Tabelle 13: Zusammenfassende Darstellung der Fallbeispiele - Schadenssituation und Sanierungsverfahren ohne Standortbezug**

lfd	Bundesland	Standort	Medium	Technische Idee	Stadium	Leitparameter	Bemerkung
15		Ohne Standortbezug	GW, OW	A-Kohle Regeneration von Faseraktivkohle (ACF) als Adsorber	FuE	TNT	Abschlussbericht F 03 B 1118 02WA006
16			SW	A-Kohle (u.a. mit Rigolensystem)	Im Einsatz	TNT	Im Einsatz an mehreren Standorten
17			GW	Adsorption an RGS-Polymeren	Labor		(Zimmermann 2007)
18			GW, SW	Reinigung mit Pilzen	Technikum	Hexogen, Hexyl	Patent DE19707883C2
19			OW	Photochemische Transformation (UV-Licht)	Labor	TNT, TNB, ADNT, 246TNBS	(Herrmann 2008)
20			SW	Elektrochemische Oxidation	FuE	Nitro- und Aminonitroaromate	(Renwanz 2002)
21			SW, OW, AW	Pflanzenkläranlage (Constructed Wetlands)	Pilotversuche	STV	(Hoffman 2002, Diss.)
22			GW	Alkohol-Waschverfahren (In-Situ)	Pilotversuche	Leicht lösliche Schadstoffe	Vortrag Dresdener Grundwassertage 2013 (Dr. Tränkle u.a.)
23			GW	Oxidation durch Ozon -Mit molekularem Ozon -Radikalisch determinierte	Labor/Pilotversuche	-Nitrierte Aminoverb. -STV wie TNT, DTN	Vortrag Dresdener Grundwassertage 2013 (Dr. Entemann u.a.)

Die Dekontamination auf der Grundlage von Filterbetten aus Aktivkohle gehört zu den Adsorptionsverfahren, die sich bereits für die Sanierung von STV-Kontaminationen bewährt haben. Die Erzielung schneller Sanierungserfolge ermöglicht eine Weiternutzung von Wassergewinnungsanlagen, die bis zur Nutzung durch Alternativstandorte gewährleistet sein muss.

Zu den Dekontaminationsverfahren zählt auch die Sanierung von Nitroaromaten durch den Einsatz von nullwertigem Eisen, Huminstoff und Aktivkohle. Es werden bekannte Ab- bzw. Umbaumechanismen genutzt, die dazu führen, dass eine nahezu vollständige Bindung der Umsetzungsprodukte an Huminstoffe und/ oder Aktivkohle stattfindet.

Die Pflanzenklärung ist eine biologische Behandlung von mit Nitroaromaten belastetem Wasser und basiert auf mikrobiologischen Transformationsprozessen. Im sogenannten „Wetland“ werden durch Zugabe leicht abbaubarer Kohlenstoffverbindungen optimale reduzierende Bedingungen eingestellt, um die cometabolische Transformation der Nitroverbindungen zu ermöglichen. Ein „Constructed Wetland“ besteht aus einem Rückhaltebecken mit bepflanzten Substratfiltern, die in Erdbauweise mit Kunststoffdichtung errichtet werden. Bei einem vorgegebenen natürlichen Geländegefälle ist die Wasserzu- und Wasserableitung des „Constructed Wetland“ im freien Gefälle ohne zusätzliche Energiezugabe möglich (vgl. hier die Wasserbehandlung auf dem Standort in Clausthal-Zellerfeld).

Ozonierung (vgl. Maßnahmen auf dem Standort WASAG Sythen [52]) und Einsatz von UV-Licht werden in der Grundwasseraufbereitung neben der Eisen-, Mangan-, Cyanid- und Nitrit-Oxidation auch verstärkt zur Entfernung von organischen Wasserinhaltsstoffen eingesetzt. Es handelt sich meist um radikalische Reaktionen, deren Initiierung durch UV-Licht verstärkt wird. Oxidationsverfahren stellen insbesondere bei biologisch schlecht abbaubaren Substanzen, die sich durch andere Wasseraufbereitungstechniken nicht abscheiden lassen, eine gute Alternative dar.

Die hydraulische Sicherung (vgl. Standort in Stadtallendorf) wird mehrfach zum Schutz der Trinkwassergewinnung bzw. sensiblen Flächen wie im Bereich von Wohngebieten genutzt. Dazu werden an lokalen Belastungsschwerpunkten Sicherungsbrunnen mit gezielten Förderraten betrieben. Das gefasste kontaminierte Wasser wird über eine Wasseraufbereitungsanlage gereinigt und kann unter festzulegenden Voraussetzungen wieder versickert bzw. eingeleitet werden [66].

Die In-situ-Mobilisierung mit Alkohol (vgl. u.a. Versuche und Versuchsanlagen in Stadtallendorf) ist als Waschverfahren zur Lösung der residualen Mononitrotoluol-Phase auf einem Versuchsfeld eingerichtet worden. Ethanol wird über Rigolen und Lanzen in den Boden eingebracht. Die residuale Mononitrotoluol-Phase wird gelöst. Im Bereich der Eintragsstelle wird das Wasser-Alkohol-Schadstoff-Gemisch gehoben und in einem Bioreaktor mit nachgeschalteter Aktivkohlereinigung behandelt. Diese Reinigung wird mit einer Sicherung des Abstroms kombiniert [67].

#### **5.4 Rechercheergebnisse hinsichtlich einer allgemeinen Vorgehensweise bei der Durchführung von Gefahrenabwehrmaßnahmen auf ehemaligen Rüstungsstandorten (Akzeptanz des Verfahrens – Bürgerbeteiligung, Öffentlichkeitsarbeit)**

Bei einer Vielzahl der dargestellten ehemaligen Rüstungsstandorte stellte sich neben der eigentlichen Altlastensituation die Folgenutzung z.T. hochbelasteter Bereiche als ein Problem dar. Bereits unmittelbar nach dem Zweiten Weltkrieg wurden auf einigen Standorten Unterkünfte zu Wohnzwecken eingerichtet, es folgten Umbauten zur Nutzung des Geländes als Wohnbereiche oder zu Gewerbe- und Industrieflächen ohne vorherige Erkundung der Gefahrenlage und Durchführung von notwendigen Gefahrenabwehrmaßnahmen. Damit ist eine direkte Betroffenheit der Bevölkerung durch ihren Wohnsitz oder durch Arbeitsplätze auf den Standorten entstanden. Weitere Probleme haben sich durch die Nutzung des STV-belasteten Grundwassers durch die Entnahme für Trink- oder Brauchwasserzwecke ergeben. Aus den Rechercheergebnissen wird deutlich, dass die Ängste der Bevölkerung um ihre Gesundheit von den zuständigen Behörden ernst genommen wurden und werden. Der Erfolg der Altlastenbearbeitung und ab-

schließlich auch für die Sanierung der erkundeten Belastungen der Schutzgüter hängt somit stark von der Akzeptanz in der Bevölkerung ab. Insbesondere bezogen auf das sensible Schutzgut Grundwasser sind eine frühzeitige, vorausschauende, offene und aktive Informationspolitik, die Transparenz der einzelnen Maßnahmen mit entsprechender Verbindlichkeit (vertrauensschaffende Maßnahmen) Erfolg versprechend.

Bereits in den 1990er Jahren wurden in Hessen Bürgerbeteiligungs-Büros eingerichtet, wobei die Aufgabe des Büros eine neutrale Beratung und einen Informationsaustausch mit den Anwohnern und Betroffenen in allen Fragen im Rahmen der Altlastenbearbeitung sowie die Erläuterung auch komplexer Zusammenhänge und Arbeitsschritte aus nicht-fachtechnischer Sicht beinhaltete. Diese Kontaktstelle ist als wichtiges kommunikatives bzw. vermittelndes Bindeglied zwischen den Behörden, den Agierenden (Sanierungsbüros und den ausführenden Firmen) und den Betroffenen herausgestellt. Als weiteres Instrumentarium wurde in Hessen ein Projektbeirat eingerichtet und ins Projekt eingebunden. Dessen Aufgabe war über eine Geschäftsordnung geregelt und wurde den Anforderungen im Projekt auch entsprechend angepasst. In den Projektbeirat eingebunden waren betroffene Bürger bzw. Gewerbetreibende, Bürgerinitiativen und Verbände, Behörden, Parteien und Institutionen, z.T. unter Einbeziehung von externen Fachleuten. Die Hauptaufgabe des Beirates bestand darin, bei gleichem Wissensstand Entscheidungen herbeizuführen, wie u.a. Ziele und Zielwerte für die Sanierung festzulegen und Sanierungsverfahren zu diskutieren und abzustimmen. In der Broschüre „Boden gut gemacht“ [56] wurde herausgestellt, dass hier ein ständiger Lernprozess von allen Seiten einsetzen musste.

## 6 Zusammenfassende Auswertung der beantworteten Fragebögen

Die Problematik ehemaliger Rüstungsaltsandorte durch Belastungen mit sprengstofftypischen Verbindungen in Boden und Grundwasser gilt grundsätzlich als äußerst sensibel, insbesondere, wenn hierbei Grundwasser betroffen ist, das auch als Brauch- oder als Trinkwasser gefördert wird.

Eine Vielzahl der untersuchten Standorte hat die Hauptnutzungszeit der Munitionsproduktion während des Zweiten Weltkrieges erfahren. Nach Kriegsende endete diese weitestgehend, entweder aufgrund der grundsätzlichen Nutzungsaufgabe bzw. durch Bombardierungen, Explosionen oder Demontage. Standorte ohne größere Zerstörungen mit Bergbaurelevanz wurden zur Sprengstoffherstellung für den Gesteinsabbau und Bergbau weiter genutzt. Andere Flächen dienten als Sprengplätze, Munitionsvernichtungsbereiche oder Übungsgelände, auf denen Munition gehandhabt wurde.

Die Entwicklung bzw. Umnutzung der ehemaligen Rüstungsaltsandorte verlief nach dem Krieg größtenteils nach vergleichbarem Schema ab. Die Gebäude, die als Unterkünfte fungierten bzw. umgewidmet werden konnten, wurden entsprechend hergerichtet. Somit entwickelten sich an vielen Standorten Wohnsiedlungen bzw. Mischgebiete oder im Bereich des eigentlichen ehemaligen Werkgeländes Gewerbe- und Industriebereiche. Für die Standorte waren u.a. auch Grundwasserentnahmestellen für Trink- und Brauchwasser errichtet worden, die, wenn vorhanden, auch in der Folgezeit weiter genutzt wurden.

Eine hohe nutzungsbedingte Sensibilität im Umgang mit ehemaligen Rüstungsstandorten war somit gegeben und eine Betroffenheit verschiedener Schutzgüter, einschließlich des Menschen, durch rüstungsbedingte Schadstoffe war nicht auszuschließen. Jedoch erst in den 1980er/1990er Jahren erfolgten die ersten Grunderfassungen bzw. historische Erhebungen von Rüstungsstandorten und die sich anschließenden Gefahrenerkundungsmaßnahmen.

Die ermittelten standortbezogenen Belastungen, die das Schutzgut Mensch direkt betrafen, bedingten einen unmittelbaren Handlungsbedarf. Für das Schutzgut Wasser, insbesondere für Rohwasser in Wasserwerken, wurde bei Verdacht auf STV-Belastungen die Behandlung über Aktivkohle veranlasst. Wenn eine alternative Grundwasserförderung möglich war, wurde diese eingeleitet.

Die Reinigung des mit STV kontaminierten Grundwassers über Aktivkohle wurde aus Vorsorgegründen bis zur Errichtung von Wasserentnahmestellen an unbelasteten Standorten aufrecht erhalten. Anschließend wurde die ehemalige Förderung eingestellt. Hierunter fielen im Sinne von vorsorgenden Sicherungsmaßnahmen auch Standorte, bei denen die Wasserentnahme aus unbelasteten Grundwasserleitern erfolgte.

Die in den Fallbeispielen vorgestellten Maßnahmen zur Sanierung STV-kontaminierter Wässer, die ursächlich den ehemaligen Rüstungsstandorten zugeordnet werden können, sind differenziert zu betrachten. An einzelnen Standorten wurde das Grund- bzw. Schichtwasser in die Sanierung einbezogen. An anderen Standorten fällt STV-belastetes Abwasser aus Kanälen oder als Oberflächenwasser/Teiche bzw. aus Sanierungsbereichen verunreinigtes Schichtenwasser an. Die entsprechenden Standorte unterscheiden sich weiterhin in der aktuellen Nutzung der Fläche bzw. Umgebung und deren Belastungsgrad. Die Herangehensweise an die Auswahl und Planung einer Sanierungsmaßnahme musste z.T. neuen Erkenntnissen bzw. örtlichen Situationen angepasst werden.

Daher ist eine Vergleichbarkeit der ausgewählten Standorte hinsichtlich der Vorgehensweise im Rahmen durchgeführter Grundwasser-Sanierungsmaßnahmen nur bedingt gegeben und wird auch bei zukünftigen Bearbeitungen auf Standorten mit STV-Belastungen nur schwer möglich sein.

Die Darstellung der vorgestellten Beispielfälle in den Tabellen 12 und 13 mit und ohne Standortbezug kann jedoch für die unterschiedlichen schadstoffbelasteten Schutzgüter bei Kenntnis

der entsprechenden Leitparameter eine Hilfestellung hinsichtlich der Auswahl möglicher eigener technischer Lösungen für die Sanierung STV-belasteten Wassers im Rahmen der Altlastenbearbeitung geben.

Projekte mit direkter Betroffenheit von Bürgern sind hinsichtlich ihrer Akzeptanz am ehesten durch Offenheit und größtmöglicher Informationspolitik realisierbar. (vergleiche u.a. die Bürgerbeteiligung bei den Standorten in Hessen). Ein öffentlicher Zugang zu Daten und Informationen von der Handhabung/Vorgehensweise bei Gefahrenerforschungsmaßnahmen bis hin zu Sanierungen ist hier von besonderer Bedeutung.

## 7 Forschungsberichte

Die Auflistung durchgeführter Forschungsvorhaben hinsichtlich innovativer Sanierungsverfahren für mit STV belastetes Grundwasser im Rahmen der Arbeitshilfe IA (Kap. 8) wird durch eine erweiterte Informationsrecherche insbesondere bei Universitäten fortgeführt und entsprechend ergänzt [9].

### 7.1 In-situ-Filterregeneration bei der TNT-Elimination aus Grundwasser: Anwendung des Verfahrens auf einen Faseraktivkohle-Adsorber

BMBF; Technische Universität Berlin (Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft)

Projektnummer: 02WA0016, Projektzeitraum: 01.07.2001 - 31.08.2002, (TIB) Hannover: F 03 B 1118

Faseraktivkohle ist ein sehr effektives, aber auch teures Adsorbens. Die Resorption der Schadstoffe auf chemischem Wege arbeitet dabei genauso gut und mit vergleichbaren Werten wie bei granulierter Aktivkohle. Allerdings wird nach der Regeneration nicht mehr die ursprüngliche Beladungskapazität erreicht.

Zur Reinigung von mit TNT-belasteten Grund- und Sickerwässern aus Rüstungsaltslasten werden in der Regel Aktivkohlefilter eingesetzt. Diese werden hauptsächlich auf thermischem Weg in zentralen Großanlagen regeneriert. Das verursacht Rauchgas- und CO<sub>2</sub>-Emissionen und erfordert weite Transportstrecken zwischen Filteranlage und Regenerationsanlage.

Als Alternative wurde in einem Vorgängerprojekt ein chemisches Regenerationsverfahren entwickelt, das sich direkt vor Ort anwenden lässt. Dabei werden die Schadstoffe mit Natronlauge von der Aktivkohle desorbiert. Anschließend wird die Aktivkohle mit Salzsäure wieder aufnahmefähig gemacht.

In diesem Vorhaben sollte untersucht werden, inwieweit die Ergebnisse der granulierten Aktivkohle (GAC) sich auf Faseraktivkohle (ACF) als Adsorbens übertragen lassen.

Ergebnisse:

ACF weist im Vergleich zu anderen Adsorbentien sehr hohe Beladungskapazitäten, eine sehr schnelle Adsorptionskinetik und eine gute Durchströmbarkeit auf. Diese Vorteile müssen für den konkreten Einsatzfall gegen den hohen Preis abgewogen werden.

Die Regeneration von ACF-Adsorbentien arbeitet vergleichbar und führt zu ähnlichen Abwässern wie bei GAC. Allerdings ist nach der ersten Regeneration eine erhebliche Kapazitätsverringering der ACF zu beobachten, die in weiteren Zyklen jedoch stagniert.

Für die Auslegung des Verfahrens und die Einstellung der Prozessparameter wurde eine Software entwickelt.

### 7.2 Begleitende analytische Untersuchungen bei der Entfernung von sprengstoffrelevanten Substanzen aus Gewässern durch Adsorption an Polymeren mit räumlich globularer Struktur (RGS)“, Universität Hamburg, Dissertation von York Zimmermann, 2007

In der Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit [68] wurden die Untersuchungsergebnisse dargelegt, inwieweit sich sprengstofftypische Wässer mithilfe von Polymeren mit räumlich globularer Struktur (RGS) abreinigen lassen. Am Modellstandort Elsnig wurden zwei geeignete Typen ermittelt, die gute Adsorptionseigenschaften zeigen.

Durch eine effektive Elution im Kreislaufverfahren konnten die notwendigen Lösungsvolumina bereits im Labormaßstab gesenkt werden. Es wurde somit ein Verfahren entwickelt, mit dem die Schadstoffe zuverlässig aus dem Wasser entfernt werden können. Das bei der Regeneration

anfallende Eluat konnte problemlos dem biologische Abbau im zweiten Anlagenteil zugeführt werden.

Die Kapazitäten für die Adsorption unpolarer Substanzen sind jedoch geringer als bei Aktivkohle, wodurch sich die Überlegung ergeben würde, die RGS-Polymere im Tandemverfahren mit Aktivkohle zur Abreinigung der belasteten Wässer einsetzen zu können. Diese Überlegungen wurden in Vorversuchen umgesetzt.

Bei der Bestimmung der Sprengstoffe lieferte die „Square-Wave“-Voltametrie, u.a. für Hexogen, und HPLC für komplexe Gemische der STV entsprechende Ergebnisse. Es wurde ein Verfahren für die simultane Bestimmung von 10 STV entwickelt. Mithilfe der bei den Untersuchungen entwickelten analytischen Verfahren konnte das Ad- und Desorptionsverhalten der STV an RGS-Polymeren untersucht werden. Nach den Vorversuchen mit pulverisierten Polymeren sowie ersten Fließversuchen konnten die für die Pilotanlage geeigneten Polymertypen ausgewählt werden. Zunächst wurden die optimalen Fließbedingungen und Kapazitäten für Einzelsubstanzen ermittelt. Parallel zu diesen Versuchen wurde die Desorption untersucht und optimiert.

Fazit: Es wurden Versuche mit natürlichen Wässern und synthetischen Lösungen durchgeführt, um im Labor die für die Pilotanlage optimalen Betriebsbedingungen zu ermitteln. Ergänzend zu den RGS-Polymeren wurde die Vorschaltung eines Aktivkohlefilters erprobt. Hier konnte gezeigt werden, dass RGS-Polymere die Lücke schließen, welche durch vorzeitig an Aktivkohle durchbrechende Substanzen entsteht.

### 7.3 Verfahrensgrundlagen für die Reinigung von Hexogen/ Hexylkontaminierten Grund- und Oberflächenwasser aus Rüstungsaltslasten mit Pilzen

BMBF; IABG mbH

Projektnummer: 1451070/0 (Phase 1), 0251070A (Phase 2), Projektzeitraum: 01.07.1996 - 31.08.1997 (Phase 1), 01.09.1998 - 28.02.2001 (Phase 2), TIB: F 01 B 1523

Von den im Labor- und Technikumsmaßstab untersuchten Pilzen eignen sich bestimmte Deuteromyceten-Stämme besonders zum Abbau sprengstofftypischer Verbindungen. Weiterhin konnte bei ihnen die Fähigkeit zur aeroben Assimilation von Nitrat nachgewiesen werden.

Im Rahmen des Gesamtvorhabens "Biologische Sanierung von Rüstungsaltslasten" wurde mit diesem Projekt ein Beitrag zur Entwicklung von mikrobiologischen Sanierungsverfahren für Sprengstoffkontaminationen geleistet.

Als Versuchsstandort diente das Gelände der Westfälisch-Anhaltinischen Sprengstoff AG (WASAG), da hier neben dem Sprengstoff TNT auch die Sprengstoffe Hexogen (RDX) und Hexyl (Hexanitrodiphenylamin) produziert wurden.

Vorgehensweise:

- Untersucht wurde der biologische Abbau der Sprengstoffe Hexogen und Hexyl durch Pilze. Hierfür wurden standortspezifische Pilze aus Boden- und Wasserproben des Standorts isoliert und Hexogen- bzw. Hexyl- abbauende Pilze angereichert.
- Parallel dazu erfolgte ein Screening nach einheimischen Basidiomyceten, die Hexogen und Hexyl metabolisieren können.

Ergebnisse:

Vom Standort isolierte Deuteromyceten, wie auch einheimische Basidiomyceten, zeigten ein großes Potential zum Abbau von Hexogen und Hexyl in Flüssigkulturen. Diese Verbindungen wurden von den Pilzen als Stickstoffquelle und nicht als Kohlenstoffquelle verwertet. Für die Umsetzungsrate der beiden Schadstoffe waren die Verfügbarkeit und die Art einer weiteren Stickstoffquelle von entscheidender Bedeutung.

Beim Abbau der Sprengstoffe wurde durch die ausgewählten Pilzstämme keine biologische Toxifizierung, sondern eine Enttoxifizierung, insbesondere des Hexyls, festgestellt.

In Abbauversuchen mit Originalgrundwasserproben konnten die eingesetzten Stämme alle vorhandenen sprengstofftypischen Verbindungen vollständig eliminieren. Es zeigte sich, dass Deuteromyceten und viele Bakterien die Fähigkeit zur aeroben Assimilation von Nitrat besitzen.

## 7.4 Freiland-Dekontamination von TNT und <sup>14</sup>C-TNT-Aufnahme durch Gehölze

BMBF, BBA, (TIB) Technische Informationsbibliothek Hannover [69-72]

Projektnummer: 0330268; Projektzeitraum: 01.09.1998 - 31.08.2001, TIB: QN 1(104,40)

An Weiden, Pappeln, Birken, Fichten und Kiefern wurden Untersuchungen durchgeführt, um Bilanzierungen des TNT-Verbleibs im System Boden/Baum erstellen zu können. Die Ergebnisse ermöglichen es, Sanierungsempfehlungen und Förderungsmöglichkeiten des „Natural Attenuation“ altlastenspezifisch abzuleiten.

Hauptziel dieser Untersuchungen war es, das Phytoremediationspotential für sprengstofftypische Verbindungen bei Bäumen (Dendroremediation) zu untersuchen.

Der Freiland-Nachweis der Dendroremediation erfolgte bei allen getesteten Gehölzen durch Bioindikation des Wachstums und chemisches Sickerwasser-Monitoring.

Ergebnisse:

In Laub- und Nadelgehölzen gelang der Nachweis der vollständigen [<sup>14</sup>C]-TNT-Inkorporation bzw. TNT-Metabolisierung zu bisher unbekanntem Metaboliten sowie eine differenzierte Kompartimentierung des [<sup>14</sup>C]-TNT-Verbleibs in reifen Gehölzen.

Aus der Ergebnis-Verknüpfung von

- Dendrotoleranzexperimenten,
- Radiotracer-Untersuchungen und
- Freilandparzellenertragsmessungen

ließ sich das Dendroremediationspotential anzupflanzender Gehölze und der Verlauf der „Natural Attenuation“ bestehender Altlastwälder berechnen. Außerdem können daraus altlastspezifische Sanierungsempfehlungen und Förderungsmöglichkeiten der „Natural Attenuation“ abgeleitet werden.

## 7.5 „Der Einsatz mykorrhizierter Gehölze in biologischen Sanierungsverfahren unter dem Aspekt TNT-belasteter Böden“

Zu dem Thema wurde an der Universität Bremen die Dissertation von Ingo Dobner, 2003 mit einem vergleichbaren Thema „Der Einsatz mykorrhizierter Gehölze in biologischen Sanierungsverfahren unter dem Aspekt TNT-belasteter Böden“ erarbeitet [73].

Als Ziel der vorliegenden Arbeit wurde herausgestellt, das Phytoremediationspotenzial mykorrhizierter Gehölze für TNT und Begleitkontaminanten bei der biologischen Bodensanierung zu untersuchen. Hierbei erfolgten die Untersuchungen insbesondere an Kiefern und Pappeln.

Die Ausführung der Experimente erfolgte unter den wesentlichen Schwerpunkten:

- Untersuchungen zur Abreicherung der Nitroaromatenkonzentrationen belasteter mit Sand vermischter Böden durch Gehölze vom ehemaligen Sprengstoffwerk 'Tanne' bei Clausthal-Zellerfeld. Die Ausgangskonzentrationen für TNT in den Bodensubstraten lagen bei 80-100 mg/kg (Experiment mit Kiefern) bzw. 400-450 mg/kg (Experiment mit Pappeln).

Im Versuch wurde überprüft, ob und inwieweit durch den Einsatz mykorrhizierter Kiefern und Pappeln (*Pinus sylvestris*/*Pisolithus tinctorius*, *Populus tremula*/*Hebeloma spec.*) unter Einbeziehung des Weißfäulepilzes *Pleurotus ostreatus* in besonderen Rhizotronsyste-  
men der Abbau von TNT und Metaboliten gefördert werden kann.

- Untersuchungen zur Aufnahme und Verteilung von Nitroaromaten im Organismus Pflanze. Mittels GC/MS-Analytik wurden verschiedene Nitroaromaten in den Geweben nicht-mykorrhizierter und mykorrhizierter Pappeln erfasst. Im Vergleich wurden nicht-mykorrhizierten und mykorrhizierten Kiefern <sup>14</sup>C-TNT in definierten Mengen angeboten und die Aufnahme und Verteilung des <sup>14</sup>C-Radiotracers in den Pflanzen quantitativ bestimmt.
- Untersuchungen zur Nitroaromatentoleranz mykorrhizierter 4 – 5 Monate alter Kiefern (*Pinus sylvestris*/*Pisolithus tinctorius*). Mittels eines Toxizitätstests wurde der Einfluss des TNTs bei verschiedenen Ausgangskonzentrationen (3,0, 300 und 3.000 mg TNT/kg Boden über den Biomassenzuwachs bzw. auftretende morphologische Schäden an Nadeln und Wurzeln und die Entwicklung des Mykorrhizierungsgrades der Wurzeln ermittelt.

Als Ergebnis aus den Studien, u.a. des Feldversuches am Standort 'Werk Tanne' in Clausthal Zellerfeld, lässt sich aufzeigen:

- Effizienz beim Nitroaromatenabbau (TNT und ADNTs) im Boden der mykorrhizierten sowie nicht-mykorrhizierten Pappeln. Unter der Voraussetzung eines guten Durchwurzelungsgrades des Bodens findet hierbei mehr eine Transformation des TNT statt.
- Vom Transfer aus dem Boden in die Pflanzen sind insbesondere TNT, 2-ADNT und 4-ADNT betroffen. Die Wurzeln waren mit deutlichem Abstand anteilig am höchsten belastet. Aufnahmeexperimente mit <sup>14</sup>C-TNT ergaben bei Kiefern für tatsächlich inkorporierte <sup>14</sup>C-TNT/<sup>14</sup>C-TNT-Metaboliten lediglich eine Wiederfindung unter 1% nach 14 Tagen Applikation
- Teilweise wurde eine Bindung von <sup>14</sup>C-TNT/<sup>14</sup>C-TNT-Metaboliten an der Oberfläche der Seitenwurzeln nachgewiesen (mikro-autoradiographische Verfahren)
- Aufgenommene <sup>14</sup>C-Anteile fanden sich bevorzugt in den Tracheiden des Xylems der Seiten- und Trägerwurzeln
- Während der Experimentierphase war die Schadstoffkonzentration einer erheblichen Abbaudynamik mit stetiger Abnahme im Substrat unterlegen
- Eine unterschiedliche Dotierung von TNT-Belastungen im Boden sollte die Vitalität der Pflanzen herausstellen. Bei 3 mg TNT/kg Boden zeigte sich keine Beeinträchtigung der Mykorrhiza, sondern eher auf die Biomasseproduktion bezogen ein Düngeneffekt. Als Toleranzgrenze wurden Belastungswerte um 50 mg Nitroaromaten/kg angesehen, wobei Wachstumsminderungen eintraten, ein Regenerationsvermögen jedoch möglich war. Belastungswerte zwischen 1.600 und 2.000 mg Nitroaromaten/kg Boden waren in hohem Maße toxisch für die mykorrhizierten Kiefern und brachten zahlreiche Pflanzen mitsamt des Mykobionten zum Absterben

Den Kernpunkt des Feldversuches bildete der mikrobielle Abbau von STV im Wurzelraum mykorrhizierter Gehölze (Rhizosphärendegradation). Mykorrhizapilze mit ligninolytischen Fähigkeiten als Streuzersetzer in Symbiose mit Pflanzen, Weißfäulepilze und dazu Bakterien, die in Assoziation mit den genannten Pilzen und Pflanzen leben, erwirkten als Organismengemeinschaft über einen Mehrstufenprozess letztendlich eine Ringspaltung der Nitroaromaten.

**Tabelle 14: Gegenüberstellung wichtiger Ergebnisse aus Freilandhebungen am Standort 'Werk Tanne' und aus Laborexperimenten der vorliegenden Arbeit (aus Dissertation von I. Dobner: Tabelle 24) [73]**

Laboruntersuchungen	Freilanduntersuchungen
Deutliche Initiierung des TNT-Abbaus nach mechanischer Bearbeitung des Bodens (Homogenisierung durch Sieben, 2 mm Maschenweite)	Deutliche Initiierung des TNT-Abbaus nach mechanischer Bearbeitung des Bodens (Homogenisierung durch Einsatz einer Bodenfräse)
Eine Bepflanzung der Varianten mit mykorrhizierten Gehölzen steigert effizient den Nitroaromatenabbau; unter der Voraussetzung einer guten Durchwurzelung der Rhizotrone	Eine effiziente Dekontamination der Flächen durch Bepflanzung mit mykorrhizierten Gehölzen ließ sich nicht eindeutig nachweisen.
Wenn die Versuchsvarianten mit mykorrhizierten Gehölzen bestückt waren, bewirkte eine zusätzliche Beimpfung mit Weißfäulepilzen keine Verbesserung der Abbauleistung	Den zu beimpften Weißfäulepilzen konnte für den Abreicherungsprozess der Schadstoffe keine Bedeutung zugeordnet werden
Nur ein geringer Teil der im Boden bioverfügbaren Nitroaromaten wurde von den Pflanzen tatsächlich aufgenommen. Neben TNT wurden 2-ADNT und 4-ADNT im Schadstoffspektrum der Pflanzen detektiert, wobei die ADNTs dominieren. Die nachweisbare Nitroaromatenkonzentration war stets durch eine deutliche Organspezifität gekennzeichnet. Die Wurzeln waren mit Abstand am höchsten belastet.	Auch im Feldversuch nahmen die Pflanzen nur einen geringen Teil der verfügbaren Schadstoffe aus dem Boden auf. Das Aufnahmeverhalten war artspezifisch. Nitroaromaten wurden hauptsächlich in den Geweben der Fichten gefunden, kaum in den Pappeln und gar nicht im Holunder. Das Schadstoffspektrum umfasst TNT sowie 2-ADNT und 4-ADNT mit leichter Dominanz zugunsten der ADNTs. Eine organspezifische Akkumulation war nicht festzustellen.

**Ergebnisse:**

Für eine sichere und abschließende Beurteilung des durchgeführten Phytoremediationsverfahrens war der knapp zweijährige Versuchszeitraum insgesamt zu kurz. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse und der aus der Literatur bekannten positiven Laborergebnisse soll dennoch modellhaft skizziert werden, bei welchen Bedingungen Phytoremediation einen grundlegenden Sanierungserfolg für TNT-Belastungen verspricht:

- Der Zeitrahmen muss entsprechend langfristig angesetzt werden, da die mykorrhizierten Pflanzen mit ihren Wurzeln und Mykorrhizapilze mit ihren Hyphensystemen mehrere Vegetationsperioden benötigen, um den Boden flächendeckend und feinmaschig zu erschließen (Voraussetzung guter Durchwurzelungsgrad).
- Es wurde herausgestellt, dass ein schwacher bis mittlerer Kontaminationsgrad für Phytoremediationsverfahren geeignet ist (Höhe der Kontamination max. bei 400-500 mg TNT/kg Boden (TS)). Im Blickpunkt stehen hierbei die großflächigen heterogen belasteten und zum Teil bewaldeten Areale, die mit herkömmlichen Ex-situ-Verfahren nicht gereinigt werden können.
- Als wichtiges Kriterium wurde die richtige Auswahl von Pflanzen- und Mykorrhizapilzspezies (33 Arten mit guten Schadstoffdegradationsfähigkeiten) mit einer guten Wachstumsleistung und einer guten Anpassung an die jeweiligen Standortgegebenheiten der zum Einsatz kommenden Arten benannt. Als Gehölzpflanzen sind außerdem Arten mit einem weiten Wirtsspektrum für verschiedene Mykorrhizapilze vorzuziehen.
- Positive Ergebnisse wurden von tiefwurzelnden Gehölzen durch eine Steigerung des Abbaus in tieferen Bodenschichten erwartet. Verrottende Wurzeln dienen dabei als Sub-

strat, in entstandenen Wurzelgängen wird der Gasaustausch erleichtert bzw. durch Wasseraufnahme der Pflanzen könnte eine Verfrachtung der Schadstoffe vermindert werden.

**Abschließendes Fazit:** Der Nachweis vielversprechender Erfolge von Sanierungsverfahren für mit STV belastete Böden durch Gehölze in Freilandversuchen blieb bisher aus. Weitere für die Phytoremediation geeignete Pflanzen sind zukünftig aufzufinden.

## 7.6 „Reinigung sprengstoffbelasteter Wässer mit Hilfe einer Pflanzenkläranlage“

Eine weitere Dissertation beschäftigt sich im Rahmen dieses Themenkomplexes mit der Thematik „Constructed Wetlands“: „Reinigung sprengstoffbelasteter Wässer mit Hilfe einer Pflanzenkläranlage“, Technische Universität München, Dissertation von Ina Hoffmann, 2002 [74].

Nach Aussagen der Zusammenfassung hatte die vorliegende Arbeit zum Ziel, eine systematische Studie für den Einsatz einer Pflanzenkläranlage zur Sanierung von TNT-kontaminierten Wässern durchzuführen. Schwerpunktmäßig sollten dabei anwendungsorientierte Aspekte der Anlage betrachtet und Erkenntnisse zum Verbleib des Schadstoffes in der Anlage gewonnen werden. Zu diesem Zweck erfolgten Untersuchungen an einer realen Pflanzenkläranlage im Freiland und an einer geschlossenen Modellanlage im Labor.

Es konnte gezeigt werden, dass die Pflanzenkläranlage für die Reinigung TNT-kontaminierter Wässer nutzbar ist. Dabei konnte eine nahezu vollständige Eliminierung von TNT aus dem Wasser beobachtet werden. Innerhalb der Pflanzenkläranlage spielt die Bepflanzung eine wesentliche Rolle. Durch die Bepflanzung kann gegenüber einer nicht bepflanzten Anlage eine um 30 % höhere Eliminierungsrate aus dem Wasser erreicht werden. Die Eliminierung unterliegt einer Temperaturabhängigkeit. (somit Abhängigkeiten von unbepflanzten/bepflanzten Anlagen und Temperatursituation).

Bei den Untersuchungen zeigte sich weiterhin, dass innerhalb der Becken differenziert anaerob/aerobe Milieubedingungen herrschen. Diese begünstigen einen reduktiven Abbau von TNT durch Mikroorganismen. Dieser kann durch einen mikrobiellen Abbau, durch die Redoxverhältnisse in der Anlage verursacht werden. (reduktive Abbau vom TNT über die Zwischenprodukte ADNT und DANT).

Experimente zur Adsorption der Schadstoffe an die Bodenmatrix der Pflanzenkläranlage zeigten, dass ein kleiner Teil der Schadstoffe reversibel an die Lava gebunden ist. In den Pflanzen der Pflanzenkläranlage konnte keine Aufnahme der Schadstoffe festgestellt werden. Eine Identifizierung des Verbleibs der Schadstoffe erfolgte durch Experimente an einer Modellanlage unter Nutzung eines radioaktiven Tracers. Mit diesem System konnte gezeigt werden, dass der Hauptteil des Schadstoffes bzw. seiner Abbauprodukte an die Bodenmatrix und die Wurzeln der Pflanzen gebunden wurde.

Diese Ergebnisse bestätigen die beobachtete Bindung von Schadstoffen an die Bodenmatrix der Pflanzenkläranlage.

Durch Korrelation mit aus der Literatur bekannten Erkenntnissen kann gefolgert werden, dass nicht TNT, sondern dessen Abbauprodukte an die Bodenmatrix gebunden werden. Innerhalb der Arbeit konnte aufgrund der limitierten verwendeten Radioaktivitätsmengen allerdings nicht geklärt werden, welche Spezies an die Bodenmatrix gebunden sind. Über die Wurzeln ist prinzipiell auch eine Aufnahme von Schadstoffen in die Pflanze denkbar. Allerdings erfolgt in diesem Fall keine Weiterleitung der eventuell aufgenommenen Schadstoffe bis in die Pflanzensprossen (kein Nachweis in diesen Pflanzenteilen). Beim Abbau des Schadstoffes findet eine nur geringfügige Mineralisierung statt.

Durch eine zusätzlich zugegebene Kohlenstoffquelle (Glucose) wird der reduktive Abbau des Schadstoffes beschleunigt, es erfolgt jedoch eine ähnliche Verteilung der Abbauprodukte in den Kompartimenten der Anlage wie auch in Abwesenheit der zusätzlichen Kohlenstoffquelle. Die zusätzliche Kohlenstoffquelle begünstigt einen Cometabolismus beim mikrobiellen Abbau von TNT.

Ein weiterer Vorteil bei der Zugabe der zusätzlichen Kohlenstoffquelle ist die Schaffung von anaeroben Verhältnissen, die sich positiv auf einen reduktiven Abbau von TNT durch Mikroorganismen auswirken können.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ist die Postulierung des Hauptabbauweges von TNT in der Pflanzenkläranlage möglich: TNT wird durch Mikroorganismen bzw. bestehende Redoxbedingungen über die Zwischenprodukte ADNT und DANT reduziert. Die weitere Reduktion von DANT zum TAT ist nicht nachgewiesen. DANT bzw. TAT (falls gebildet) lagern sich anschließend an die Bodenmatrix der Kläranlage an und werden dort immobilisiert. Auf diese Weise kann TNT durch die Pflanzenkläranlage aus dem Wasser eliminiert werden. Dabei stellen die Pflanzen günstige Milieubedingungen für den mikrobiellen Abbau bereit.

Darüber hinaus durchgeführte Untersuchungen mit anderen Nitroaromaten zeigten, dass neben TNT auch chemisch verwandte Schadstoffe durch die Pflanzenkläranlage aus dem Wasser eliminiert werden können (an vergleichbare Bedingungen geknüpft wie bei den TNT-Versuchsanlagen).

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich wichtige Hinweise für den Betrieb einer Pflanzenkläranlage. Zu berücksichtigen ist eine ausreichend lange Fließstrecke, durch die ein Abbau des Schadstoffes ermöglicht wird. Die Bedingungen wie Witterung (Betrieb im warmen Sommer mit maximaler Leistungsfähigkeit) erhöhen oder reduzieren den Abbau. Begünstigt wird eine möglichst vollständige Eliminierung weiterhin durch die Zugabe einer zusätzlichen Kohlenstoffquelle. Dadurch wird der Abbau beschleunigt, was im Idealfall sogar eine Verminderung der Beetfläche erlauben könnte.

#### **Ergebnisse:**

Beim Umgang mit realen Altlasten ergibt sich stets das Problem von Begleitstoffen in den zu reinigenden Wässern, welche prinzipiell die Sanierungseffizienz beeinflussen können. Diese Einflüsse müssen daher bei realen Sanierungsanwendungen untersucht werden. Erst dann ist die Übertragbarkeit der in den Modellsystemen erhaltenen Daten und Erkenntnisse angezeigt.

### **7.7 „Untersuchungen der Transformationswege von 2,4,6-Trinitrotoluol in Oberflächengewässern und deren Nutzen als natürliche Schadstoffminderungsprozesse an einem ehemaligen Rüstungsstandort“**

Allgemein: Zu der Thematik Stoffminderungsprozesse auf ehemaligen Rüstungsstandorten wurde an der Philipps-Universität Marburg die Dissertation von Barbara Herrmann, 2008 mit dem Thema „Untersuchungen der Transformationswege von 2,4,6-Trinitrotoluol in Oberflächengewässern und deren Nutzen als natürliche Schadstoffminderungsprozesse an einem ehemaligen Rüstungsstandort“ erarbeitet [51, 75].

In der Zusammenfassung der Arbeit ist herausgestellt, dass in den durchgeführten Labor- und Simulationsversuchen im Reaktorsystem die mikrobiellen und photolytischen Transformationswege von einigen sprengstofftypischen Verbindungen aufgeklärt werden konnten. Vor allem die Versuche mit <sup>14</sup>N-/<sup>15</sup>N-markierten Substanzen lieferten wichtige Informationen zur Strukturaufklärung vieler bislang unbekannter Azo- und Azoxyverbindungen. Aufgrund der erhaltenen Informationen zu den entstehenden Metaboliten auf den verschiedenen Transformationswegen konnte das Auftreten aller in den Standortwässern vorhandenen Verbindungen geklärt werden. Zudem konnten aus den durchgeführten Laborversuchen die Parameter herausgearbeitet werden, die für eine Betrachtung des natürlichen Selbstreinigungspotentials auf dem Standort entscheidend sind.

Die Untersuchungen von Wasserproben des Standortes Clausthal-Zellerfeld zeigten, dass die Schadstoffbelastung hauptsächlich von 2,4,6-Trinitrotoluol, 1,3,5-Trinitrobenzol, den Aminodinitrotoluolen, den Aminodinitrobenzoesäuren und der 2,4,6-Trinitrobenzoesäure ausgeht. In Abhängigkeit der Witterung (Wärme) zeigt sich zu verschiedenen Jahreszeiten ein anderes Schadstoffspektrum. Positiv zu beobachten war, dass an den Abläufen der Pfauenteiche nur

noch sehr viel geringere Schadstoffkonzentrationen festgestellt wurden als an den Zuläufen (bedingt durch natürliche Schadstoffminderungsprozesse).

In Laborversuche konnte dies nachgewiesen werden (mikrobielle Transformation von 2,4,6-Trinitrotoluol und 1,3,5-Trinitrobenzol des belasteten Oberflächenwassers). Für 1,3,5-Trinitrobenzol (hochgradig ökotoxische Trinitrobenzol) wurde innerhalb weniger Tage im Sommer bzw. Wochen in den Wintermonaten, in weniger toxische Transformationsprodukte wie das 3,5-Dinitroanilin und das 3,3',5,5'-Tetranitroazoxybenzol umgewandelt. Die mikrobielle Transformation von 2,4,6-Trinitrotoluol dauert hingegen deutlich länger als für 1,3,5-Trinitrobenzol. Hier entstehen als Hauptmetabolite die beiden Aminodinitrotoluole 2-A-4,6-dinitrotoluol und 4-A-2,6-dinitrotoluol (nachgewiesen in hohen Konzentrationen in den Oberflächengewässern des Standortes).

Neben der mikrobiellen Transformation sind die photolytischen Transformationsprozesse für 2,4,6-Trinitrotoluol in den Pfauenteichen betrachtet worden. Durch die Sonneneinstrahlung auf die Pfauenteiche und den natürlichen Huminstoffgehalt dieser Gewässer wird die eingetragene Menge an 2,4,6-Trinitrotoluol zumindest in den Sommermonaten vollständig transformiert (Bestätigung dadurch, dass an den Ausläufen noch die Transformationsprodukte 2-Amino-4,6-dinitrobenzoesäure, 5-Amino-2',4-dicarboxy-3,3',5'-trinitroazoxybenzol, 4-Amino-2,6-dinitrobenzoesäure und 2,4,6-Trinitrobenzoesäure nachgewiesen wurden). In den Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass nur ca. 20 % der eingesetzten Menge an Trinitrotoluol zu dem Haupttransformationsprodukt 2-Amino-4,6-dinitrobenzoesäure reagiert.

Demzufolge ist das natürliche Schadstoffminderungspotential durch photolytische Transformationsprozesse als sehr hoch einzuschätzen, vor allem bei Betrachtung der berechneten Halbwertszeiten von wenigen Tagen in der Umwelt (hervorzuheben photolytische Transformationen der Aminodinitrotoluole – Transformation läuft langsamer als bei TNT). Jedoch konnten in den Proben, die in Sommermonaten entnommen wurden, die Aminodinitrotoluole nicht nachgewiesen werden. Deshalb konnte davon ausgegangen werden, dass diese ebenfalls vollständig transformiert werden.

Fazit: Nach über 60 Jahren nach der Beendigung der Produktion können immer noch hohe Konzentrationen an STV nachgewiesen werden. Es wurde empfohlen, die am höchsten belasteten Bereiche zunächst mit herkömmlichen Sanierungsmethoden zu dekontaminieren (Auskoffern u.ä.). Anschließend können die natürlichen Schadstoffminderungsprozesse, vor allem die photolytische Transformation, für den Standort von großem Nutzen sein. Abschließend kann festgestellt werden, dass auf dem Standort „Werk Tanne“ in Clausthal-Zellerfeld ein hohes natürliches Schadstoffminderungspotential vorhanden ist. Auf dem Standort können zwar hohe Konzentrationen an sprengstofftypischen Verbindungen nachgewiesen werden, die jedoch beim Durchlaufen der Pfauenteiche durch mikrobielle und vor allem photolytische Transformationsprozesse sehr schnell transformiert werden.

## 7.8 „Bilanzierung eines kombinierten biologisch-chemischen Abbaus von <sup>14</sup>C-2,4,6-Trinitrotoluol (TNT)“

In einer weiteren Dissertation der Universität Paderborn von Mario Kröger 2002 wurde die Thematik „Bilanzierung eines kombinierten biologisch-chemischen Abbaus von <sup>14</sup>C-2,4,6-Trinitrotoluol (TNT)“ untersucht und erläutert [76].

In der Arbeit wurden in der „Zusammenfassung mit Ausblick - Kap. 7“ die folgenden Aussagen getroffen:

Mit einer im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Methode wurden zunächst die radioaktiv markierten TNT-Transformationsprodukte [U-Ring-<sup>14</sup>C]-2-ADNT, [U-Ring-<sup>14</sup>C]-4-ADNT, [U-Ring-<sup>14</sup>C]-2,4-DANT und [U-Ring-<sup>14</sup>C]-2,6-DANT in einem einzigen Syntheseschritt hergestellt. Dies gelang durch Reduktion von [U-Ring-<sup>14</sup>C]-TNT mit Bäckerhefe (*Saccharomyces cerevisiae*) bei 32°C innerhalb von fünf Tagen. Die Trennung der vier Substanzen erfolgte per präparativer Dünnschichtchromatographie, die Gesamtausbeute der Reaktion betrug 52%. Generell wurde die Reduktion in para-Position bevorzugt, es entstanden 25% 4-ADNT gegenüber 6% 2-ADNT,

und 19% 2,4-DANT gegenüber 2% 2,6-DANT. Bei entsprechender Steuerung der Regioselektivität wäre auch die vollständige Reduktion vom TNT zum 2,4-DANT als alleinigem Endprodukt möglich, was bei dem geringen Preis der Hefe eine interessante Alternative für die Entsorgung von TNT aus Delaborierungsmaßnahmen wäre.

Die radioaktiven ANTs wurden verschiedenen photochemischen Abbauverfahren zur Mineralisierung unterworfen. Vorher waren beim Abbau von TNT die Reaktionsbedingungen optimiert worden. Im photolytischen Abbau wurde  $H_2O_2$  in einer Konzentration von 1% mit dem UV-Licht einer Xenon-Lampe eingesetzt (UV- $H_2O_2$ ), beim Photo-Fenton-Abbau kam Eisen(II) in einer Konzentration von 15 mg/L dazu. Erstmals wurde die Mineralisierung dieser Verbindungen sowohl anhand der Abnahme der Radioaktivität im Reaktor als auch durch Analyse des insgesamt entstandenen  $^{14}CO_2$  verfolgt und bilanziert.

Beim UV- $H_2O_2$  Abbau nahm die Mineralisierungsgeschwindigkeit in der Reihenfolge

TNT << 2,6-DANT < 2-ADNT < 4-ADNT  $\approx$  2,4-DANT zu,

beim Photo-Fenton-Abbau in der Reihenfolge

TNT << 2,6-DANT < 2-ADNT  $\approx$  2,4-DANT < 4-ADNT.

Eine Aminogruppe in para-Stellung begünstigte also die Mineralisierung. Es konnte herausgearbeitet werden, dass ein erwarteter schnellerer Abbau der DANTs durch die Protonierung einer Aminogruppe gebremst wird. Im Vergleich der Abbauten untereinander war der Photo-Fenton-Abbau schneller als der UV- $H_2O_2$  Abbau, bei einem Fenton-Abbau ohne UV-Licht kam es bei der Reaktion mit TNT zu keiner Mineralisierung.

Das hier gefundene Ergebnis der schnelleren Mineralisierung der ANTs und der damit verbundene geringere Energieaufwand gegenüber einer direkten Mineralisierung von TNT war die Grundlage für das Konzept eines kombinierten Abbaus. In einer biologischen Stufe wurde dabei TNT zunächst zu den ANTs reduziert, um diese dann anschließend mit deutlich weniger Energie- und Chemikalienaufwand zu mineralisieren.

Als biologische Stufe wurde ein cometabolisches Reduktionsverfahren mit Belebtschlamm aus einer Kläranlage verwendet. Als optimale Rezeptur erwies sich dafür ein Verhältnis von Belebtschlamm: Cosubstrat (Saccharose): TNT von 100:10:1. Bei aeroben Abbauverhältnissen, die durch starke Belüftung erreicht wurden, erfolgte eine Reduktion des TNT bis zu den ADNTs innerhalb von 24 h, allerdings wurde dabei ein Teil der Nitroaromaten (30–35%) vom Schlamm adsorbiert. Durch Bilanzierung der Radioaktivität in einem solchen Abbau konnte nachgewiesen werden, dass etwa die Hälfte der adsorbierten ANTs irreversibel an den Schlamm gebunden waren, während der Rest durch Zentrifugation und Extraktion wieder in Lösung gebracht werden konnte. Hier wäre in Zukunft noch die Frage zu klären, ob und wann bei einer kontinuierlichen Beschickung des Schlammes mit TNT bzw. dessen Transformationsprodukten eine Sättigung und damit ein Nachlassen der Adsorption eintritt. Bei der anaeroben Verfahrensvariante wurde das TNT bis zum Hauptprodukt 2,4-DANT reduziert, eine Adsorption am Schlamm fand hier nicht statt.

Schließlich wurden mehrere kombinierte Abbauvarianten durchgeführt, in denen verschiedenen biologischen Vorbehandlungen eine Mineralisierung mit UV- $H_2O_2$  oder Photo-Fenton nachgeschaltet war. Erstmals konnte für solche Verfahren mit Hilfe der Radioaktivität eine komplette Bilanzierung vorgelegt werden. Durch Optimierung der Reaktionsbedingungen und des Produkttransfers zwischen biologischer und chemischer Stufe konnte die  $^{14}CO_2$ -Bildung verdoppelt werden, sodass schließlich mit UV- $H_2O_2$  sowohl nach aerober als auch anaerober biologischer Stufe eine ca. 40%ige Mineralisierung des TNT erreicht werden konnte. Mit Photo-Fenton gelang eine Mineralisierung bis zu 35%. Die Mineralisierung wurde zwar durch das Einbringen von gelöstem organischen Material aus den biologischen Abbauten verlangsamt, man findet jedoch in einem TNT-belasteten Abwasser ohnehin eine höhere Belastung an gelösten organischen Stoffen, die den Photoabbau erschweren. Die Ergebnisse zeigen, dass trotz dieser Erschwernisse in einem kombinierten Abbau eine höhere Mineralisierung erzielt werden konnte als durch direkte photochemische Oxidation des TNT.

Fazit: Insgesamt konnte durch diese Arbeit die Überlegenheit des entwickelten biologisch-chemischen Abbaus sowohl gegenüber einer rein photochemischen Behandlung als auch gegenüber anderen bisher bekannten kombinierten Verfahrensweisen in grundlegenden Laborexperimenten aufgezeigt werden. Der Mineralisierungsprozess konnte lückenlos verfolgt und bilanziert werden. In Zukunft können hierauf aufbauend in einem größeren Maßstab verfahrenstechnische Optimierungen am Abbau von TNT-belasteten Standortabwässern vorgenommen werden, um so ein großtechnisch anwendungsfähiges, rentables Abbauverfahren zur Mineralisierung von TNT in Abwässern zu erreichen.

## 7.9 „Entfernung von Sprengstoffen aus kontaminiertem Grundwasser: Analytik und Verfahrensentwicklung“

Die ältere Dissertation aus dem Jahr 1999 der Universität Hannover von Axel Saft beschäftigt sich mit der Thematik „Entfernung von Sprengstoffen aus kontaminiertem Grundwasser: Analytik und Verfahrensentwicklung“ [77].

In dem abschließenden Kapitel „Diskussion und Ausblick“ der Arbeit werden die Ergebnisse wie folgt zusammengefasst. Es sind zwei Verfahren zur Entfernung von Sprengstoffen aus kontaminiertem Grundwasser entwickelt worden. Das eine Verfahren basiert auf der Adsorption von STV an polymeren Adsorberharzen, insbesondere Lewatit EP 63. Das andere Verfahren arbeitet nach dem Prinzip der Flüssig-Extraktion.

Beiden Verfahren ist gemein, dass nach der Beladung der Säulen eine rasche Regeneration mit einer Waschflüssigkeit durchgeführt werden kann. Das ist aus ökonomischer wie auch aus ökologischer Sicht ein Vorteil dieser beiden Verfahren z.B. gegenüber Aktivkohleverfahren. Im Gegensatz zum Aktivkohleverfahren muss das Säulenmaterial nicht als Sondermüll deponiert werden, sondern kann mehrfach verwendet werden. Die Waschflüssigkeiten können thermisch entsorgt werden, wobei im Falle von LM4 eine Desensibilisierung mit Alkalilauge vorgeschaltet werden kann.

Mit dem Adsorberharz Lewatit EP 63 lassen sich alle ausgewählten Modellkomponenten aus Wasser entfernen, während Hexogen und Oktogen mit dem Flüssig-Extraktionsverfahren nicht zufriedenstellend entfernt werden können. Dies bedeutet, dass das Flüssig-Extraktionsverfahren nur bei Rüstungsalstandorten effektiv eingesetzt werden kann, an denen kein Hexogen oder Oktogen an STV vorgefunden wird.

Fazit: Das Adsorptionsverfahren ist für die Entfernung von Sprengstoffen aus kontaminiertem Grundwasser besonders vielversprechend. Vergleicht man die Anreicherungsfaktoren, d.h. das Verhältnis von gereinigtem Wasser zur benötigten Waschflüssigkeitsmenge, so zeigt sich nach den Untersuchungen die Überlegenheit des Adsorptionsverfahrens. Die Anreicherungsfaktoren sind bei der Adsorption um zwei bis drei Zehnerpotenzen höher als bei der Flüssig-Extraktion. Dies weist darauf hin, dass das Adsorptionsverfahren wesentlich wirtschaftlicher arbeiten kann als das Flüssig-Extraktionsverfahren.

Bis hier her sind in der Diskussion nur die chemisch-physikalischen Aspekte und die prinzipielle Möglichkeit der Aufreinigung von mit STV kontaminiertem Grundwasser anhand von Laborexperimenten und Modellrechnungen aufgezeigt worden.

Es wurde darauf verwiesen, dass sich zu diesem Zeitpunkt beide Verfahren in unterschiedlichen Entwicklungsstadien verfahrenstechnisch befinden. Für das Flüssig-Extraktionsverfahren wurde ein MPPE-Gesamtkonzept erarbeitet.

## Literaturverzeichnis

1. MUNR (1998): Rüstungsaltpasten im Land Brandenburg. 11/1998
2. BMVBS, BMVg (2010): Arbeitshilfen Boden- und Grundwasserschutz Planung und Ausführung der Sanierung von schädlichen Bodenveränderungen und Grundwasserverunreinigungen
3. Grummt T, Wunderlich H-G 2005: Gentoxikologische Bewertung von polaren Verbindungen, UBA FG II 3.6
4. Küchler F 2011: Probenahme und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei Bodenkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen, Freie Universität Berlin
5. Baden-Württemberg L (2001): UmweltSpezial, Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen, pp. Anhang 2.7 - Fachliche Hintergrundinformationen - Hinweise zum Umweltverhalten Explosivstofftypischer Verbindungen
6. Bayern L, LGA (2009): Maßnahmen zum Bodenschutz, Umgang mit schädlichen Bodenveränderungen - Sanierungsverfahren, pp. Bodenschutz 9
7. Schleswig-Holstein L (2011): Bericht über die in-situ-Begleituntersuchungen zur Munitionssprengung in der Ostsee
8. LUA (2000): Tagungsbericht., Brandenburgisches Symposium zur bodenschutzbezogenen Forschung. Landesumweltamt Brandenburg (LUA)
9. LUGV (2012): Arbeitshilfe „Grundwasserkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen im Land Brandenburg“, Behandlung, Aufnahmemechanismen, Abbauverhalten Stufe IA - Literaturrecherche. Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LUGV) Abt. Technischer Umweltschutz, Ref. Altlasten - T 6. -
10. Joos A, Knackmuss HJ, Spyra W (Editors), 2008: Leitfaden Natürliche Schadstoffminderung bei sprengstofftypischen Verbindungen., BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 5 Rüstungsaltpasten. IABG mbH, Berlin
11. Tierfelder W, Mehnert WH, Höring H (1996): Rüstungsaltpasten und Leukämierisiko? Bundesgesundheitsblatt 1/1996, 9-12
12. Dieter HH (1994): Kriterien und Konzentrationsvorschläge zur gesundheitlichen Bewertung von 35 Sprengstofftypischen Verbindungen und Abbauprodukten in Böden und Trinkwasser. WaBoLu-Hefte 07/1994
13. Dieter HH (2003): Kommentar zur Bewertung der Anwesenheit nicht oder nur teilbewertbarer Stoffe im Trinkwasser aus gesundheitlicher Sicht. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 46, 245-248
14. Grummt T, Dieter HH 2002: Untersuchungsbericht zur "Erfassung und Bewertung des gentoxischen Potenzials von Nitrosulfon- und Nitrobenzoesäuren", UBA FG II 4.7
15. Grummt T, Heinze R, Wunderlich H-G (2008): Weiterführende Untersuchung von Bewertungsrelevanten Parametern für Polare Nitroaromaten,

- Abschlussbericht vom April 2008. Länderfinanzierungsprogramm Wasser, Boden und Abfall 2006 Projekt-Nr. B 3.06
16. Grummt T, Wunderlich H-G, Chakraborty A, Kundi M, Majer B, Ferk F, Nersesyanyan AK, Parzefall W, Knasmüller S (2006): Genotoxicity of nitrosulfonic acids, nitrobenzoic acids, and nitrobenzylalcohols, pollutants commonly found in ground water near ammunition facilities. *Environmental and Molecular Mutagenesis* 47, 95-106
  17. UBA (2003): Bewertung der Anwesenheit teil- oder nicht bewertbarer Stoffe im Trinkwasser aus gesundheitlicher Sicht. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 46, 249-251
  18. LAWA 2004: Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser
  19. Wollin KM, Dieter H (2005): Neue Trinkwasser-Leitwerte für monocyclische Nitroverbindungen. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 48, 1289-1295
  20. UBA (2006): Bewertung monocyclischer Nitroverbindungen und ihrer Abbauprodukte im Trinkwasser. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 49, 701-703
  21. Bachmann G, Oltmanns J, Konietzka R, Schneider K, Rück F, Albrecht E (2007): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten, Loseblattwerk. Erich Schmidt Verlag
  22. Nishino SF, Spain JC, He Z (2000): Strategies for aerobic degradation of nitroaromatic compounds by bacteria: Process discovery to field application. In: Spain JC, Hughes JB, Knackmuss H-J (Editors), *Biodegradation of Nitroaromatic Compounds and Explosives*. Lewis Publishers, pp. 7-62
  23. Heiss G, Knackmuss HJ (2002): Bioelimination of trinitroaromatic compounds: immobilization versus mineralization. *Curr Opin Microbiol.* 5, 282-287
  24. Spanggord RJ, Spain JC, Nishino SF, Mortelsmans KE (1991): Biodegradation of 2,4-dinitrotoluene by a *Pseudomonas* sp. *Appl. Environ. Microbiol.* 57, 3200-3205
  25. Nishino SF, Paoli GC, Spain JC (2000): Aerobic degradation of dinitrotoluenes and pathway for bacterial degradation of 2,6-dinitrotoluene. *Appl. Environ. Microbiol.* 66, 2139-2147
  26. Johnson GR, Smets BF, Spain JC (2001): Oxidative transformation of aminodinitrotoluene isomers by multicomponent dioxygenase. *Appl. Environ. Microbiol.*, 5460 - 5466
  27. Haigler BE, Spain JC (1993): Biodegradation of 4-nitrotoluene by *Pseudomonas* sp. strain 4NT. *Appl. Environ. Microbiol.* 59 (7), 2239-2243
  28. Rhys-Williams W, Taylor ST, Williams PA (1993): A novel pathway for the catabolism of 4-nitrotoluene by *Pseudomonas*. *J. Gen. Microbiol.* 139, 1967-1972
  29. Qi-Zhao Y (1982): Discussion on TNT oxidation mechanism in nitric-sulfuric acid mixture. *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.* 21, 356-359

30. Zeyer J, Kocher HP (1988): Purification and characterization of a bacterial nitrophenol oxygenase which converts ortho-nitrophenol to catechol and nitrite. *Journal of Bacteriology* 170, 1789-1794
31. He Z, Spain JC (2000): Reactions involved in the lower pathway for degradation of 4-nitrotoluene by *Mycobacterium* strain HL 4-NT-1. *Appl. Environ. Microbiol.* 66(7), 3010-3015
32. Hofmann KW, Knackmuss HJ, Heiss G (2004): Nitrite elimination and hydrolytic ring cleavage in 2,4,6-trinitrophenol (picric acid) degradation. *Appl. Environ. Microbiol.* 70 (5), 2854-2860
33. Der-Landrat (2010): Bekanntmachung über die Allgemeinverfügung zum Verbot der Grundwasserförderung und -nutzung im Bereich Sythen-Lehmbraken in Haltern am See. In: Kreis-Recklinghausen (Hrsg.), AMTLICHE BEKANNTMACHUNGEN
34. LBB Mainz (2007): "TOPTHEMEN: ... Rüstungsalzlast Hallschlag" Eck.Punkt. 1, 25ff
35. Bausinger T 2007: Ausbreitung von Nitroaromaten über das Sickerwasser der Ausbreitung von Nitroaromaten über das Sickerwasser der ehemaligen Espagit AG in Hallschlag – Ein Beitrag zur geoökologischen Beurteilung eines kontaminierten Standortes ehemaliger Espagit AG in Hallschlag – Ein Beitrag zur geoökologischen Beurteilung eines kontaminierten Standortes, Universität Mainz, Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften.
36. UBA Cleaner Production Germany; Informationsportal zum Umwelttechnologietransfer
37. <http://www.hessen.de>
38. <http://www.rp-giessen.hessen.de>
39. <http://www.him-stadtallendorf.de/projekt/projekt.htm>
40. Kreis-Recklinghausen (seit 2010): Informationen zur Grundwasserverunreinigung WASAG. In: <http://www.kreis-re.de/default.asp?asp=shows Schlagw&zae=2003> (Hrsg.)
41. Halternzeitung (2013): Grundwassernutzungsverbot erweitert; Freibad Sythen kann mit Ausnahme rechnen. Halternzeitung.de 21. März
42. Wiethoff S (2012): Sythengrund; Die Quelle der Schadstoffe wurde ermittelt, HalternerZeitung
43. David L (2006): Das Sythener Werk der Wasag-Chemie AG. Dülmener Heimatblätter 1
44. Haas R, Möschwitzer G (1994): Rüstungsalzlasten - ein kommunales Problem. In: Hermanns/Walcha (Editor), Ökologische Altlasten in der kommunalen Praxis. Aufgaben der kommunalen Ökologie, . Deutscher Gemeindeverlag, Köln
45. Stadt-Leverkusen Informationen zur Grundwassersanierung Waldsiedlung. [http://www.leverkusen.de/rathaus/natur/Grundwassersanierung\\_Waldsiedlung.php](http://www.leverkusen.de/rathaus/natur/Grundwassersanierung_Waldsiedlung.php)
46. Stadt-Leverkusen (2011): Die Waldsiedlung - ein Wohngebiet mit industrieller Vorgeschichte: Informationen zur Untersuchung und Sanierung des

- Altstandortes der Sprengstofffabrik Carbonit AG in Leverkusen-Schlebusch, Umwelt
47. Anonymous (2002): Eine Historie mit viel Zündstoff, Kölner Stadt-Anzeiger, Köln
  48. Köppler J, Schneider U, Weingran C (2004): 15 Jahre Erkundung und Sanierung von Rüstungsaltslasten – eine Bestandsaufnahme Altlasten spectrum 1, 5-15
  49. Heerwagen G (1999): I. Weltkriegs-Munitionsfabrik, Eifler Sprengstoffwerke Aktiengesellschaft "Espagit" in Hallschlag (Eifel).  
<http://bildung.freepage.de/heerwagen/>
  50. Braedt M, Hörseljau H, Jacobs F, Knolle F (1998): Die Sprengstofffabrik "Tanne" in Clausthal-Zellerfeld. Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld
  51. Herrmann B 2008: Untersuchungen der Transformationswege von 2,4,6-Trinitrotoluol in Oberflächengewässern und deren Nutzen als natürliche Schadstoffminderungsprozesse an einem ehemaligen Rüstungsstandort. Dissertation Thesis, Universität Marburg, Fachbereich Chemie, Marburg
  52. Weber A, Tränckner S (2008): "Rüstungsaltslast Elsnig/Torgau" Überprüfung von Selbstreinigungspotenzialen in STV kontaminierten Grundwasserleitern insbesondere unter Berücksichtigung von Milieubedingungen am Standortbeispiel Torgau/Elsnig, Forschungsbericht zum FuE-Projekt. In: BMBF (Hrsg.), KORA TV5
  53. König W, Schneider U (1987): Nationalsozialismus in Nordhessen: Sprengstoff aus Hirschhagen, Schriften zur regionalen Zeitgeschichte, Gesamthochschule Kassel, pp. 277-311
  54. HMULV, StadtHessischLichtenau ( 2012): Hirschhagen Von einer der größten Sprengstofffabriken des Dritten Reiches zum Industriegebiet (Themenweg), Faltinfoblatt
  55. Oehl H 2006: Entstehung und Sanierung der Rüstungsaltslasten in Hirschhagen. Facharbeit Thesis, Freiherr-vom-Stein Schule, Hessisch Lichtenau, Fürstehagen
  56. HMULV, HIM-ASG (Editors), 2013: Boden gut gemacht - Die Sanierung der ehemaligen Sprengstofffabrik Hessisch Lichtenau., Wiesbaden
  57. Entenmann W, Niepmann (2013): Untersuchungen und Technikumsversuche zur Sanierung mit Nitroaromaten belasteten Grundwassers, Sythen, Dresdener Grundwassertage
  58. Haas R, Preuß J, von Loew E, Stork G (1989): Sprengstoffrückstände in Boden und Grundwasser auf dem Gebiet der ehemaligen Sprengstofffabriken in Stadtallendorf/Hessen, Expertengespräch Rüstungsaltslasten. UBA 43/94, Hannover
  59. HIM, HMULV (2005): Boden gut gemacht. Die Sanierung des Rüstungsstandortes Stadtallendorf
  60. HIM-ASG (2012): Stadtallendorf, Rüstungsaltsstandort. Jahresbericht 2012, 75ff"

61. HIM 2009: Prognose und Kontrolle des natürlichen Rückhalts und Abbaus von Nitroaromaten im Festgestein am Rüstungsaltsstandort Stadtallendorf; Abschlussbericht Teilvorhaben 5.2 "MONASTA"
62. HMULV 2000: Modellhafte Sanierung von Altlasten am Beispiel des TNT-Sanierungsprojektes Stadtallendorf / Hessen (MOSAL), BMBF
63. IfUA (1994): Gesamt-Gefährdungsabschätzung Rüstungsaltslaststandort DAG-Gelände Stadtallendorf, Abschlußbericht. HIM
64. Weingran C (2005): Die Sanierung der TRI-Halde. altlasten spektrum 2, 103-104
65. Tränckner S, Raimann S (2013): Entwicklung und Pilotversuche von In-Situ Alkohol-Waschverfahren zur effizienten Quellsanierung bei Standorten der Karbochemie und Rüstungsaltslasten, Dresdener Grundwassertage, pp. S. 45
66. Lieser U, Meiners G, Meßling A, Weingran C 1998: Perspektiven der Hydraulischen Sicherung des Rüstungsstandortes Stadtallendorf
67. Lieser U, Meßling A, Weingran C, Weis M, Uhlig U, Tränckner S (2012): Quellsanierung von Nitroaromaten – In-situ Testsanierung mit Alkohol. Altlasten spectrum 2, 5-10
68. Zimmermann Y 2007: Begleitende analytische Untersuchungen bei der Entfernung von sprengstoffrelevanten Substanzen aus Gewässern durch Adsorption an Polymeren mit räumlich globularer Struktur (RGS). Dissertation Thesis, Universität Hamburg, Hamburg, 199 pp
69. Schoenmuth B 2002: Freilandversuche zur TNT-Dekontamination und (<sup>14</sup>C)-TNT-Aufnahme durch Gehölze (BMBF-Verbundvorhaben Biologische Sanierung von Rüstungsaltslasten, TV 3.6), BMBF
70. Schoenmuth B 2006: Dendrotoleranz gegenüber STV in Altlastböden und Langzeitschicksal von (<sup>14</sup>C)-Trinitrotoluol und (<sup>14</sup>C)-Hexogen in Nadelgehölzen (KORA TV5 A1), BMBF
71. Schoenmuth B, Pestemer W (2004): Dendroremediation of trinitrotoluene (TNT). Part 1: Literature overview and research concept. ESPR - Environ Sci & Pollut Res 11, 273-278
72. Schoenmuth B, Pestemer W (2004): Dendroremediation of trinitrotoluene (TNT). Part 2: Fate of radio-labelled TNT in trees. ESPR - Environ Sci & Pollut Res 11, 331-339
73. Dobner I 2003: Der Einsatz mykorrhizierter Gehölze in biologischen Sanierungsverfahren unter dem Aspekt TNT-belasteter Böden. Dissertation Thesis, University Bremen
74. Hoffmann I 2002: Reinigung sprengstoffbelasteter Wässer mit Hilfe einer Pflanzenkläranlage. Dissertation Thesis, Universitätsbibliothek der TU München, 191 pp
75. Baumgarten D, Herrmann H (2006): Analysenverfahren – Fachgremium Altlastenanalytik – Bestimmung von ausgewählten sprengstofftypischen Verbindungen in Feststoffen aus dem Altlastenbereich. In: HLUG (Editor), Handbuch Altlasten, Wiesbaden, pp. 1-54

76. Kröger M 2002: Bilanzierung eines kombinierten biologisch-chemischen Abbaus von  $^{14}\text{C}$ -2,4,6-Trinitrotoluol (TNT). Dissertation Thesis, Universität Paderborn
77. Saft A 1999: Entfernung von Sprengstoffen aus kontaminiertem Grundwasser: Analytik und Verfahrensentwicklung, Universität Hannover



## Anhang 1: Fragebogen (Muster Anfrage mit Fragebogen)



**Musteranfrage per Mail an betroffene Wasserversorger bzw. Umweltbehörden:**

Sehr geehrter Herr Mustermann,  
Sehr geehrte Damen und Herren,  
wie aus dem beigefügten Schreiben des Ministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg zu ersehen ist, hat die IABG mbH im Jahr 2012 in einem ersten Arbeitsschritt die Arbeitshilfe „Grundwasserkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen im Land Brandenburg – Behandlung, Aufnahmemechanismen, Abbauverhalten - Stufe IA Literaturrecherche“ erarbeitet.

Im Bereich der Stadt X existierte die ehemalige Fabrik Y mit Umweltbelastungen, u.a. im Abwasser. Die bereits vorliegenden Daten bzw. Informationen und Ihre Erfahrungen im Umgang mit Rüstungsalstandorten könnten im Rahmen der Projektbearbeitung sehr hilfreich sein. Von unserer Seite wurden neben den Umweltbehörden gleichzeitig auch die Wasserwerke angeschrieben.

Aktuell geht die Studie mit der Stufe IB „Erarbeitung vertiefender Grundlagen“ in die Fortführung, wobei die praktisch verwendeten Verfahren zur Sanierung von sprengstofftypischen Verbindungen (STV) aus belastetem Rohwasser im Wasserwerk zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung gem. TrinkwV die grundlegende Fragestellung darstellt.

Hierbei sind von der IABG auf der Grundlage der Umfrageergebnisse betroffener Wasserwerke entsprechend des beigefügten Fragebogens insbesondere die Ziel- und Aufgabenstellung zur Ableitung technisch machbarer und wirtschaftlicher Lösungen hinsichtlich

- Darstellung der Anlagentechnik zur Reinigung anhand von Fließschemata
- Bewertung der Leistungsfähigkeit der derzeit gängigen und praktizierten Trinkwasser-Aufbereitung über Wasser-Aktivkohle
- Einhaltung der UBA-Leitwerte für Trinkwasser bezogen auf die einzelnen STV-Metabolite
- Betrachtung zur Wirtschaftlichkeit (Vergleich Kosten-Nutzen).

herauszuarbeiten.

Wir bitten daher um Bearbeitung des beigefügten Fragebogens. Sensible Daten werden selbstverständlich anonymisiert. Bestehen hierbei Ihrerseits detaillierte Vorgaben zur Handhabung zur Verfügung gestellter Daten und Informationen, bitten wir Sie freundlicher Weise, uns diese entsprechend mitzuteilen.

Falls Ihnen zu einzelnen Fragestellungen keine Daten zur Verfügung stehen sollten, ist auch eine Teilbearbeitung des Fragebogens hilfreich. Sollten keine Weitergabe der angefragten Daten möglich sein, reicht eine kurze schriftliche Rückmeldung dahingehend aus.

Selbstverständlich geben wir Ihnen auch gerne den Link zur Fachinformation des Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg zur Altlastenbearbeitung weiter:

Fachinformation Nr:20 Arbeitshilfe "Grundwasserkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen im Land Brandenburg" - Behandlung, Aufnahmemechanismen, Abbauverhalten - Stufe IA - Literaturrecherche (2013), mit dem Link: <http://www.lugv.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.310847.de>.

Über die Übermittlung weiterer Stellen bzw. Behörden, die uns im Rahmen des Projektes unterstützen könnten, würden wir uns ebenfalls freuen.

Hinsichtlich der Erarbeitung einer effektiven Arbeitshilfe würden wir uns sehr über Ihre Unterstützung freuen und bedanken uns im Voraus für Ihre Bemühungen

mit freundlichen Grüßen

**Recherche der IABG mbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg im Rahmen der Erarbeitung einer Arbeitshilfe zum Thema:**

„Grundwasserkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen im Land Brandenburg – Behandlung, Aufnahmemechanismen, Abbauverhalten - *Stufe I B: Erarbeitung vertiefender Grundlagen*“.

**Hinweise zum Lesen und Ausfüllen:**

Die Zielstellung besteht in der Erarbeitung einer Arbeitshilfe, die sowohl dem Auftraggeber als auch den zuständigen unteren Bodenschutzbehörden des Landes Brandenburg folgende Qualitätssicherungshilfen zur Verfügung stellen:

- Entfernung von sprengstofftypischen Verbindungen (STV) aus belastetem Rohwasser im Wasserwerk zur Sicherstellung der weiteren Versorgung mit Trinkwasser
- Darstellung von Beispielfällen bezogen auf die technischen Verfahren zur Entfernung von STV aus belastetem Grundwasser
- Auswertung der standortbezogenen Sanierungsverfahren nach Verhalten und Verteilung der STV im Grundwasserleiter, Transportverhalten, Charakteristik von Schadstofffahnen

Hierbei sind von der IABG auf der Grundlage der Umfrageergebnisse bei Wasserwerken entsprechend des beigefügten Fragebogens insbesondere die Ziel- und Aufgabenstellung zur Ableitung technisch machbarer und wirtschaftlicher Lösungen hinsichtlich

- Darstellung der Anlagentechnik zur Reinigung, möglichst anhand von Fließschemata
- Bewertung der Leistungsfähigkeit der derzeit gängigen und praktizierten Trinkwasser-Aufbereitung über Aktivkohle
- Einhaltung der UBA-Leitwerte für Trinkwasser bezogen auf die einzelnen STV-Metabolite
- Betrachtung zur Wirtschaftlichkeit (Vergleich Kosten-Nutzen).

herauszuarbeiten.

- - Um bei Ihnen existierende diesbezügliche Informationen einarbeiten zu können, bitten wir Sie, um Beantwortung der folgenden Fragen. Bitte tragen Sie Ihre Antworten mittels PC direkt ein bzw. fügen Sie die Infos in einer separaten Datei an.

**Fragebogen zu Belastungen von Wassergewinnungsanlagen/ Wasserentnahmestellen mit sprengstofftypischen Verbindungen (STV)**

Angaben zum Bearbeiter bzw. Dienststelle

Ort/ Datum:

Name des Bearbeiters:

Tel.-Nr.:

E-Mail:

Dienststellen- bzw. Behördenadresse:

1. Zuständigkeit der Wassergewinnungsanlagen mit genauer Anschrift und Ansprechpartner:

Name der Wassergewinnungsanlage:

Anschrift: .....

.....

.....

Ansprechpartner: .....

2. Welche Brunnen/ Wasserentnahmestellen stehen dem Wasserwerk aktuell zur Verfügung

Anzahl der Brunnen: .....

In welchem GWL ausgebaut mit Meterangaben unter GOK

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Wie weit reicht das Einzugsgebiet der Entnahmestellen und werden Teile von Rüstungsaltsstandorten mit vermuteten bzw. nachgewiesenen STV-Belastungen tangiert (evtl. Darstellung in einer Karte, graphische Abgrenzung)?

.....

3. Welche Untersuchungsparameter werden standardmäßig beim Rohwasser abgeprüft (insbesondere bezogen auf STV)?

.....  
.....  
.....

4. Gibt es für die Wasserwerke Richtlinien zur Wasserentnahme und Aufbereitung bei mit STV belastetem Rohwasser und wenn ja, welche?

.....  
.....  
.....  
.....

Zuständige Behörde/Stelle, die die Richtlinie erlassen hat (wenn möglich, mit Ansprechpartner)?

.....  
.....  
.....  
.....

5. Welche Prüfwerte wurden für welche Einzelparameter der STV festgeschrieben?

.....  
.....  
.....  
.....

6. Gibt es Anlagen, bei denen auch auf STV untersucht wurde (Parameter bzw. Anlagen)?

.....  
.....  
.....

.....

7. Gibt es Standard-Aufbereitungsmethoden für STV- belastetes Rohwasser und wenn ja, welche?

.....  
.....  
.....

8. Wurden Aufbereitungsmethoden zur Eliminierung von STV eingesetzt und wenn ja, welche?

.....  
.....

9. Wurden Brunnen/Wasserentnahmestellen aufgrund problematischer Prüfwerte aus der Nutzung genommen (mit Angabe entsprechender Problemparameter, auch außerhalb der STV)?

.....  
.....  
.....

10. Wie wurde die Trinkwasserversorgung aufrecht erhalten (Einschränkungen der Wasserförderung, Aufbereitung des Rohwassers, [zeitweise] Nutzungsaufgabe von einzelnen Brunnen, komplette Nutzungsaufgabe des WW – z.B. durch Umbindung der Trinkwasserversorgung)?

.....  
.....  
.....

---

**ProjektbearbeiterIn:**

**IABG mbH** -Niederlassung Berlin

Alt Moabit 94

10559 Berlin

Annette Joos

☎: 030/293991-27

☎: 030/293991-66

E-Mail: [ajooos@iabg.de](mailto:ajooos@iabg.de)

Frank Huckert, IABG Außenstelle Trier

☎: 0651/8242177

☎: 0651/8242075

E-Mail: [Huckert@iabg.de](mailto:Huckert@iabg.de)

Im Auftrag des:

**Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg**

Abteilung Technischer Umweltschutz; Referat T6

Seeburger Chaussee 2

14476 Potsdam