Bericht über die
in-situ-Begleituntersuchungen zur Munitionssprengung
in der Ostsee
vom
8.2. – 18.3.2010

Ausschreibungsnummer: 4121.3-2010-32F, Aktenzeichen: 0608.451002

Erstellt durch das

Büro für Umweltgeologie & Sicherheitsforschung

pfeiffef@web.de

für das

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR)

Hamburger Chaussee 25 in 24220-Flintbek

Abteilung Gewässer, Dezernat Küstengewässer

Inhalt

1	Einleitung: Veranlassung der Untersuchung	6
2	Durchführung: Untersuchungsgegenstand und Untersuchungsmittel	9
2.1	Beschreibung der Passivsammler und Kollektionsmethode	10
2.2	Nachweis von sprengstofftypischen Verbindungen (STV) im Wasser mit Passivsammlern	13
2.3	Messaufbau: Anordnung der Passivsammler im Seegebiet	13
2.4.	Sprengtechnische Voraussetzungen	14
2.4.1	Unterschiedliche Umsetzung der Ladungen (detonation-order)	15
2.4.2	Sprengstoffchemische Voraussetzungen	17
2.4.3	TNT-Umsetzungsrückstände	20
2.4.4	Reichweite der Sedimentationsvorgänge	22
3	Ergebnisse der Passivsammleranalytik	24
3.1	Zusammenfassung Passivsammleranalytik	26
4	Hydrochemische Bedingungen im Untersuchungszeitraum	27
4.1	Allgemeine Beschreibung des Zustandes im Wasser	27
4.2	TNT-Abbau	28
4.2.1	Eliminierung	28
4.2.2	Reduktion	28
4.2.3	Ringspaltung	28
4.3	TNB-Abbau	28
4.3.1	Eliminierung	28
4.3.2	Reduktion	29
4.4	RDX-Abbau	29
4.5	NBS-Abbau	29
4.6	Redoxchemische Bedingungen des STV-Abbaus	29
4.7	Sorptionseffekte von STV	29
4.8	Medium Wasser	30
4.9	Suspensionsfracht	30
4.10	Zusammenfassung Hydrochemie	30

5 Beschreibung der marinen Bedingungen im Untersuchungszeitraum 32

6 Zusammenfassung und Interpretation 33
6.1 Zusammenfassung 33
6.2 Interpretation der Ergebnisse 34

7. Glossar 36

1 Einleitung: Veranlassung der Untersuchung

Das Symposium "Neue Methoden der Munitionsbeseitigung in Nord- und Ostsee" des Naturschutzbundes Schleswig-Holstein, das in Kiel am 19. Oktober 2007 stattfand, hat die Problematik der in Nord- und Ostsee versenkten Kampfmittel wieder in die Diskussion gebracht. Zur Sachverhaltsklärung der Dämpfungswirkung von Blasenschleiern wurde bereits 2009 Versuche durchgeführt und für 2010 mit Schießwolle 39 (SchW 39) enthaltenden Marinekampfmitteln geplant. Für die Versuchsreihe war die Unterwassersprengung von 15 Minen vorgesehen. Das für die Gefahrenabwehr zuständige Amt für Katastrophenschutz des Landes Schleswig-Holstein führte auch im Frühjahr 2010 zusammen mit dem Kampfmittelräumdienst des Landes und der Firma Hydrotechnik GmbH, Lübeck, sowie weiteren Institutionen (Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen der Bundeswehr – WTD-71, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik) eine Serie von *Testsprengungen* unter Erprobung der sog. Blasenschleiertechnik im Munitionsversenkungsgebiet "Kolberger Heide" in der Ostsee vor Heidkate/ Krs. Plön mit Großladungen durch. Ziel war es, mit Hilfe der "Blasenschleiertechnik" den bei Vernichtungssprengungen von Altmunition entstehende Energieflussdichte unter Wasser wirksam zu minimieren (Heinze 1987). In diesem Zusammenhang sollte auch eine Untersuchung auf mögliche Freisetzung von sprengstofftypischen Verbindungen (STV) in die Meeresumwelt mit durchgeführt werden. Das Problem der gelegentlich vorkommenden Selbstdetonationen verschiedener Kampfmittel ist bekannt und wird aus unterschiedlichen Perspektiven diskutiert (Hoffmann 1956, Raha 1991, Bohn 2007, FRS 2007 und Pfeiffer 2007 und 2008). Solche Vorgänge sind schon seit den 50er Jahren wiederholt gemeldet worden.

Damit einhergehend stellt sich natürlich auch für jede Versuchsserie die Frage nach den Auswirkungen, die entsprechende Vernichtungssprengungen für die Meeresumwelt haben können. Dabei ergeben sich verschiedene Gefährdungspotenziale durch die Sprengung mit physikalischen Effekten selbst sowie durch deren Folgeprodukte (Pfeiffer 2009).

Das vor *Heidkate* im Februar 2010 von der BfUS mit Passivsammlern durchgeführte STV-Monitoring hat für den Untersuchungszeitraum mäßig reduzierende Verhältnisse dokumentiert.

Bei den gegebenen redoxchemischen Bedingungen in Wasser und Sedimentauflage, kann eine Spurenbelastung des Wassers mit STV reduktiv verändert werden. Eine von der Temperatur beeinflusste Transformation der stofflichen Zusammensetzung durch Reduktion von Nitrogruppen und photolytische Einwirkung ist möglich.

Es war geplant, die Sprengungen der Altmunition Mitte Februar 2010 durchzuführen, dabei sollte auch der „Blasenschleier" zur Minderung des Unterwasser-Schalldrucks optimiert werden. Als Entscheidungsgrundlage für den genauen Beginn wurde die für diese Jahreszeit nur unsicher vorhersagbare Seewetterlage herangezogen. Am 8.2.2010 wurde das Versuchsgebiet vor Heidkate angelaufen und bis zum Dämmerungseintritt war die Durchführung der vorbereitenden Arbeiten bei zeitweise eingeschränkter Sicht möglich; allerdings stellte die einsetzende Eisbildung eine erhebliche Behinderung der eingesetzten Kräfte dar. Insgesamt wurden für die Begleituntersuchung 18 Passivsammler im Seegebiet ausgebracht (Schema siehe Abb. 7, Seite 14)

Abb. 1: Vorbereitung der Passivsammler-Ausbringung unter erschwerten Bedingungen; Eisbildung.

Der Kampfmittelräumdienstes (KRD) des Landes Schleswig-Holstein konnte eine Anzahl Ankertauminen mit je 250 - 300 kg des Marinesprengstoffs *Schießwolle 39* sprengen. Alle Ladungskörper detonierten. Soweit die chemisch-analytische Überwachung möglich war, sind die Umsetzungen nahezu vollständig verlaufen. Während der anschließenden Kollektionszeit bis zur Bergung der Sammler durch den KRD Mitte April 2009 gingen seewetterbedingt leider 12 der 18 ausgebrachten Passivsammler verloren.

Literatur:

ANON. (2007): Munitions Dumping at Beaufort's Dyke. — Fisheries Research Service, FRS Marine Laboratory; Aberdeen, UK.

BOHN, A. M. (2007): Wenn Sprengstoff älter wird, wird er auch gefährlicher? Kampfmittelbeseitigung und der Faktor Zeit. Untersuchungen zur Veränderung in der Empfindlichkeit. — Fachtagung 2007 `Kampfmittelbeseitigung`, Bad Kissingen.

HEINZE, H. et al. (1987): Sprengtechnik. — pp.461; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

HOFMANN, F. (1956): Kampfmittelbeseitigung in Schleswig Holstein. — Explosivstoffe **4**, 584 – 589.

PFEIFFER, F. (2007): Unterwassersprengungen als unvollständiger Verbrennungsprozess - Welche bedenklichen Stoffe gelangen bei Sprengungen ins Meer? — Büro für Umweltgeologie & Sicherheitsforschung, NABU-Symposium, Kiel.

PFEIFFER, F. (2008): Bericht über die in-situ-Begleituntersuchungen zur Munitionssprengung in der Ostsee vom 14.04.2008 – 18.04.2008. — Marburg.

PFEIFFER, F. (2009): Bericht über die in-situ-Begleituntersuchungen zur Munitionssprengung in der Ostsee vom 18.02.2009 — Marburg.

RAHA, K., CHHABRA, J.S. (1991): Static Charge Development on Explosives. — Def. Sic J., **41**, (1), pp. 21-25.

2 Durchführung: Untersuchungsgegenstand und Untersuchungsmittel

Das Büro für Umweltgeologie & Sicherheitsforschung (BfUS) ist am 21.01.2010 vom LLUR mit einer Begleituntersuchung zu Munitionssprengungen in der Ostsee beauftragt worden (Ausschreibungsnummer: 4121.3-2010-32F, Aktenzeichen: 0608.451002). Dazu wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber die Probenahme für den stationären Einsatz von Passivsammlern in dem Munitionsversenkungsgebiet "Kolberger Heide" in der Ostsee (vor Heidkate, Krs. Plön) vorgesehen. Mit einem *zeitlich integrierenden* Sammelverfahren wurde untersucht, ob im Umfeld der Versuchssprengstelle auf der Position *54°27,6405' N und 10°19,8933' E* sprengstofftypische Verbindungen (STV) im Wasser nachgewiesen werden können.

Arbeiten auf See

Um die Passivsammler auf See in die jeweiligen Messpositionen auszulegen und nach Versuchsende wieder bergen zu können, war die technische Unterstützung durch den KRD des Landes Schleswig-Holstein und das Wasser- und Schiffahrtsmt Lübeck, Außenstelle Kiel-Holtenau, erforderlich. Es wurden die "Bussard", "Oland", "Haithabu" sowie verschiedene Arbeitsplattformen der Bundesmarine und der WTD71 eingesetzt. Die hydrodynamischen Effekte und Strömungseffekte der einzelnen Sprengungen wurden von der "Oland" und "Haithabu"" aus beobachtet. Logistische Basis der UW-Schallmessgruppe war die "Bums" diejenige der Fa. Hydrotechnik war das Landungsboot "L-765".

Laborarbeiten und Auswertung

Die geborgenen 6 Passivsammler wurden am 11.03.2010 im Labor aufbereitet. Dazu wurde je zweimal aus einem Aliquot Passivsammlermasse pro Probe ein Extrakt hergestellt und mittels HPLC/DAD auf folgende zehn STV untersucht:

Hexogen (RDX)	2,4,6-Trinitrotoluol (2,4,6-TNT)
Pentaerythrittetranitrat (PETN)	2-Amino-4,6-dinitrotoluol (2-A-4,6-DNT)
2,4-Dinitrotoluol (2,4-DNT)	4-Amino-2,6-dinitrotoluol (4-A-2,6-DNT)
2,6-Dinitrotoluol (2,6-DNT)	Hexanitrodiphenylamin (Hexyl)
1,3,5-Trinitrobenzol (1,3,5-TNB)	Dibutylphtalat (DBP)

Tab. 1: Liste der untersuchten Sprengstoffe und sprengstofftypischen Verbindungen (STV).

Da auch das in den Schlagladungen verwandte PETN als Phlegmatisierungsmittel 10 – 12 % Phthalate enthält, wurden die Passivsammler (PS) auch auf Dibutylphthalat (DBP) als Tracersubstanz untersucht.

2.1 Beschreibung der Passivsammler und Kollektionsmethode

Für das Monitoring wurden *gaiasafe*-Passivsammler (s. Abb. 2) verwendet. Dabei handelt es sich um ein eigens für analytische Zwecke konditioniertes Aktivkohlepapier.

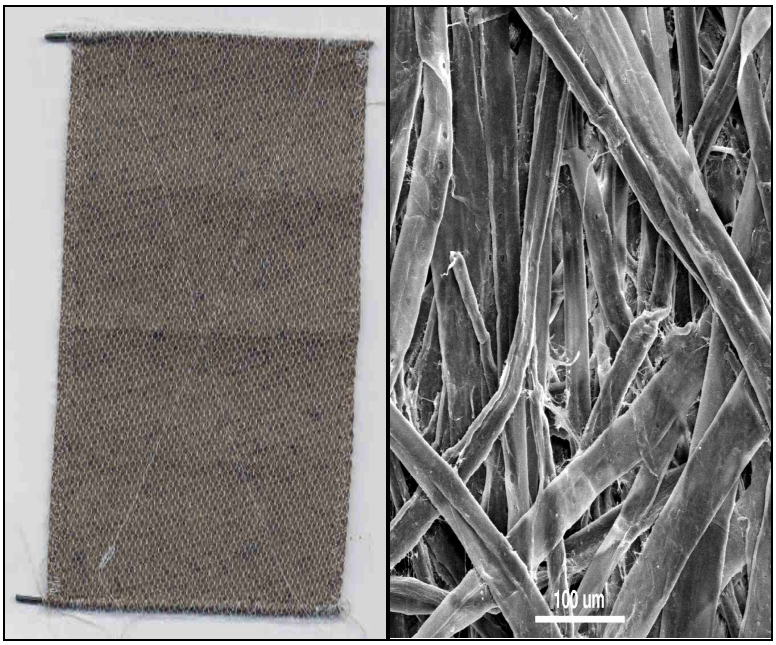

Abb. 2: Passivsammler ohne Drahteinhausung.

Nach Einbringung eines PS in das zu beprobende Medium werden kontinuierlich organische Substanzen und Schwermetalle in dem Aktivkohlepapier gesammelt. Abb. 3 zeigt ein Beispiel für den Verlauf der Sorptionskinetik von 2,4,6-TNT.

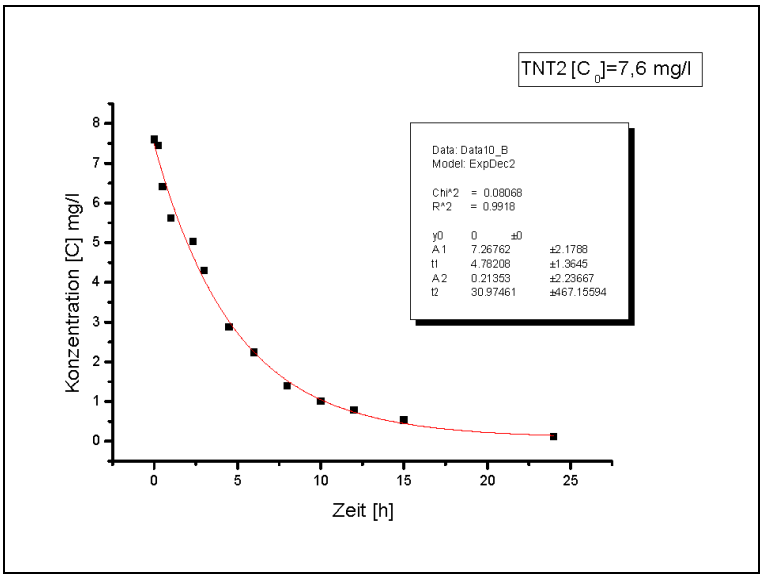

Abb. 3: Sorptionskinetik von 2,4,6-TNT.

Da diese Passivsammler direkten Wasserkontakt haben, ist ein *zeitlich integrierendes* Monitoring auf einfache Weise möglich, *Salzkonzentrationen* bis zu Gehalten von 140 mg/l stören die Sorptionskinetik nachgewiesenermaßen nicht. Es werden im untersuchten Medium allerdings Adsorptionsfrachten und nicht Konzentrationen bestimmt. Auf diese Weise ist ein *relativer* Vergleich der STV-Belastung der einzelnen PS möglich.

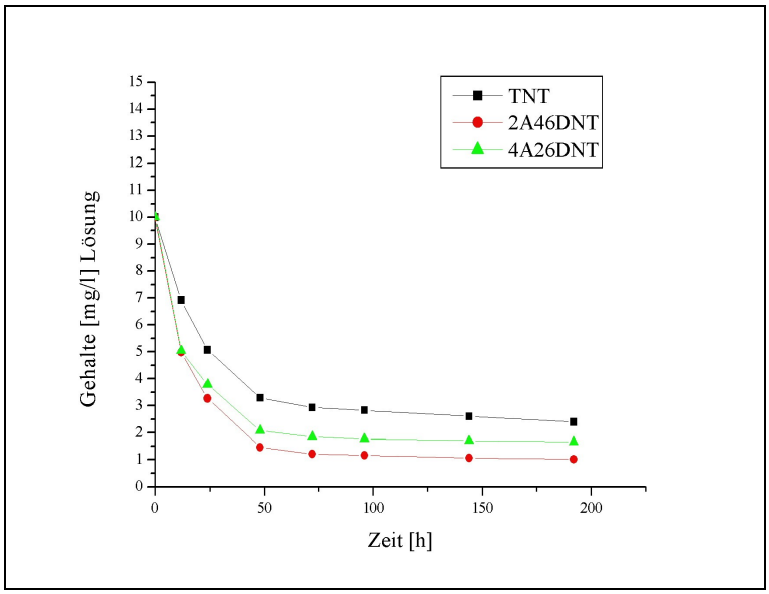

Abb. 4: Ähnlichkeit der STV-Sorption an PS aus einer Lösung.

Für einen *absoluten* Vergleich sind zusätzliche Kalibrierungen zur Erfassung der einzelnen Messstellencharakteristiken und zur Bestimmung der jeweiligen Umrechnungsfaktoren notwendig. TNT und einige Metabolite (2A-4,6-DNT und 4A-2,6-DNT) weisen ähnliche Sorptionskinetiken auf (s. Abb. 4).

Konventionelle Beprobungsmethoden können dem gegenüber zu erheblichen Fehlern in der Mengenbilanzierung von STV führen (Haas & Pfeiffer 2006, Börke & Haas 2007). STV-Frachten müssen nicht notwendigerweise zum Wasservolumen bzw. den Gehalten aus Einzelproben proportional sein. Die durchgehend mit PS bestückte Messstelle einer Referenzrüstungsaltlast zeigte erhebliche Schwankungen der STV-Fracht im Verhältnis zum Wasservolumen (s. Abb. 5):

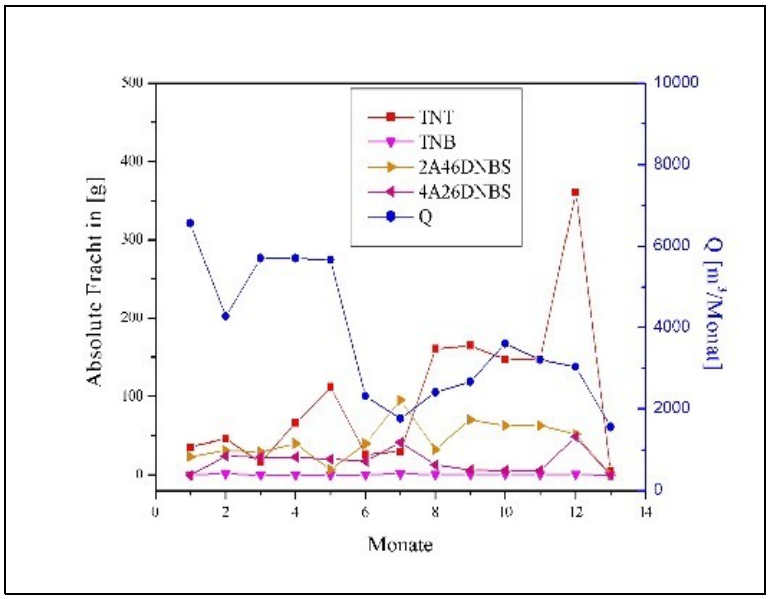

Abb. 5: Wechselnde Relation von Frachtrate zu Wasservolumen.

Die Validierung der verwendeten *gaiasafe*-Passivsammler erfolgte über ein BMBF-Projekt des Teilverbundes (TV) 5 Rüstungsaltlasten (Haas 2008).
Eine sachgerechte Validierung von Material für chemisch analytische Untersuchungen auf definierte Zielsubstanzen, hier STV, ist nur mit erheblichem Forschungsaufwand darstellbar.
Die für dieses STV-Monitoring genutzten Passivsammler wurden durch Labor- und Feldversuche sowie Ringversuche zur Adsorption, Desorption und Wiederfindung von STV mit Einzelsubstanzen geprüft. Das Resultat dieses mehrjährigen Forschungsprojektes war die damit nachgewiesene Eignung der PS für das Monitoring auf sprengstofftypische Verbindungen (Haas 2008).

2.2 Nachweis von STV im Wasser mit Passivsammlern

Um ein definiertes Wasservolumen mit Passivsammler zu untersuchen, ist es erforderlich, ein zwei- oder dreidimensionales Netz von Messpositionen einzurichten. Auf jeder dieser Positionen wird ein Passivsammler über den gesamten Versuchszeitraum eingesetzt. Zur Verkürzung der Adaption an das Seewasser wurden die PS, nach Absprache mit dem LLUR, für 24 h mit einer 18 ‰ Salzlösung vorbehandelt.

Für diesen Untersuchungsauftrag war es zweckmäßig, die PS räumlich in bestimmter Weise anzuordnen (s. Abb. 7). Dazu wurden jeweils zwei PS in unterschiedlichen Wassertiefen am Halteseil einer Kleinboje befestigt. Bei einer Wassertiefe von ca. 20 m wurde je ein PS etwa 2 m unter der Wasseroberfläche und ein zweiter PS etwa 2 m über Grund pro Messposition eingebaut. Die Passivsammler verblieben für mehr als 4 Wochen im Munitionsversenkungsgebiet "Kolberger Heide". Während dieser Kollektionszeit herrschten mehrdimensionale Strömungsverhältnisse. Mit der gewählten Anordnung der eingesetzten Zahl an Passivsammlern wurde das Untersuchungsvolumen von ca. 500.000 m^3 analytisch grob abgedeckt.

2.3 Messaufbau: Anordnung der Passivsammler im Seegebiet

Die Passivsammler wurden am 8.02.2010 im Munitionsversenkungsgebiet "Kolberger Heide" ausgebracht. Abb. 6 zeigt einen Kartenausschnitt mit der Lage der Sprengposition.

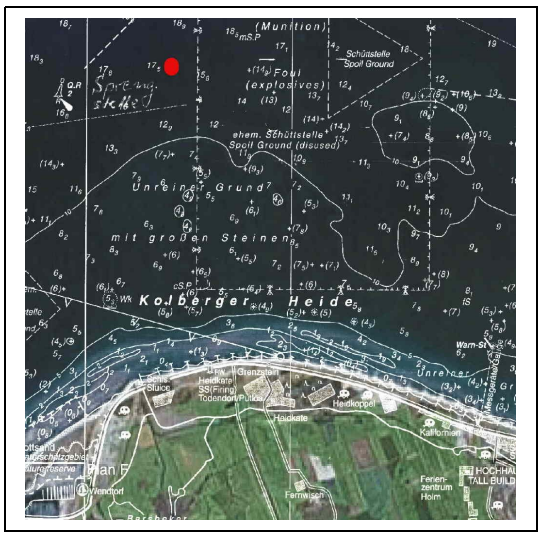

Abb. 6: Lage der Sprengstellen (rot).

Von der Sprengposition auf *54°27,6405' N und 10°19,8933' E* ausgehend wurden die PS entlang von drei Traversen positioniert: T_1 und T_2 und T_3 mit PS in 20 m, 50 m und 100 m Abstand. Dabei waren die Traversen T_1 auf 90°, T_2 auf 180° und T_3 auf 270° zu N orientiert (s. Abb. 7).

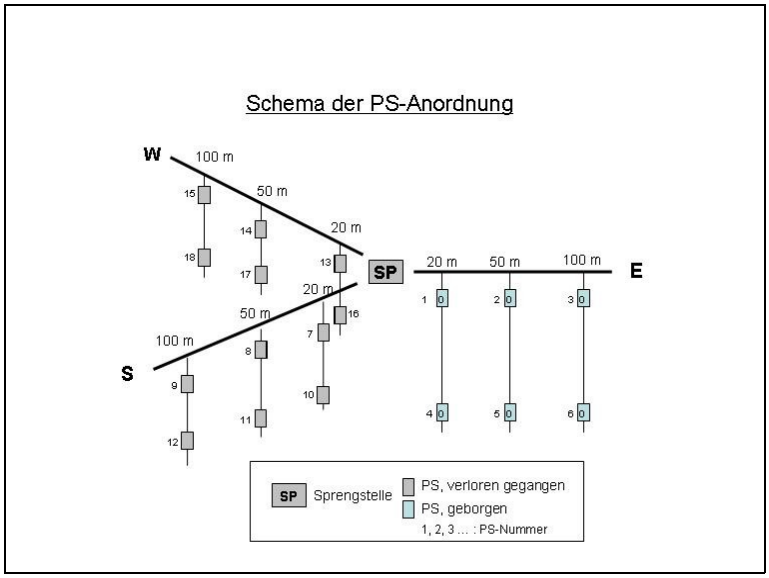

Abb. 7: Anordnung der PS auf den drei Traversen T_1 (E), T_2 (S) und T_3 (W).

Die Geometrie der Anordnung der Passivsammler war von verschiedenen Voraussetzungen bestimmt, welche nachfolgend beschrieben werden.

2.4 Sprengtechnische Voraussetzungen

Die voraussichtliche Sprengwirkung darf die PS nicht beschädigen. Deshalb wurde ein Mindestabstand aus dem Sprenggasblasendurchmesser errechnet, ab dem kein erheblicher Schaden mehr an den PS zu erwarten war. Grundlage der Berechnung war die Annahme, dass sich bei den großen Sprengstoffmengen der Versuchssprengungen (um 130 bis 150 kg TNT-Anteil – der Gesamtanteil an sprengkräftigen Komponenten ist mit bis zu 240 kg weit höher) in 20 m Wassertiefe eine kugelförmige Gasblase mit einem Minimaldurchmesser von 6 bis 8 m bilden wird. Ein Mindestabstand von 20 m zum Sprengpunkt war daher zweckmäßig.

Durch die Verwendung der Blasenschleiertechnik war mit deutlich reduziertem Detonationsspitzendruck zu rechnen (HEINZE 1987, SCHMIDTKE 2009).

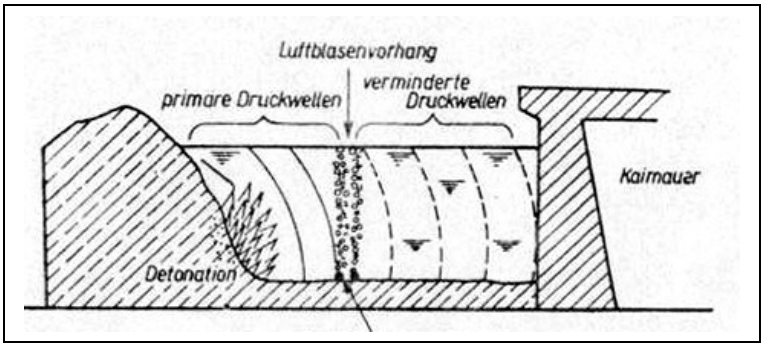

Abb. 8: Wirkungsprinzip des Blasenschleiers (Heinze 1987).

Alternative Sprengverfahren durch Richteffekte waren nicht vorgesehen.

2.4.1 Unterschiedliche Umsetzung der Ladungen detonation-order/ Detonationsordnung

Energetische Materialien, eben auch Sprengstoffe, können sich auf verschiedene Arten umsetzten und dabei Energie abgeben. Jeder einzelnen Umsetzungsform sind physikalisch definierte Umsetzungserscheinungen zugeordnet. Vereinfacht beschrieben handelt es sich um zeitabhängige

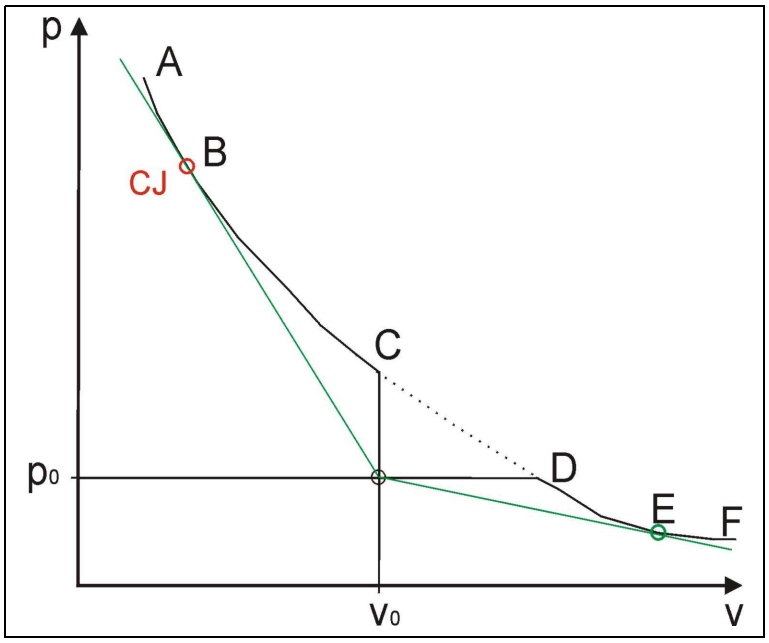

Abb. 9: Hugoniot – Kurve; Druck (p) gegen Strömungsgeschwindigkeit (v) der Reaktionsprodukte.

Änderungen von Druck- und Strömungsgeschwindigkeit der Umsetzungsprodukte was in Abb. 9 zusammengefasst dargestellt ist. Entlang der durchgezogenen schwarzen Kurvenabschnitte ändert sich die Entropie der Umsetzungsprodukte. Die Zustände der punktierten Linie CD sind praktisch nicht verwirklicht.

Grundsätzlich sind folgende Umsetzungen möglich:

- Starke Detonation > AB
- Schwache Detonation > BC
- Schwache Deflagration > DE
- Starke Deflagration > EF

Die *starke Detonation* AB eines Festkörpers/Sprengstoffes wird auch als *high-order detonation* bezeichnet. Hier bleibt die Strömungsgeschwindigkeit der Umsetzungs- (Reaktions) produkte hinter der Umsetzungsfront im Unterschallbereich. Solche Umsetzungen laufen meist nahezu vollständig ab, es verbleiben nur noch Sprengstoffspuren in der Umwelt, weil die auslösende Stoßwelle stabil durch die gesamte Ladung läuft (s. Abb. 10).

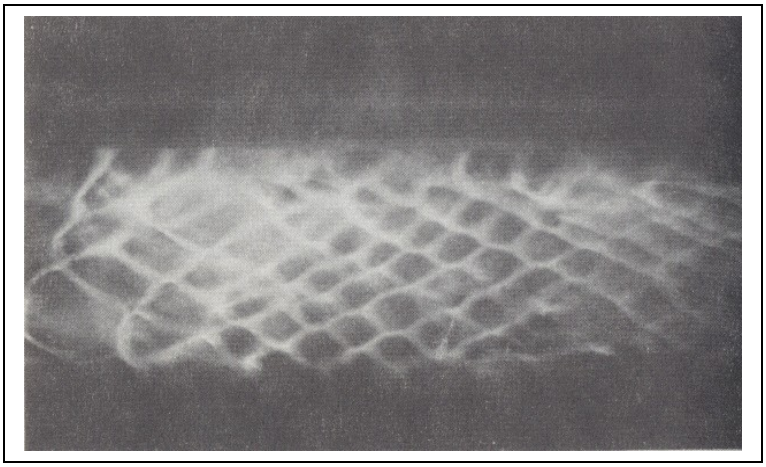

Abb. 10: Unbehinderte transversale Stoßwelle durch einen TNT-Block (HOWE, FREY and MELANI 1976).

Im Untersuchungszeitraum wurden *keine* Sprengstoffspuren detektiert. Obwohl nicht generell von durchhaltend starken Detonationen bei der Umsetzung einzelner Ladungen auszugehen ist. Dabei trägt die sprengstoffchemische Zusammensetzung der Ladungskörper durch Nachverbrennungseffekte, infolge verstärkter positiver Wärmetönung, zur Rückstandsfreiheit bei (s.2.4.2).

Zusätzlich ist diese Umsetzungsform unter Wasser seebodennah durch Bildung einer großvolumigen Gasblase gekennzeichnet die u.a. Ursache für eine charakteristische, meist die Wasseroberfläche schlauchartig durchbrechende, Auswurfmasse ist.
Damit geht eine intensive Durchmischung von Wasser, Sediment und Umsetzungsrückständen einher. Umsetzungsrückstände sind meist gasförmig, im Falle des Marinesprengstoffs Schießwolle 39 kommen noch kondensierte (feste) Aluminiumoxidmineralphasen hinzu, da pro Detonation bis zu 60 kg Aluminium umgesetzt werden.

Die *schwache Detonation* BC kann instabil verlaufen oder abrupt enden, obwohl noch Sprengstoff vorhanden ist. Dabei verbleibt der nicht umgesetzte Sprengstoff in der Umwelt. Zur Abschätzung des daraus entstehenden Kontaminationspotenzials ist die genaue Kenntnis über den Erhaltungszustand des nicht umgesetzten Sprengstoffs wesentlich. Aus der Praxis sind verschiedene Erhaltungszustände bekannt. Generell ist die Partikelgröße für Transportreichweite und Metabolisierung des Sprengstoffs ein wesentlicher Faktor.

Deflagrationsvorgänge DF unter Wasser bewirken eine teilweise Umsetzung, eine Zerlegung der Ladung ohne vollständige Reaktion ist wahrscheinlich. Zumal, wenn wasserlösliche Komponenten aus dem Gefüge der Sprengstoffzubereitungen, hier Ammoniumnitrat (AN) und Hexylsalze, ausgelaugt sein können. Deflagrationsvorgänge können in eine Detonation, üblicherweise low-order, übergehen.

2.4.2 Sprengstoffchemische Voraussetzungen

Es wurden Sprengversuche mit so genannten Ankertauminen von ca. 300 kg Ladungsgewicht, bestehend aus Schießwolle 39, durchgeführt. Dieser Sprengstoff besteht nominell aus den Komponenten Trinitrotoluol (TNT) 45%, Hexyl 5%, Aluminiumpulver 20% und Ammoniumnitrat 30% (Stettbacher 1943). Ein großer Anteil Aluminiumpulver an der Sprengstoffmischung bedingt bei starker Detonation eine Steigerung der Reaktionstemperatur der Sprenggase, wobei mit abnehmender Korngröße der Al-Phase die Umsetzungstemperatur ansteigt (Brousseau 2001).

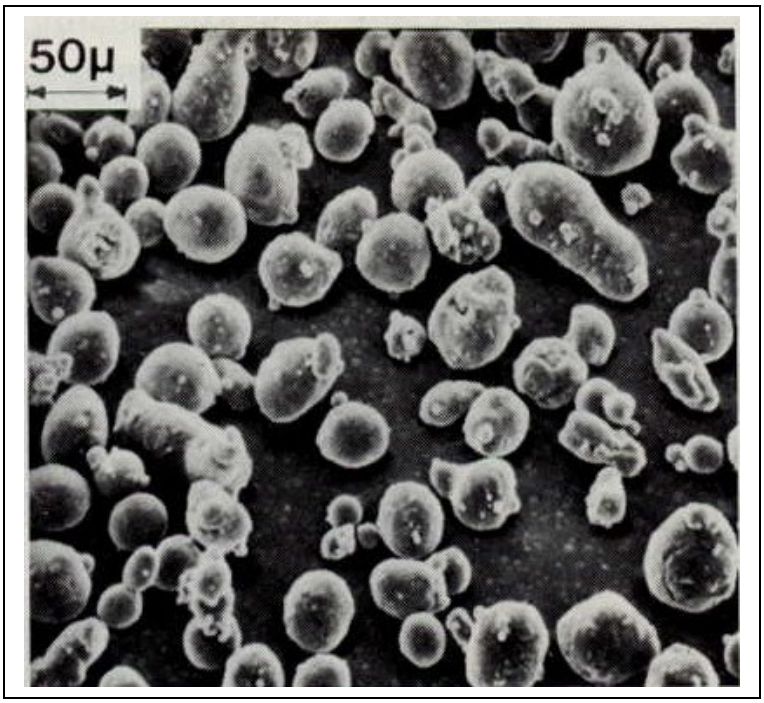

Abb. 11: Aluminiumpartikel auf einem Ladungskörper (PRICE 1984).

Können diese Sprenggase infolge einer Verdämmung nicht entweichen, führt das zu einer intensiven zweiten Oxidation von Detonationsprodukten in der oszillierenden Gasblase.

Abbildung 12 zeigt die Umsetzung von Tritonalen mit Aluminiumzuschlag im µm (linke Säule) und nm Bereich (rechte Säule). Die Bilder entstanden nach 18, 31, 59 und 81 µ-sec. Die Ausbreitung der Stoßwellen ist ähnlich, die Zonen der hohen Reaktionstemperaturen (s. helle Flammzone) sind unterschiedlich ausgebildet.

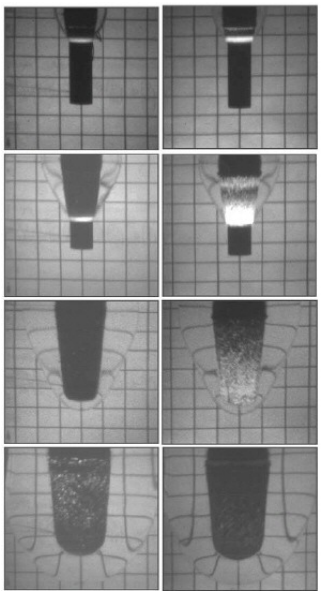

Abb. 12: Umsetzung von Tritonalen mit unterschiedlichen Aluminium-Größenklassen (BROUSSEAU 2001)

Damit sind bei vollständiger "High Order" (d.h. starker) Detonation nur Spurenrückstände zu erwarten (Pfeiffer 2007/2008/2009). Auf den Detonationsspitzendruck wirkt sich die Al-Partikelgröße nur untergeordnet aus (Brousseau 2001).

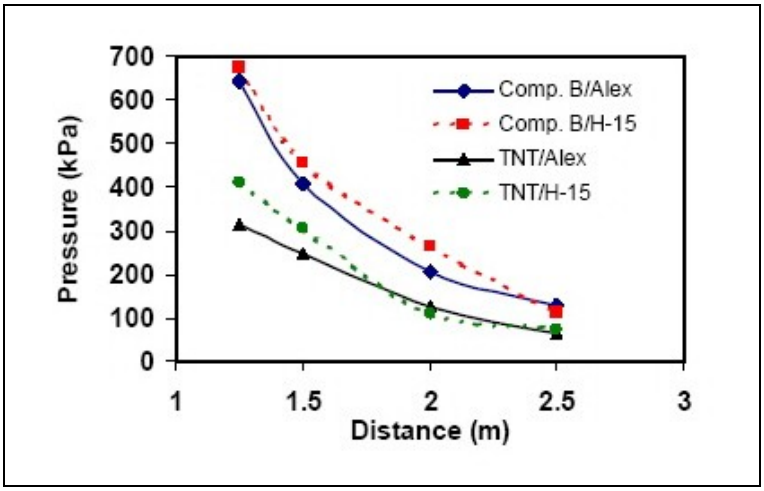

Abb. 13: Einfluss der Al-Partikelgröße auf den Detonationsspitzendruck (Brousseau 2001).

Der genaue Zustand der für die Versuchsserie zu sprengenden Ankertauminen war nicht bekannt. Ob und wie weit die wasserlöslichen Komponenten schon infolge Korrosion der Metallhülle ausgelaugt waren, war wie schon in den Jahren zuvor, nicht feststellbar.
In wie weit die als isotrope[1] Gusskörper ausgeführten Ladungen der Ankertauminen für einen einheitlichen Detonationsverlauf noch hinreichend homogen aufgebaut waren, kann insofern beurteilt werden, als die beobachteten Detonationsstärken der Einzelladungen nicht einheitlich waren.

Abb. 14: Umsetzung mit ausgeglichener Sauerstoffbilanz.

[1] Mit in allen Kristallisationsrichtungen gleichen Eigenschaften

Alle Ladungen wiesen *beobachtbar unterschiedliche Detonationssignaturen* auf.
Für die Aufrechterhaltung des Detonationsverlaufes von TNT und entsprechenden Mischungen sind Herstellungsart und Kristallanordnung wesentlich.
Stellen sich beim Guss Kristallorientierungen ein die nicht radial zu [001][2] orientiert sind, so detoniert der Gusskörper gar nicht (Kegler 1963). Das ist umso bemerkenswerter, als die Schlagempfindlichkeit von Gussmischungen, die TNT und AN enthalten, mit steigendem AN-Gehalt bis ca. 60 Masseprozent zunimmt (Urbanski 1964, Brousseau 2001).

2.4.3 TNT-Umsetzungsrückstände

Nicht umgesetztes TNT kann in Lösung gehen (s. Abb. 15) oder partikelförmig vorliegen.

Abb. 15: In Wasser gelöstes TNT.

TNT kristallisiert in monoklinen Nadeln [$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma$ $\beta > 90°$], die verschiedene Orientierungen beim Guss einnehmen können; aus unpolaren Phasen fallen sehr feinkristalline Niederschläge (s. Abb. 16).

[2] Orientierung der C-Achse als Richtung allgemeiner Lage

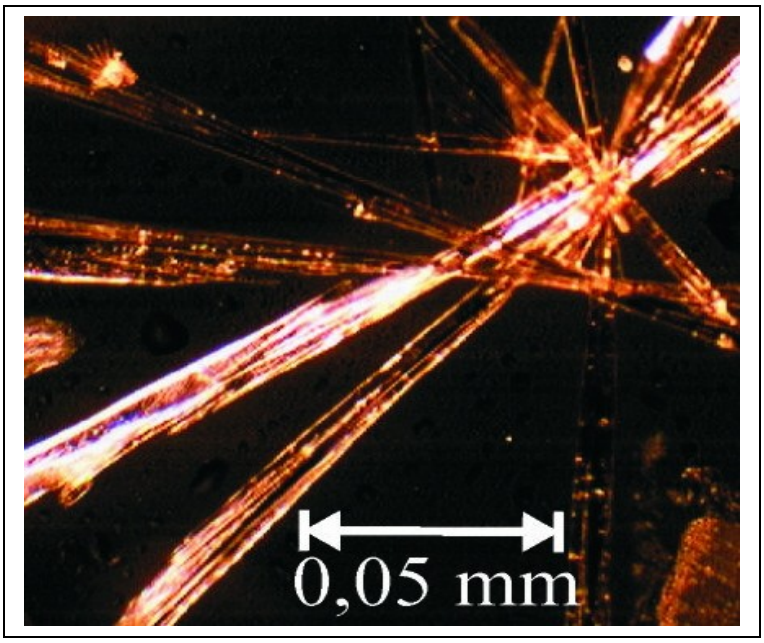

Abb. 16: Rekristallisierte TNT - Kristallaggregate.

Eine vollständige Umsetzung bewirkt die völlige Zerstörung des Ladungskörpers und Reaktion der enthaltenen Substanzen.

Dabei ist der Umsetzungsgrad auch in beschränktem Umfang von der Verdämmung (s. Abb. 17) durch die Ladungshülle selbst abhängig (JONES 1995).

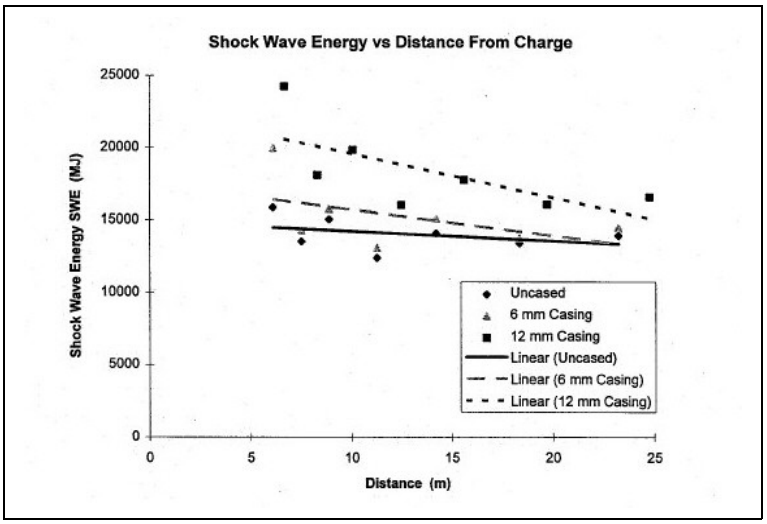

Abb. 17: Abhängigkeit der maximalen Stoßwellenenergie von der Ladungshüllenfestigkeit.

Auch die Ladungsmasse und die Qualität eines in der Nähe befindlichen Reflektors (Seeboden) beeinflussen den Detonationsspitzendruck bei der Umsetzung im Nahbereich (LOISEAU 1996).

2.4.4 Reichweite der Sedimentationsvorgänge

STV-Partikel, wie 2009 nachgewiesen, konnten nach der Versuchsserie 2010 *nicht* nachgewiesen werden.

Literatur:

BOHN, A. M. (2007): Wenn Sprengstoff älter wird, wird er auch gefährlicher? Kampfmittelbeseitigung und der Faktor Zeit. Untersuchungen zur Veränderung in der Empfindlichkeit. — Fachtagung 2007 `Kampfmittelbeseitigung`, Bad Kissingen.

BÖRKE, P., HAAS, R. (2007): Angewendete Passivsammlersysteme der Themenverbünde 2 und 5. — KORA-Statusseminarvortrag.

BROUSSEAU, P. (2001): Detonation Properties of Explosives containing Nanometric Aluminium Powder. — Defence Research & Development Canada - Valcartier 2459 Pie-XI Blvd. North, Val-Bélair, Québec, Canada G3J 1X5.

HAAS, R. (2008): Sickerwassermonitoring im "Werk Tanne" in CLZ . — Validierung des Passivsammler - Verfahrens zur Detektion von STV im TV 5.1 Rüstungsaltlasten.

HAAS, R.; PFEIFFER, F. (2006): KORA-Poster Sickerwassermonitoring im "Werk Tanne" in CLZ / Validierung des Passivsammler - Verfahrens zur Detektion von STV.

HEINZE, H. et al. (1987): Sprengtechnik. — pp.461; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

HOWE, P., FREY, R. and MELANI, G. (1976): Observations concerning transverse waves in solid explosives. — Com. Sci. and Technol. **14**, 63-74.

JONES, D.A., NORTHEAST, E.D. (1995): Effects of Case Thickness on the Performance of Underwater Mines. — Weapons Systems Division – DSTO-TR-0120 Aeronautical and Maritime Research Laboratory;

KEGLER, K. (1963): Sensibilisierung von Trinitrotoluol durch Nitrocellulose und andere Zusätze. — Explosivstoffe **10**, 209-215.

LOISEAU,O., CHEVAL K., AUTRUSSON, B. (1996): Close range effects on a concrete wall of an underwater explosion – A numerical approach. — Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), BP 17, 92262 Fontenay-Aux-Roses cedex, France.

PRICE, E.W. (1984): Combustion of metallized Propellants. – pp. 479-513; In: Fundamentals of Solid-Propellant Combustion. — Progress of Aeronautics and Asteronautics, **90**, ISBN 0-915928-84-1.

SCHMIDTKE, E., NÜTZEL, B., LUDWIG, S. (2009): Risk migitation for sea mammals-The use of air bubbles against shock waves. — Proceedings of the International Conference on Acoustics, pp. 269-270, Rotterdam.

URBANSKI, T. (1964): Chemie und Technologie der Explosivstoffe. — **III**, 221-224. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie

3 Ergebnisse der Passivsammleranalytik

Es wurden 6 Passivsammler- und ein geborgenes Tauwerk (Bojenbefestigung) im Labor der Fa. gaiasafe GmbH (Dr. R. Haas) analytisch auf Sprengstoffe (TNT, RDX, PETN und Hexyl) und STV untersucht. Die Kollektionszeit im Meerwasser erfolgte über einen Zeitraum von mehreren Wochen bei mehrdimensionalen Strömungsbedingungen. Das Probenmaterial wurde unmittelbar nach Erhalt aufgearbeitet. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zusammengestellt.
Es ist zu beachten, dass die angegebenen STV-Gehalte sich auf µg/g Passivsammler, d.h. auf das Trockengewicht der Kollektionsmatrix beziehen. Daher ist eine direkte Korrelation von Gehalten pro Gramm Passivsammler zu Gehalten pro Liter Meerwasser ohne Kenntnis des Volumenstroms nicht möglich. Ziel der Untersuchung war jedoch ein *relativer* Vergleich der STV-Konzentrationen auf Passivsammlermaterial im Untersuchungszeitraum.

Auf eine Ausbringung von PS zeitlich deutlich *vor* Beginn der Testsprengungsserie, um sog. Null- bzw. Blindwerte für die STV-Konzentrationen im Meerwasser zu ermitteln, wurde verzichtet, da bisherige Untersuchungen keine oder nur sehr geringe STV – Gehalte nachgewiesen haben.

Von allen aufgefundenen PS konnte ausreichend Material für die Laboruntersuchungen gewonnen werden und es wurden von jedem PS zwei Extrakte unabhängig analysiert.
Auf allen Proben (PS 1 – 6 und Tauwerk-Probe) konnte keine von den 10 untersuchten STV nachgewiesen werden. Die Bestimmungsgrenzen lagen für TNT bei 0,25 µg/g PS und für PETN bei 2,5 µg/g PS. Es stehen somit nur für die Osttraverse Angaben über die dort im Untersuchungszeitraum *nicht nachweisbare* STV-Fracht zur Verfügung. Für die West- und Süd – Traverse liegen leider keine verwertbaren Daten vor (Verlust der Passivsammler!). Die Ergebnisse der beiden STV-Analysenserien sind in Tab. 2 und 3 dargestellt.

Probe	RDX	PETN	24DNT	26DNT	TNT	TNB	2A46DNT	4A26DNT	Hexyl	DBP
1	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
2	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
3	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
4	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
5	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
6	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
Tauwerk-Probe	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn

Tab. 2: Ergebnisse der Untersuchung auf STV mit HPLC/DAD Passivsammler,
Einheit: µg/g Passivsammler; n.n.: in beiden Analysenserien nicht nachweisbar.

Zur Anordnung der einzelnen PS im Seegebiet siehe Abb. 7 (S. 14)

In Tab. 3 sind der Erhaltungszustand und die relative Position der geborgenen 6 Passivsammler zusammengestellt. Die Tauwerk-Probe wurde von der zum Umsetzungszeitpunkt vereisten Meeresoberfläche ca. 30 m südöstlich der Sprengposition entnommen.

PS	Erhaltungszustand / Traverse	Entfernung [m]	Tiefe [m]
1	mäßig erodiert / E	25	2
2	mäßig erodiert / E	25	10
3	gut/ E	50	2
4	schlecht, teilw. erodiert / E	50	10
5	schlecht, teilw. erodiert / E	100	2
6	gut / E	100	10
7	PS verloren	25	2
8	PS verloren	25	10
9	PS verloren	50	2
10	PS verloren	50	10
11	PS verloren	100	2
12	PS verloren	100	10
13	PS verloren	25	2
14	PS verloren	25	10
15	PS verloren	50	2
16	PS verloren	50	10
17	PS verloren	100	2
18	PS verloren	100	10
Tauwerk-Probe	sehr gut	30	Oberfläche/Eis

Tab. 3: Auffindungszustand der geborgenen PS.

3.1 Zusammenfassung der Passivsammleranalytik

Auf den geborgenen Passivsammlern wurden *kein* TNT nachgewiesen.

Die begleitend auftretenden Sprengstoffe PETN und Hexyl konnten auf den PS *nicht* nachgewiesen werden.

DBP als Tracersubstanz, konnte ebenfalls auf *keinem* PS nachgewiesen werden. Dies zeigt dass die Kontrollfunktion über das enthaltene Phlegmatisierungsmittel DBP des PETN als Tracers nicht genutzt werden konnte, die Nachverbrennung infolge der vollständigen Detonationen ist wahrscheinlich.

4 Hydrochemische Bedingungen im Untersuchungszeitraum

4.1 Grundlagen und Mechanismen des STV-Abbaus

Nitramine (RDX, HMX) und Nitroaromaten (TNT) sind humantoxische, synthetische Produkte und kommen nicht natürlich vor. Mit der Freisetzung dieser Substanzen in die Umwelt geht auch deren Abbau einher. Damit verbundene Stoffumwandlungen sind in der Regel Transformationen die nicht notwendigerweise in einem vollständigen Substanzabbau enden und können auf pflanzlichen, photolytischen, anorganischem und/oder mikrobiellem Wege ablaufen (s. Abb.18). Kombinierte Transformationsschritte sind dabei möglich (STEINBACH 2006).

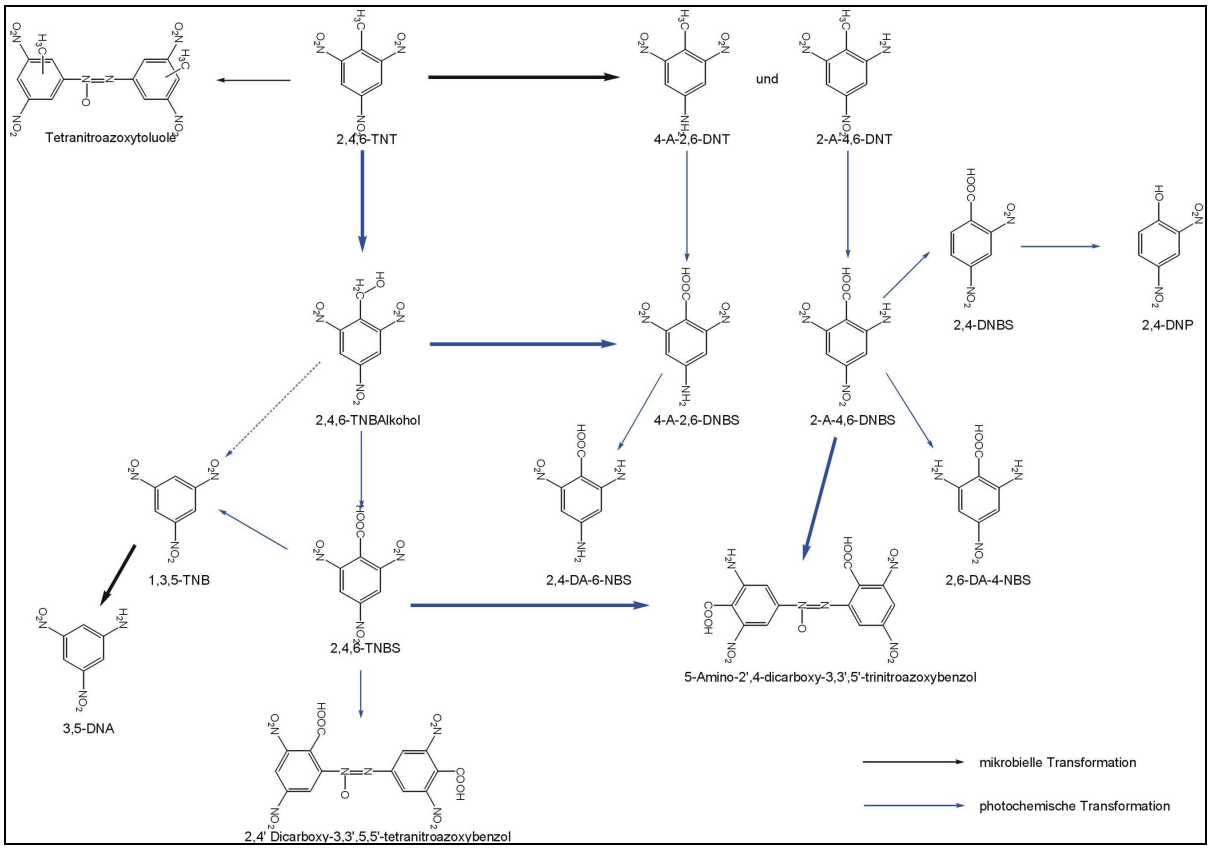

Abb. 18: Umwandlungsvorgänge von TNT (STEINBACH 2006).

Bei der mikrobiellen Transformation sind sowohl wachstumsfördernde als auch kometabolische Prozesse möglich.

Dabei führt die partielle Reduktion von Nitrotoluolen zu Amino – Nitrotoluolen nicht zwangsläufig zu einer Entgiftung oder Persistenzreduktion.

Demgegenüber sind die Nitramine weniger stabil und gut bioverfügbar (BOOPATHY et al. 2004). Zur Erläuterung dieser Prozesse sind bekannte Abbaumöglichkeiten für TNT, TNB, RDX und TNBS aufgeführt.

4.2 TNT – Abbau

Beim mikrobiellen TNT-Abbau sind verschiedene Mechanismen bekannt. Transformationsprozesse reichen bis hin zur Spaltung des mesomeriestabilisierten π-Ringsystems.

4.2.1 Eliminierung

Eine Eliminierung der Nitrogruppen durch Oxygenasen beinhaltet Ringspaltung und Mineralisierung. Das gilt insbesondere für Mono- und Dinitro-Toluole unter aeroben Bedingungen; hier in der $Mn^{(IV)}$ – $Fe^{(III)}$ stabilen Zone.

4.2.2 Reduktion

Die Reduktion der Nitrogruppen erfolgt stufenweise durch Nitratreduktasen. Oligomerisierung oder Mineralisierung sind möglich (ROBERTSON et al. 2005).

4.2.3 Ringspaltung

Unter Bildung von Hydrid – Meisenheimer – Komplexen ist eine reduktive Ringhydrierung für TNT möglich (KAPLAN 1971).

4.3 TNB-Abbau

Für den Abbau von Nitrobenzolen sind nachfolgend zwei Abbaupfade beschrieben.

4.3.1 Eliminierung

Grundsätzlich ist die Eliminierung der Nitrogruppen bei NB, 1,3,5-TNB und 1,3-DNB möglich. Bisher liegen dazu nur wenige Erkenntnisse vor (DIECKEL et al. 1991).

4.3.2 Reduktion

Auch hier werden die Nitrogruppen durch Nitratreduktasen, partiell oder vollständig, reduziert. Daraus können sowohl Triaminobenzol wie auch Hydroxy-Aminobenzole entstehen (NISHINO et al. 2000).

4.4 RDX-Abbau

Entgegen den Transformationsstufen der Nitroaromaten sind bei RDX Nitroso-Derivate möglich. Dessen 1,3,5-Trinitroso-Derivat wurde schon im WK. II als Ersatzsprengstoff verwendet, wobei die mangelhafte chemische Stabilität und eine dem RDX vergleichbare Sprengleistung bekannt geworden sind. RDX wird kometabolisch transformiert (LARKIN 2005). Dagegen wird ein mikrobieller Abbau nur unter reduzierenden Bedingungen, wie am Ostseegrund anzutreffen, möglich.

4.5 NBS-Abbau

In manchen, *nicht in den hier untersuchten Proben*, werden Nitrobenzoesäure und Amino-Nitrobenzoesäuren gefunden. Dies ist das Resultat einer Kombination aus mikrobiellen und photochemischen Transformationsstufen (s. Abb. 18). Die nachgewiesenen Derivate 2-A-4,6-DNBS und 4-A-2,6-DNBS können aus 2,4,6-TNB Alkohol oder über das 2-A-4,6-DNT/4-A-2,6-DNT entstehen. Wobei im Untersuchungsgebiet beide Transformationspfade mit unterschiedlichen Intensitäten möglich, aber mangels kollektierter STV im Untersuchungszeitraum *nicht nachweisbar* waren.

4.6 Redoxchemische Bedingungen des STV-Abbaus

Ebenfalls zu beachten ist, ob es sich bei der STV – Kontamination um eine Lösung- oder Partikelfracht bzw. eine Kombination dieser Frachttypen handelt. Auch die lokalen Redoxgleichgewichte können für die Transformation von Bedeutung sein (WEBER 2008, PFEIFFER 2008).

4.7 Sorptionseffekte von STV

STV können aufgrund von chemischen und elektrostatischen Oberflächenreaktionen an feste Matrices gebunden werden.

Dazu sind Huminstoffe als organische Matrix von erheblicher Bedeutung (ZIECHMANN 1990). Insbesondere organikreiche Böden und der Organikeintrag in Gewässer, wie im untersuchten Seegebiet, können unpolare STV binden und aufgrund des starken Reduktionsvermögens auch abiotisch transformieren.
Die Reichweite einer STV-Belastung im Wasser kann sedimentransportbedingt uneinheitlich ausfallen. Im Extremfall ist sogar eine Humifizierung, d.h. eine weitgehende Zerstörung der ursprünglichen Molekülstruktur der STV möglich (LENKE 1994).

4.8 Medium Wasser

In der fluiden Phase selbst herrschten, wie schon 2008 und 2009 bestätigt, schwach reduzierende Bedingungen vor. Diese Bedingungen sind das Ergebnis der gelösten und suspendierten Inhaltsstoffe in Kombination mit der Wasserbewegung.
In der Wassersäule befinden sich tiefenabhängig, verschiedene Zonen die entsprechend unterschiedliche Transformationspfade begünstigen (PFEIFFER 2009).

4.9 Suspensionsfracht

Es auf den geborgenen PS keine STV-Suspensionsfracht nachgewiesen. Damit waren anlässlich der diesjährigen Versuche eine unvollständige Umsetzungen in keinem Fall nachweisbar.

4.10 Zusammenfassung Hydrochemie

Aus der Sedimentfracht war erkennbar, dass während des Untersuchungszeitraums in der Wassersäule und in den Bodensedimenten *reduzierende* Bedingungen vorhanden waren. Dadurch kann ein reduktiver STV-Abbau begünstigt werden. Die relative Intensität (Reduktion der Phasen über die Messzeit) war aber unterschiedlich verteilt.

Literatur:

BOOPATHY, R.; MELANCON, E. (2004): Metabolism of compounds with nitro-funktions by Klebsiella pneumoniea isolated from a regional wetland. — Int. Biodeterioration & Biodegradation, **54,** S. 269 – 275**.**

DIECKEL, O., KNACKMUSS, H.J. (1991): Catabolism of 1,3-dinitrotoluene by Rhodococcus sp. — Archives of Microbiology, **157,** (1), S 76-79.

FREEDMAN, D.L., SUTHERLAND, K.W. (1998): Biodegradation of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) under nitrate reducing conditions — Water Science and Technology **38** (7), S. 33-40.

KAPLAN, L.A., DIEDLE, A.R. (1971): Studies in Boron Hydrides IV. Stable Hydride Meisenheimer Adducts. — J.Org. Chem., **36**, (7), pp. 937-939.

LARKIN, M.J., KULAKOV, L.A, ALLEN, C.C.R. (2005): Biodegradation and Rhodococcus – masters of catabolic versatility. — Current Opinion in Biotechnology, **16**, pp. 282 – 290.

LENKE, H., ACHTNICH, C., KNACKMUSS, H.J. (2000): Perspectives of bioelemination of polynitroaromatic compounds. — In: SPAIN, H.C., HUGHES, J.B., KNACKMUSS, H.J. (Hrsg.): Biodegradation of nitroaromatic compounds and explosives. Lewis Publishers, ISBN 1-56670-522-3, pp. 91 – 126.

NISHINO, J.F., SPAIN, J.C., HE, Z. (2000): Strategies for aerobic degradation of nitroaromatic compounds by bacteria: Process discovery to field application. — In: Biodegradation of nitroaromatic compounds and explosives. Lewis Publishers, ISBN 1-56670-522-3, pp. 7-62.

PFEIFFER, F. (2008): Bericht über die in-situ-Begleituntersuchungen zur Munitionssprengung in der Ostsee vom 14.04.2008 – 18.04.2008. — Marburg.

ROBERTSON, B.K., IJEMBA, P.K. (2005): Enhanced bioavailability of sorbed 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) by a bacterial consortium. — Chemosphere, **58** (3), S. 263-270.

STEINBACH, K. (2006): Transformationswege von STV im Oberboden und Oberflächenwasser. — KORA-Statusseminarvortrag, Goslar.

WEBER, A. (2008): Randbedingungen für Sorption und Abbau sprengstofftypischer Verbindungen am Beispiel der Rüstungsaltlast Elsnig/Torgau. — Diss. In: Proceedings des DGFZ e.V., Heft 33; 2008; ISSN 1430-0176.

ZIECHMANN, W., MÜLLER-WEGNER, U. (1990): Bodenchemie. — BI-Wissenschaftsverlag, ISBN 3-411-03205-7.

5 Beschreibung der marinen Bedingungen im Untersuchungszeitraum

Die Arbeiten im Februar 2010 im Munitionsversenkungsgebiet "Kolberger Heide" waren bei schwachem (2-3 Bft.), teilweise böigem Wind, der wiederholt zwischen NE und NW drehte und bei geringen Wellenhöhen von unter 0,5 m prinzipiell durchführbar.
Mit dem Wechsel der Windrichtungen war auch jeweils eine entsprechende Änderung in der Wasserströmung, Eisbildung und Eisdrift im Versuchsgebiet festzustellen. Dabei befanden sich die Messpositionen der Passivsammler immer *leewärts* der Sprengstelle.
Decksarbeiten und Technik wurden wetterbedingt durch Wind und niedrige Lufttemperatur erheblich beeinträchtigt (s. Abb. 19).

Abb. 19: Widrige Witterung (Eisschollen) erschwert die Tauch- und Sprengarbeit.

6 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

6.1 Zusammenfassung

Nach Auswertung der Passivsammleranalytik unter Berücksichtigung der hydrochemischen Bedingungen sind bei den Sprengversuchen vom Februar 2010 unter Einsatz der Blasenschleiertechnik folgende Sachverhalte nachweisbar:

1. Weder TNT aus der Schießwolle 39 (SchW 39) noch die begleitend auftretenden Sprengstoffe PETN (aus den zur Vernichtung angelegten Schlagladungen) und Hexyl konnten auf den PS konnten auf einzelnen Passivsammlern nachgewiesen werden.
Die analytische Überwachung von Munitionssprengungen durch die verwendete Passivsammlermethode ist grundsätzlich sichergestellt, *problematisch* bleibt der jahreszeitlich bedingte Verlust an ausgebrachten Passivsammlern durch die jeweils herrschenden Seewetterlagen während der mehrwöchigen Kollektionszeit.

2. Eine *STV-Lösungsfracht*, die die übliche Erscheinungsform einer STV-Fracht ist, konnte durch diese Begleituntersuchung nicht detektiert werden. Die Umsetzungen der Sprengladungen waren diesmal so vollständig, dass sich eine STV-Suspensionsfracht auf den geborgenen PS nicht nachweisen ließ. Verbreitung und toxikologisches Expositionsrisiko sind unterschiedlich bezogen auf die Expositionspfade für den Menschen. Auch die Reichweite und Persistenz von Partikel- und Lösungsfrachten von STV können sehr unterschiedlich ausfallen.

3. Art, Zustand und Menge des bei der Unterwassersprengung verwendeten Sprengstoffs sind wesentliche Einflussgrößen für die mögliche Kontamination der Umgebung. Die bei den durchgeführten Testsprengungen für die Erprobung einer optimalen Blasenschleiertechnik zur Minimierung des Unterwasserschalldrucks verwendete Altmunition ist mit ca. 250 bis 300 kg Sprengstoffmischung als starke Ladung zu bewerten. Das Detonationsverhalten der einzelnen Ladungskörper war unterschiedlich ausgeprägt und zeigte, dass in den Ladungskörpern ausreichend detonationsfähiges Material enthalten war.

4. Die Detonationsstärken der einzelnen Ladungen waren unterschiedlich und schwer ermittelbar. Aus den Beobachtungen einzelner Umsetzungen waren entweder negative oder auch eine positive Sauerstoffbilanz bei Einzelladungen erkennbar.

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der im Februar 2010 durchgeführten Begleituntersuchung zu den Testsprengungen von Ankertauminen im Munitionsversenkungsgebiet "Kolberger Heide" lassen sich wie folgt interpretieren:

1. Bei intakter isotroper Ladung können Ankertauminen mit *Schießwolle 39* soweit vollständig "High Order" detonieren, dass der Nachverbrennungsvorgang der primären Sprenggase durch den Aluminiumanteil nur noch *Spuren* von STV zurücklässt. Eine toxikologisch relevante Schadstoffbelastung des Meeresgebietes im Bereich der Umgebung der Sprengstelle mit einem *statischen* Wasservolumen von ca. 500.000 m³, in dem die Sprengungen durchgeführt wurden, besteht durch *gelöste* STV bei vollständiger High Order Detonation nicht.

2. Die Durchführung von Unterwassersprengungen von Altmunition sollte bei problematischen Eislagen vermieden werden. Die chemisch-analytische Überwachung ist nur mit erheblichem Mehraufwand möglich.

3. Bei Umsetzungen mit stark negativer Sauerstoffbilanz können aluminiumreiche Sprengstoffmischungen durch einen komplexen Umsetzungsmechanismus mit sehr hohen und lange anhaltenden Reaktionstemperaturen STV weitgehend zerstören, so dass eine Belastung der Meeresumwelt aufgrund der im Februar 2010 vor Heidkate begleiteten Sprengversuche nicht zu besorgen ist.

4. Unvollständige Detonationen können den *Nahbereich* der Sprengstelle mit STV kontaminieren. Im stark $S^{(VI)}$ reduzierenden Milieu erscheint nach bisherigem Kenntnisstand eine permanente Belastung infolge *einzelner Sprengungen* unwahrscheinlich. Ein Abbau der STV aus Umsetzungsrückständen ist aufgrund lokaler Gegebenheiten zu erwarten; ggf. ist eine Nachkontrolle der Wassersäule mit Passivsammlern sowie des Bodensediments mit geeigneten Methoden geboten, um eine persistente Restbelastung ausschließen zu können.

Marburg, den 14.Juni 2010

F. Pfeiffer (Dipl.-Geologe)

Kapitel 7 Glossar

AN	Ammoniumnitrat
Alex	Aluminiumpulver der Nanometer-Größenklasse
2-A-4,6-DNT	2-Amino-4,6-dinitrotoluol
4-A-2,6-DNT	4-Amino-2,6-dinitrotoluol
Comp. B.	Giessbare Mischung aus RDX und TNT
DAD	Dioden Array Detektor
DBP	Dibutylphthalat
DNB	Dinitrobenzol
$Fe^{(III)}$	Eisen in der Oxidationsstufe III
FRS	Fisheries Research Service
H-15	Aluminiumpulver der Mikrometer-Größenklasse
Hexyl	2,4,6,2',4',6'-Hexanitrodiphenylamin
High Order Detonation	Starke Detonation
HMX	Tetramethylentetranitramin
HPLC/DAD	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie mit Diodenarray-Detektion
2,4-DNT	2,4-Dinitrotoluol
2,4,6-TNB	2,4,6-Trinitrobenzol
2,6-DNT	2,6-Dinitrotoluol
kPa	Kilo-Pascal
$Mn^{(IV)}$	Mangan in der Oxidationsstufe IV
MJ	Mega-Joule
NBS	Nitrobenzoesäure
NC	"Nitrocellulose", allgemeine Bezeichnung für Treibmittel auf Cellulosebasis, unabhängig von Stickstoffgehalt
PETN	Pentaerythrittetranitrat
PS	Passivsammler
RDX	Trimethylentrinitramin
$S^{(VI)}$	Schwefel in der Oxidationsstufe VI

SchW	"Schießwolle", historischer Begriff, der auf der Verwendung gepresster Nitrocellulose für Marinemunition gründet
SchW39	Schießwolle 39
STV	Sprengstofftypische Verbindungen
TNT	2,4,6-Trinitrotoluol
TNB	1,3,5-Trinitrobenzol
TNBS	Trinitrobenzoesäure
Tritonal	Gießbare Mischungen aus 20 -40 % Al und 80 – 60 % TNT
1,3,5-TNB	1,3,5-Trinitrobenzol
WK. 1	1. Weltkrieg
WS	Wassersäule