

Reagglomeration nach dem Schredder beim Rückbau der Deponie Bonfol (nach Shredder und Loren- Transport)

11. Mai 2011

Dr. B. Covelli Tecova AG

1. Ausgangslage

Beim Rückbau des Deponiekörpers in Bonfol wird das Material mit dem Krangreifer in eine Triagemulde geleert, mit dem ferngesteuerten Bagger aus dieser Mulde in den Aufgabetrichter des Shredders gebracht und danach als zerkleinertes Gemisch mittels einer Lore in einen Bunker gekippt.

Infolge des Explosionsereignisses vom 7.7.2010 wurden nachträglich alle erforderlichen Massnahmen ergriffen, um Explosionen in der Aushubhalle mit einer Sprengleistung bis 10 kg TNT Äquivalent so zu beherrschen, dass Personenschäden und Schäden an tragenden Hallenelementen ausgeschlossen werden können.

Mit einer probabilistischen Analyse konnte schliesslich gezeigt werden, dass beim Abbauprozess innerhalb der Aushubhalle Explosionen mit Sprengleistungen über 10 kg TNT Äquivalent unwahrscheinlich sind und nach menschlichem Ermessen ausgeschlossen werden können.

Offen bleibt die Frage, ob nach dem Shredder im Bunker ebenfalls noch gefährliche Explosionen stattfinden können. Bei der Nachrüstung zur Beherrschung von Explosionsereignissen wurde angenommen, dass aufgrund der mechanischen Belastung, Zerkleinerung und Homogenisierung des Deponiematerials im Shredder Explosionen mit einer Sprengleistung von höchstens 1 kg TNT Äquivalent im Bunker zu erwarten sind.

Es stellt sich die Frage, ob durch zufällige Agglomerationen von Explosivstoffen im Shreddergut oder durch mangelhaft zerkleinertes Material im Bunker, entgegen den bisherigen Annahmen, Explosionen mit mehr als 1 kg TNT Äquivalent zu erwarten sind.

2. Eingrenzung der Explosivstoffe

Die Explosivstoffe haben je nach Einsatz und thermodynamischem Verhalten verschiedene Klassierungen. Im vorliegenden Fall soll die Einteilung nach deren Verwendung erfolgen:

- Sprengstoffe (inkl. Treibmittel und Zündmittel)
- Pyrotechnika

Die Pyrotechnischen Gemische bestehen grundsätzlich aus einem Oxidationsmittel und einem Brennstoff. Ein solches Gemisch war die Ursache der Explosion vom 7.7.2010 in der Deponie Bonfol. Daher werden solche Gemische besonders behandelt werden.

Im vorliegenden Bericht sollen nur Explosivstoffe in Betracht gezogen werden, die schlag- oder reibempfindlich sind. Diese Stoffe stellen beim Rückbau des Deponiekörpers eine ausserordentliche Gefahr dar.

Bei den Prüfmethoden sind zwei Grenzwerte festgelegt:

- Schlagempfindliche Stoffe explodieren bei einer Schlagenergie unter 40 Joule
- Reibempfindliche Stoffe explodieren bei einer Reibkraft unter 360 N

Die nachfolgenden Überlegungen beziehen sich auf Stoffe, die mindestens einen der beiden Grenzwerte unterschreiten.

3. Shredderversuche

3.1 Vorversuche vom 30. März 2011

Ein Abfallgemisch bestehend aus 50 Eichenblöcken (8x8x8 cm), einem zerquetschten Fass (50 l) sowie 0.5 m³ tonigem Deponiematerial wurde als Charge ‚geshreddert‘.

9 Eichenblöcke waren nach dem Shredder noch intakt, sie wiesen aber deutliche Marken der Shredderzähne auf.

Ein zweiter Versuch mit 50 Eichenblöcken, zwei zerquetschten Fässern und feuchtem Deponiematerial ergab ähnliche Ergebnisse. 8 Eichenblöcke waren nach dem Shredder noch intakt mit deutlichen Abdrücken der Shredderzähne.

Schlussfolgerung:

Das Reduzierstück unterhalb der Shredderwalzen war zu klein, d.h. der Abstand zwischen den Walzen und dem Reduzierstück war zu gross.

3.2 Versuche vom 5. April 2011

Vor dem Versuch wurde unter den Shredderwalzen ein grösseres Reduzierstück eingebaut, mit einem geringeren Abstand zu den Walzen.

Das Versuchsgemisch entsprach dem ersten Versuch am 30.3.2011, zusätzlich wurde das Fass mit Sand gefüllt. Nach dem Shredder blieben von den 50 Eichenblöcken (8x8x8 cm) noch 5 Blöcke intakt, sie wiesen aber deutliche Marken der Shredderzähne auf. Das gefüllte Fass wurde vollständig zerlegt.

Beim zweiten Versuch wurden 50 Eichenblöcke mit den Abmessungen (10x10x10 cm) im Shredder behandelt. Alle Blöcke wurden zerlegt.

Beim dritten Versuch wurden 50 Eichenblöcke mit den Abmessungen (9x9x9 cm) im Shredder behandelt. Nach dem Shredder blieben noch 4 Blöcke intakt wobei diese Blöcke markante Marken der Shredderzähne aufwiesen.

Befund:

Blöcke von 9x9x9 cm werden grösstenteils zerlegt und die noch ganzen Blöcke weisen markante Markierungen auf.

3.3 Versuch vom 26. April 2011

Das Versuchsziel war, die Agglomeration von grösseren Bruchstücken nach dem Shredder im Bunker zu untersuchen.

Versuchsordnung:

4 weisse Gipsplatten mit den Abmessungen 50x50x8 cm wurden zusammen mit ca. 0.75 m³ tonigem Deponiematerial mit dem Bagger in den Aufgabetrichter des Shredders eingefüllt. Nach dem Shredder wurde das Material mit der Lore in den Bunker von Los B abgekippt und photographisch dokumentiert. Die Bilder wurden bezüglich der weissen Bruchstücke ausgezählt und vermessen.

Die Auswertung ergab folgende Erkenntnisse:

- Anteil der Gips- Bruchstücke mit grösster Länge zwischen 7 – 12 cm : 13 +/- 2 %
- Anteil der Gips- Bruchstücke mit grösster Länge unter 7 cm: 87 +/- 2 %
- Minimaler Abstand zwischen den grossen Bruchstücken: 10 cm
- Mittlerer Abstand zwischen den grossen Bruchstücken : 16 +/- 2 cm

3.4 Versuch vom 3. Mai 2011

Der Versuch war eine Wiederholung vom Versuch am 26.04.2011. 4 weisse Gipsplatten wurden zusammen mit ca. 0.75 m³ tonigem Material in den Shredder gegeben und das bearbeitete Materialgemisch mit der Lore in den Bunker gekippt. Das Haufwerk wurde photographisch dokumentiert und danach im Bunker direkt ausgezählt und vermessen.

Die Auswertung ergab folgende Erkenntnisse:

- Anteil der Gips- Bruchstücke mit grösster Länge zwischen 7 – 12 cm : 10 +/- 2 %
- Anteil der Gips- Bruchstücke mit grösster Länge unter 7 cm: 90 +/- 2 %
- Minimaler Abstand zwischen den grossen Bruchstücken: 10 cm
- Mittlerer Abstand zwischen den grossen Bruchstücken : 17 +/- 3 cm

3.5 Versuch vom 3. Mai 2011 (Mischversuch)

Pyrotechnische Oxidationsmittel könnten in pulvriger oder körniger Form eingelagert worden sein. Diese Schüttungen wären im Laufe der letzten Jahrzehnte verklumpt, sodass beim Rückbau körnige oder kieselsteinartige Stoffe anfallen, die im Shredder mit brennbarem Deponiematerial vermischt werden. Solche Gemische können bekanntlich explosive pyrotechnische Stoffe bilden.

Beim Versuch wurden 4 Gipsplatten (50x50x8 cm) mit dem Hammer auf Bruchstücke unter 8 cm zerschlagen. Zwei Chargen mit je 0.25 m³ tonigem Material und je 2 zerklopfen Gipsplatten wurden mit dem Bagger in den Shreddertrichter eingefüllt und beide Chargen gemeinsam geshreddert. Danach wurde das Material mit der Lore in den Bunker gekippt. Das Haufwerk wurde photographisch dokumentiert und visuell ausgewertet.

Die Auswertung ergab folgende Erkenntnisse:

- Eine deutliche Separierung zwischen groben und feinen Gipsbruchstücken auf der vorderen und hinteren Seite des Haufens konnte festgestellt werden
- Auf der Seite mit dem feinen Material lag eine quasi- homogene Vermischung vor
- Auf der Seite mit dem groben Material war die Vermischung ebenfalls zufällig verteilt und weitgehend homogen
- Der Vermischungsgrad der Gipsbruchstücke im Haufwerk wurde konservativ unter 50 % eingeschätzt d.h., dass die gesamten Gipsbruchstücke in der Hälfte des Haufenvolumens vermischt waren.

3.6 Folgerungen aus den Versuchen

Die Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Shredder produziert im ungünstigsten Fall Bruchstücke von maximalen Abmessungen von 9x9x9 cm
- Alle Bruchstücke mit diesen Abmessungen weisen massive Marken der Shredderzähne auf
- Alle Bruchstücke sind im Bunker zufällig verteilt
- 10-15 % der grössten Bruchstücklängen liegen im Bereich von 7 – 12 cm
- 85-90 % der grössten Bruchstücke haben eine grösste Länge unter 7 cm
- Der mittlere Abstand zwischen den grossen Bruchstücken liegt bei 16 cm.
- Der kleinste Abstand zwischen den grossen Bruchstücken liegt bei 10 cm
- Körniges, klumpiges Material vor dem Shredder ist im Bunker quasi- homogen verteilt mit einem Vermischungsgrad unter 50 %

4. Abschätzung der Explosionsstärke im Bunker

Wie im Abschnitt 2 erklärt, sind nur schlag- und reib- empfindliche Explosivstoffe zu betrachten, die übrigen Explosivstoffe brauchen zusätzliche Zündmittel, die im vorliegenden Fall nicht vorhanden sind. Bei schlag- und reib- empfindlichen Explosivstoffen ist davon auszugehen, dass diese durch die mechanische Beanspruchung im Shredder zur Explosion gebracht werden. Der Shredder wurde dementsprechend auch ausgelegt.

Die Shredderversuche zeigten, dass alle geshredderten Stoffe deutliche Zahnspuren hatten, was auf eine massive Beanspruchung hinweist. Daher ist davon auszugehen, dass es wenig wahrscheinlich ist, dass empfindliche Explosivstoffe das Shredderwerk ohne Explosion durchlaufen werden.

Nachfolgend wird dennoch konservativ angenommen, dass Explosivstoffe den Shredder ohne Explosion durchlaufen und im Bunker explodieren könnten.

4.1 Referenzsprengstoff TNT

Die Sprengwirkung von Trinitrotoluol (TNT) wurde im Rahmen von Armee- Forschungsprogrammen im Detail untersucht und ist einer der bestbekanntesten Explosivstoffe. Um die Sprengwirkung von anderen Explosivstoffen abzuschätzen, wird daher TNT als Referenz genommen und die Masse des Explosivstoffes mit der äquivalenten TNT- Masse verglichen.

Das sogenannte TNT- Model stützt sich auf Decker (1974), Stull (1977) und Baker (1980) und benützt folgende Äquivalenzbeziehung

$$W = f \times M \times H / H_{\text{TNT}}$$

mit

W = Äquivalente Masse zu TNT (kg)

M = Masse des explosiven Materials (kg)

H = Verbrennungsenthalpie des explosiven Materials (MJ/kg)

H_{TNT} = Verbrennungsenthalpie TNT (4,5 MJ/kg)

f = Wirkungsfaktor

Die Sprengkraft von Trinitrotoluol (TNT) wird auf die sogenannte Ladungsdichte von 1.65 kg/dm³ bezogen. Gemäss der Kamlet-Jacobs-Gleichung, die sich bei der Berechnung der Detonationsgeschwindigkeit und des Detonationsdruckes P_{Det} von organischen Sprengstoffen bewährt hat, kann der Detonationsdruck wie folgt bestimmt werden

$$P_{\text{Det}} = C \times Y \times \rho_{\text{Lad}}^2$$

- mit :
- C = Konstante
 - Y = $N \times (\underline{M} \times H)^{0.5}$
 - N = Molanzahl der Reaktionsgase pro kg Sprengstoff
 - M = mittlere Molmasse
 - ρ_{Lad} = Ladungsdichte (kg Sprengstoff / Volumen)

Bei gleichem Sprengstoff ist somit die Explosionsleistung quadratisch von der Ladungsdichte abhängig. Geht man von der maximalen Ladungsdichte ρ_{LadO} eines Sprengstoffes aus, so vermindert sich die Explosionsleistung und somit der Wirkungsfaktor f gemäss der Beziehung

$$f = P_{\text{Det}} / P_{\text{DetO}} = (\rho_{\text{Lad}} / \rho_{\text{LadO}})^2$$

4.2 Explosion von Sprengstoffen

Bezugnehmend auf den Abschnitt 2 werden schlag- und reib- empfindliche Sprengstoffe betrachtet, die Pyrotechnischen Gemische werden im Abschnitt 4.3 diskutiert.

Die Shredderversuche zeigten, dass mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit maximale Bruchstücke mit einem Volumen um 0.73 Liter (9x9x9 cm) im Bunker abgekippt werden können, wobei diese dann deutliche Markierungen der Schredderzähne aufweisen würden.

Die Dichte der technisch eingesetzten Sprengstoffe liegt zwischen 1400 kg/m³ (Glycoldinitrat) bis 2300 kg/m³ (Cheddite). Da ein unverdämmt Sprengstoff in Form von Bruchstücken nicht die maximale Ladungsdichte erreicht, kann ein maximales Dichteverhältnis von

$$\rho_{\text{Lad}} / \rho_{\text{LadO}} = 0.8 \text{ bis } 0.9$$

konservativ abgeschätzt werden, was bei TNT- ähnlichen Sprengstoffen einen Wirkungsfaktor um $f = 0.64$ bis 0.81 ergibt.

Geht man von einer hohen Sprengstoffdichte um 2300 kg/m³ aus und berücksichtigt den Wirkungsfaktor von 0.64 bis 0.81, so hat ein Bruchstück von 0.73 Liter eine Sprengleistung von rund 1.0 bis 1.3 kg TNT Äquivalent.

Die Shredderversuche zeigten zusätzlich, dass der mittlere Abstand der grössten Bruchstücke bei 16 cm liegt. Bestimmt man die virtuelle Ladungsdichte von 2 Bruchstücken mit je einem Volumen $V = 0.73$ Liter (1.68 kg) beim kleinsten Abstand von 10 cm, indem man den inerten Zwischenraum zum Gesamtladungsvolumen rechnet und berücksichtigt zugleich den

konservativen Wirkungsfaktor von $f = 1.0$ für die einzelnen Bruchstücke, ergibt sich eine virtuelle Ladungsdichte von

$$\rho_{\text{Lad}} = 2 \times 2300 / 3 = 1533 \text{ kg/m}^3$$

respektive ein Dichteverhältnis um 0.67

Daraus lässt sich der Wirkungsfaktor um $f = 0.45$ abschätzen. Zusammengefasst haben die 2 grössten Bruchstücke mit einer Gesamtmasse von 3.36 kg eine gemeinsame Sprengleistung um 1.5 kg TNT Äquivalent. Somit wird die Sprengwirkung von 2 neben einander liegenden Bruchstücken im Vergleich zum einzelnen Bruchstück nicht wesentlich verstärkt. Zudem würden die Bruchstücke nicht gleichzeitig, sondern verzögert explodieren.

4.3 Explosion von Pyrotechnischen Gemischen

Es besteht die seltene Möglichkeit, dass Pyrotechnische Oxidationsmittel als kompakte Charge ohne Vermischung mit einem Brennstoff in den Shredder gelangen und dort mit brennbaren Deponiestoffen vermischt werden. Falls beide Stoffe rieselfähig wären, würde das Shredderwerk nur als Mischer und nicht als Brecher wirken, sodass keine Explosion ausgelöst würde.

Abgestützt auf die Ergebnisse aus der probabilistischen Analyse ist davon auszugehen, dass maximal 10 kg pyrotechnisches Oxidationsmittel als Charge in den Shredder gelangen, wo es mit mehr als 0.5 m^3 Deponiematerial vermischt würde.

Der Versuch im Abschnitt 3.5 zeigt, dass das Shredderwerk als Mischer wirkt und das Oxidationsmittel im Deponiegut verteilt, wodurch nach dem Loren-Transport und dem Abkippen in den Bunker ein quasi-homogenes Mischgut anfällt mit einem Mischungsgrad kleiner als 50 %.

In der nachfolgenden Abschätzung der Explosionsleistung dieses Haufwerkes kann von folgenden konservativen Annahmen ausgegangen werden:

- 10 kg Pyrotechnische Oxidationsmittel werden im Shredder mit brennbarem Deponiegut vermischt
- Für eine vollständige Umsetzung des Oxidationsmittels werden 20 kg Deponiematerial verbraucht
- Das Gemisch von Oxidationsmittel und Deponiematerial hätte eine Sprengleistung wie TNT

- Der Vermischungsgrad im Haufwerk sei 30 %, das heisst, dass das gesamte Oxidationsmittel in einem Haufenbereich von 0.15 m^3 (30 % des Haufenvolumens) vermischt wäre.

Diese Annahmen ergeben für den Haufwerkanteil in dem das Oxidationsmittel vermischt ist, eine Ladungsdichte um $\rho_{\text{Lad}} = 200 \text{ kg/m}^3$

Bezogen auf die Ladungsdichte von TNT (1650 kg/m^3) lässt sich ein Wirkungsfaktor von $f = 0.015$ bestimmen.

Bei diesem kleinen Wirkungsfaktor wird keine gefährliche Detonation stattfinden. Die Sprengleistung liegt weit unter den getroffenen Schutzmassnahmen von 1 kg TNT Äquivalent.

Eine langsame Deflagration einzelner Nester mit Oxidationsmittel kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Solche lokale Deflagrationen können zu tiefsitzenden Brandherden führen, die mit geeigneten Brandbekämpfungsmitteln gelöscht werden müssen.