AlpTransit-Ausbruchmaterial: Abfall oder potentieller Rohstoff?

Cédric Thalmann, Zollikofen

1. AlpTransit Materialbewirtschaftung

Tunnelausbruchmaterial wurde bis vor einigen Jahren – und teilweise immer noch – eher als überflüssiges Material klassiert und entsprechend wie Siedlungsabfall oder Bauschutt behandelt. Die Aufbereitung des Ausbruchs zu Kiesersatz galt infolge der vor einigen Jahren noch reichlich vorhandenen und billigeren alluvialen Kiesvorkommen als wirtschaftlich uninteressant. Auch mit dem vermehrten Aufkommen von Tunnelbohrmaschinen war die Aufbereitung des Fräsmaterials für höhere Ansprüche bis in den 80er Jahren noch kaum denkbar, da auf Grund der damals verwendeten Meisseltypen und -anordnungen die anfallenden Gesteinskörnungen einiges feinkörniger waren als die heutigen.

Erste Erfahrungen mit der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial wurden mit Gesteinsmaterial aus dem konventionellen Sprengvortrieb gemacht. So wurde für die Autobahn der A8 oder der Tunnels Pierre Pertuis, Kerenzerberg, Crapteig und diverser Hochgebirgs- und militärischer Bauten Tunnelaushub aus dem Sprengvortrieb zu Betonzuschlägen oder Koffermaterial aufbereitet und mit Erfolg eingesetzt. Erste Erfahrungen mit der Verwertung von Ausbruchmaterial aus dem TBM-Vortrieb wurden mit Fräsmaterialien aus den Untertagbauten Vereina Nord und Cleuson-Dixence gewonnen. In diesen beiden Projekten wurden die Komponenten ab 16 mm zur Aufbereitung von Betonzuschlagstoffen zugeführt.

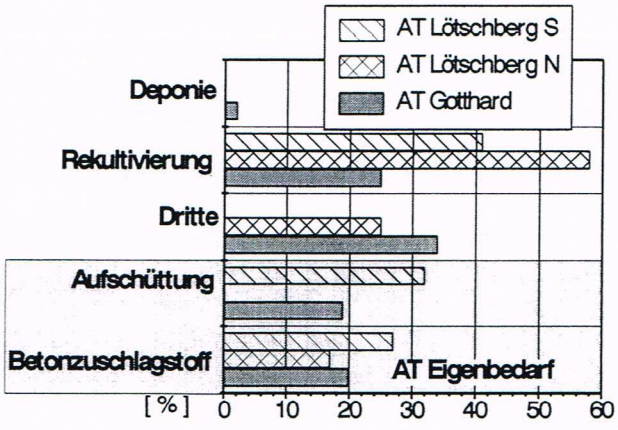
Auch das AlpTransit-Materialbewirtschaftungskonzept sieht eine möglichst breite Weiterverwertung der anfallenden Ausbruchmaterialien vor. Die Vorteile der Weiterverwendung sind:

- Selbstversorgung durch eigene Sand- und Splittprodukte.
- Reduktion von Transportfahrten einerseits für die Entsorgung des Aushubes, andererseits für die Zubringung von Alluvialkiesen.
- Abgabe von überschüssigen Ausbruchmaterialien an Dritte.
- Schonung der noch abbaubaren hochwertigen Alluvialkiesvorkommen.
- Die Verwertung von Tunnelausbruchmaterial wird sich letztendlich auch positiv auf die Gesamtkosten auswirken.

Mit dem Bau der Neuen Eisenbahn Alpen-Transversalen NEAT gilt es, rund 40 Mio. Tonnen Ausbruch- und Aushubmaterialien zu bewirtschaften (diese Menge entspricht etwa einem Jahresbedarf an Kiesprodukten für die Schweiz). Davon entfallen rund 24 Mio. auf Seite Gotthard zwischen Erstfeld und Biasca. Beim Lötschberg-Tunnel fallen rund 15 Mio. Tonnen Ausbruch an.

Das NEAT-Projekt sieht vor, die Versorgung der Baulose mit Schüttgütern und Betonzuschlagstoffen soweit möglich durch die Aufbereitung von eigenem Ausbruchmaterial sicherzustellen. Rund 40% des anfallenden Ausbruchmaterials des Gotthard-Basistunnels (Gesamttotal rund 24 Mio. t) könnten für eigene Zwecke eingesetzt werden (Bild 1).

Bild 1: Benötigte Sand- und Splittprodukte für die AlpTransit-Bauten in Prozent zum anfallenden Tunnelausbruchmaterial



Davon sollen 5 Mio. t (20 %) als Betonzuschlagstoffe wiederverwendet werden. Weitere rund 30 % sollen als Baurohstoffe an Dritte abgegeben werden. Minderwertiges Ausbruchmaterial dient der Rekultivierung von bestehenden Kiesgruben und Steinbrüchen. Die Materialien werden in folgende drei Hauptklassen eingeteilt: Betonzuschlagstoff oder Kiessand-Ersatz; Massenschüttgut; bautechnisch ungeeignetes Material.

Auf der Lötschbergseite Nord ist geplant, rund 17 % des anfallenden Materials als Betonzuschläge einzusetzen. Für die Lötschbergseite Süd sind es rund 27 % als Betonzuschläge und 32 % für Aufschüttungen.

2. Hauptpunkte einer erfolgreichen Wiederverwertung

Eine optimale Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem Untertagebau bedingt

- geeignetes Rohmaterial,
- richtig gewählte Aufbereitungsprozesse und letztendlich einen
- idealen Umgang mit Splittbeton.

3. Einfuss der Zuschlagstoff-Qualität auf die Betoneigenschaften

Im Rahmen der AlpTransit-Gotthard-Vorversuche wurden an der EMPA über 150 Betonversuche mit diversen Ausbruchmaterialien durchgeführt. Die Praxistauglichkeit der Laborerfahrungen wurde an rund einem halben Dutzend Baustellenversuchen überprüft (Pump- und Ortbeton). Daneben haben über ein Dutzend Spritzbetonversuche stattgefunden. Diese breit abgestützten Betonversuche erlauben es, einen Teil der diversen Gesteinstypen bezüglich ihrer Eignung als Betonzuschlagstoff zu evaluieren. Die Bilder 2 und 3 zeigen das Leistungsvermögen von Ort- und Spritzbeton, die mit diversen Zuschlagstypen hergestellt wurden.

Die Bilder 2 und 3 zeigen deutlich, dass die Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit und Wasserleitfähigkeit respektive Wassereindringtiefe) unter anderem auch von der Qualität der verwendeten Aggregate abhängig sind. Die massgebenden Gesteinsparameter, die eine Eignung des Ausbruchmaterials als Betonzuschlagstoff ermöglichen, sind

- einerseits eine minimale Gesteinshärte und
- andererseits eine geeignete Petrographie.

Diese Gesteinsparameter können mittels eines Laborprüfverfahrens in einem Baustellenlabor bestimmt werden.

Bild 2: Leistungsvermögen von Ortbeton in Abhängigkeit der Petrographie der Zuschlagstofftypen (aufbereitete TBM-Zuschläge)

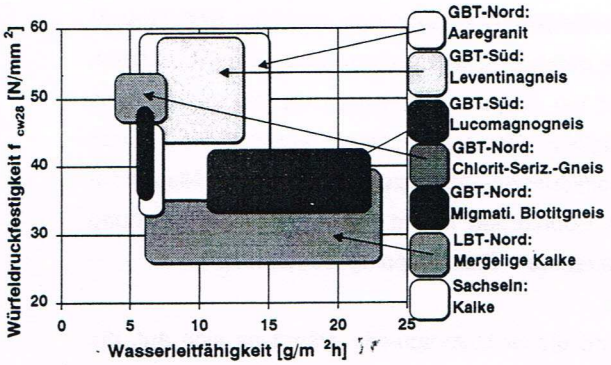
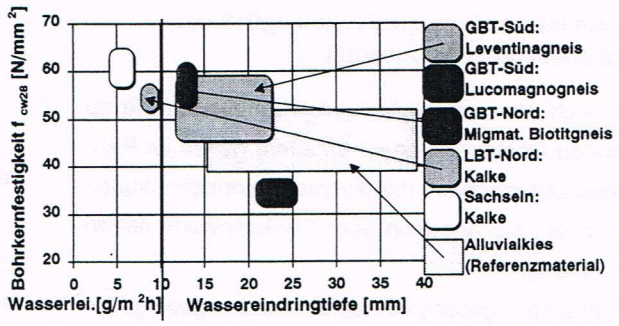


Bild 3: Leistungsvermögen von Spritzbeton in Abhängigkeit der Petrographie der Zuschlagstofftypen (aufbereitete TBM-Zuschläge)



4. Informationsquellen bezüglich der Qualität des Ausbruchmaterials

4.1 Ausgangslage

Geologische Prognosen für den Tunnelbau stützen sich nicht selten auf einzelne Bohrungen, aus denen die oftmals komplexe Geologie mitsamt den Felsparametern abgeleitet werden muss. Geologische Prognosen sind dadurch mit einem gewissen Unsicherheitsfaktor behaftet (Schindler, 1991). Häufige Qualitätsänderungen des

Ausbruchmaterials infolge eines Lithologie-Wechsels, durch das Auffahren von Störungszonen oder durch rasche Alternation zwischen hochwertigen respektive minderwertigen Materialien sind nicht unüblich. Da die Tunnelachse nur in seltenen Fällen senkrecht zu den geologischen Schichten verläuft, kann es vorkommen, dass innerhalb desselben Tunnelquerschnittes ungeeignetes mit hochwertigem Bohrgut vermischt wird.

Nicht selten unterscheidet sich die in-situ-Felsfestigkeit von der Gesteinsfestigkeit des anfallenden Ausbruchmaterials. Vor allem in Gebirgskörpern mit hohen Spannungszuständen (Überlagerungs- und/oder Seitendruck) kann die durch Druckentlastung geschwächte Gesteinsfestigkeit um einiges tiefer liegen als die angetroffene Felsfestigkeit. Gebirgsentlastung äussert sich durch Mikrorissbildungen, Abplatzungen und/oder Niederbrüche. An Bohrkernen macht sich eine Druckentlastung am sogenannten 'Disk-Chipping' bemerkbar.

Auf Grund dieser Unterschiede drängt es sich auf, die massgebenden Gesteinskennwerte zur Beurteilung des Gesteinsmaterials erst am anfallenden Bohrgut zu ermitteln.

4.2 Erste Informationsquellen bezüglich der abzubauenden Felsqualität

Um dennoch einen möglichst guten Einblick in die zu erwartenden Gesteinstypen zu erhalten, gilt es im Rahmen eines Untertagbaus die diversen Informationsquellen zu nutzen, die Angaben über Felskennwerte liefern können (Bild 4):

- Vorhandene geophysikalische und geologisch-geotechnische Messungen, die im Rahmen einer Vorabklärung im Untertagbau durchgeführt werden, können erste Einschätzungen bezüglich der Wiederverwertung des Ausbruchmaterials bringen.
- Die während des Vortriebs eventuell durchgeführte geophysikalische Vorauserkundung kann Hinweise auf eine ändernde Felsqualität geben.
- Auswertungen von TBM-spezifischen und/oder Aufzeichnungen von Vorausbohrungen erlauben qualitative Aussagen über die kommende Felsqualität.
- Interessante Angaben über die Felshärte können bei korrekter Anwendung und Auswertung mit dem Schmidt'schen Rückprallhammer gewonnen werden. Diese Methode genügte den Ansprüchen als einfaches Testverfahren, die in-situ-Gesteinsfestigkeit rasch, kostengünstig und mit ausreichender Genauigkeit zu definieren.

Die Summe aller dieser Informationen bietet ein recht gutes Bild über die Qualität des anfallenden Ausbruchmaterials.

Bild 4: Informationsquellen bezüglich der zu erwartenden Felsqualität

Zeitpunkt der Dateninformation bezogen auf den Materialanfall	Möglichkeiten der Qualitätsbestimmung	Zuverlässigkeit der Aussage klein – hoch
vorher	Prognosen, Erfahrungswerte Geophysikalische Vorabklärungen Bohrung (Geophysik, Kerne)	
während	Felsklassierung Geophysikalische Vorabklärungen TBM- und Bohr-Parameter Kerne, Vorausbohrung Schmidt'scher Rückprallhammer	
nachher	Sondierstollen (geologische Auf-zeichnung u. Materialuntersuchung) Untersuchung des Ausbruchmaterials	

5. Qualitative Beurteilung des Ausbruchmaterials mittels einfacher Prüfverfahren

Diese Materialuntersuchungen verfolgen zwei Hauptziele:

- Das Prüfverfahren dient zur Beurteilung des Ausbruchmaterials und erlaubt eine Entscheidung, ob eine Verarbeitung zu Beton- und/oder Spritzbetonzuschlagstoffen (oder für andere Zwecke) geeignet ist.
- Instrument zur Qualitätssicherung. Bauherr, Bauleitung und Unternehmungen (evtl. auch separates Aufbereitungs-Los) kennen dadurch die genau definierten Rohmaterialien, die zu Betonzuschlägen weiterverarbeitet werden. Bei allfälligen Problemen bezüglich der Betonqualität dienen die erfassten Gesteinsparameter aus den Laborberichten als Diskussionsbasis zur Ermittlung der möglichen Fehlerquellen.

Damit ein solches Untersuchungsprogramm in der Praxis übernommen werden kann, müssen folgende Kriterien erfüllt sein:

- Die Untersuchungen dürfen den Vortrieb in keiner Weise stören oder verlangsamen.
- Das Prüfverfahren muss sowohl eine Beurteilung aller Haufwerk-Typen (Spreng-, TBM-, TSM-Vortrieb, Gesteinsmaterial aus Bohrungen) erlauben, als auch der daraus aufbereiteten Splittprodukte.
- Die zu verwendenden Test-Apparaturen müssen in der Fachwelt gebräuchlich und anerkannt sein.
- Hohe Aussagekraft und Reproduzierbarkeit der Tests.
- Diese Materialuntersuchungen müssen rasch durchführbar (erste Ergebnisse innerhalb ein bis zwei Stunden) und wirtschaftlich vertretbar sein. Dies erfordert ein kleines Feldlabor unmittelbar beim Stollenportal.

Das vorgeschlagene Prüfprozedere selbst ist modular aufgebaut und besteht aus verschiedenen Tests mit unterschiedlichen Aussagen über die Gesteinsparameter. Je nach Bedarf oder visueller Änderung der Gesteinsqualität können nur einzelne oder mehrere Untersuchungen durchgeführt werden.

Aus Zeitgründen empfiehlt es sich, eine Erstbeurteilung (Wiederverwertung als Betonzuschlag: ja/nein) des Felsmaterials durch den Geologen im Stollen selbst durchzuführen. Hier wird entschieden, ob das Ausbruchmaterial in die Aufbereitungsanlage zur Herstellung von Betonzuschlagstoffen gelangt oder für andere Zwecke verwendet wird. Unabhängig von dieser Erstbeurteilung wird Probenmaterial entnommen und gemäss dem Schema in Bild 5 untersucht. Im Falle einer Fehlentscheidung bei der Erstbeurteilung muss damit gerechnet werden, dass eine gewisse Menge (ein Abschlag, ein Schutterzug usw.) an ungeeigneten Rohmaterialien auf das Zwischenlager für die Aggregatproduktion gelangt. Diese werden aber im Aufbereitungsprozess mit geeigneten Betonzuschlägen vermischt, so dass ein Verdünnungseffekt stattfindet.

Eines der wichtigsten Kriterien, das Ausbruchmaterial erfüllen muss, damit es zu Betonzuschlägen veredelt werden kann, ist eine genügend hohe Gesteinsfestigkeit. Betonnormen machen keine Angaben über minimale Druckfestigkeitsanforderungen der Splittprodukte. In der Praxis wird oft eine minimale Druckfestigkeit von mindestens 100 N/mm^2 für Betonaggregate vorgeschlagen (Dubuisson, 1959; Bundesverband Naturstein-Industrie, 1993). Gestützt auf zahlreiche Materialuntersuchungen und auf über 150 Labor- und Baustellen-Betonversuche, die im Rahmen der AlpTransit-Voruntersuchungen durchgeführt wurden (Kruse & Weber, 1995), kann als Richtgrösse für einen Beton der Festigkeitsklasse B40/30 eine minimale Gesteinsfestigkeit von 75 N/mm^2 empfohlen werden.

Der von der CEN-Norm eingeführte Los Angeles-Index (CEN/TG/07/A5, 1992) beurteilt die Festigkeit der Zuschläge indirekt auf Grund ihres Abrieb-Verhaltens gegenüber Schlag und Zertrümmerung. Das Abrieb-Verhalten ist unter anderem auch von der Gesteinsfestigkeit abhängig. Es kann aber durchaus vorkommen, dass Zuschläge mit einem genügenden Los Angeles-Wert eine zu geringe Druckfestigkeit aufweisen und umgekehrt. Das Los Angeles-Verfahren gemäss CEN für Betonzuschläge wird sich kaum als einfache und rasch durchzuführende Laborprüfung durchsetzen können, da der zeitliche Aufwand und die benötigten Probenmengen zu hoch sind. Ein ähnliches, aber vereinfachtes Testverfahren mit guter Aussagekraft, welches innerhalb 1 1/2 Stunden erste Ergebnisse liefert, ist der sogenannte LCPC-Brechbarkeits-Index [1]. Bei diesem Verfahren wird die Gesteinsprobe infolge des Mahleffekts eines drehenden Metallplättchens einem Abriebprozess unterworfen, der sich mit dem Los Angeles-Verfahren vergleichen lässt. Bild 6 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen diesen beiden Verfahren.

Der Brechbarkeits-Test wird als tägliches Prüfverfahren im Rahmen einer Qualitätssicherung vorgeschlagen. Als Referenzverfahren dient der Los Angeles-Index, der als Eichverfahren eingesetzt werden kann. Im gleichen

---

1 Essai d'abrasivité et de broyabilité, entwickelt vom Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) in Paris (AFNOR P18-579). Der Versuch wird an 500g der Probenfraktion 4/6.3mm durchgeführt. Das zu prüfende Material wird in einen zylindrischen Behälter eingefüllt, worin ein Metallplättchen (5 x 25 x 50mm; Härte: Rockwell B 60 - 75 HRB) während 5 Minuten mit einer Drehzahl von 4'500U/min dreht. Die Apparatur weist eine Grösse von L45 x B22.5 x H47.5cm auf. Der Abrasimeter wiegt rund 60kg.

Versuchsdurchgang lässt sich neben dem sogenannten Brechbarkeits-Index BR ein Abrasivitäts-Index A_{BR} bestimmen.

Als weiteres Verfahren zur Bestimmung der Gesteinshärte wird der Punktlast-Index (indirekte Zugfestigkeit) empfohlen, der weit verbreitet ist und einen oft verwendeten Gesteinsparameter im Untertagebau darstellt.

Damit der zeitliche Aufwand für die Probenzubereitung möglichst minim gehalten werden kann, werden diese Laboruntersuchungen am Ausbruchmaterial selbst durchgeführt. Die Brechbarkeits- und Los-Angeles-Testverfahren beziehen sich verständlicherweise auf aufbereitete Splittprodukte mit isometrischen Kornformen und nicht auf das anfallende Bohrgut. Auch der Punktlastindex wird gemäss ISRM (1985) an Bohrkernen oder mehr oder weniger gleichförmigen Prüfkörpern durchgeführt.

Bild 5: Prüfschma zur qualitativen Beurteilung von Tunnelausbruchmaterial zur Herstellung von Betonzuschlagstoffen

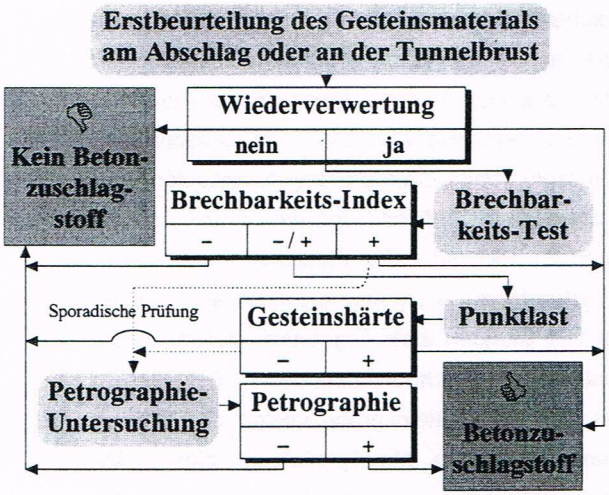
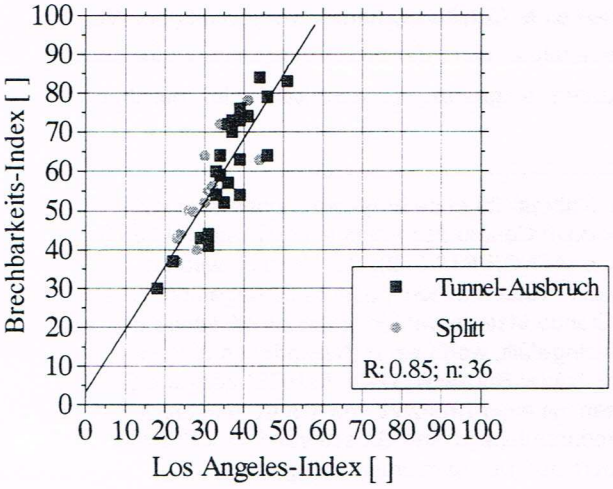
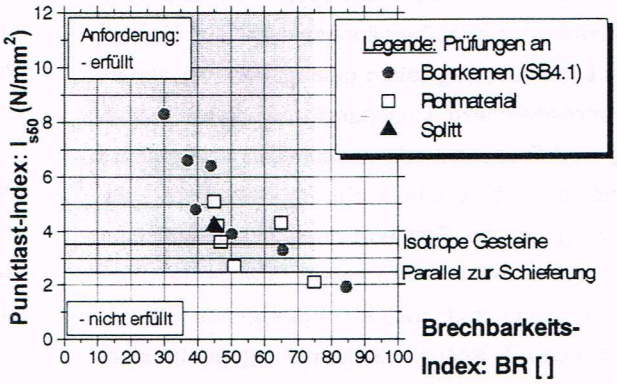


Bild 6: Korrelation Los Angeles-Index zum Brechbarkeits-Index (R: Korrelationskoeffizient; n: Anzahl Proben).



Die Anwendung dieser Prüfverfahren hat ergeben, dass der Kornform-Einfluss der plattig-stengeligen Gesteinsproben – insbesondere bei TBM-Rohmaterialien – auf das Versuchsergebnis zu gravierend ist und somit eine Testdurchführung nach Norm nicht zulässt. Mittels geeigneter Probenzubereitung (Aussiebung mit Spaltsieben) und modifizierten Auswertungsformeln für den Punktlast-Versuch (massgebende Bruchfläche für TBM-Chips) konnte der Einfluss des Formfaktors minimiert und konstant gehalten werden. Diese Anpassungen erlauben eine repräsentative Beurteilung sowohl des Ausbruchmaterials des TBM-, TSM- respektive Spreng-Vortriebs als auch der aufbereiteten (gebrochenen) Splittprodukte. Sogar die Prüfung von Bohrkernen aus Sondierbohrungen ist mit diesem Prüfverfahren möglich (Bild 7).

Bild 7: Bestimmung der Gesteinshärte mittels Brechbarkeits-Index BR und Punktlast-Index PL aus dem Zwischenangriff Sedrun (AlpTransit Gotthard). Geprüft wurden Gesteinsmaterialien aus Bohrkernen, Ausbruchmaterial (Sprengvortrieb) und deren Splittprodukte.



Neben der Bestimmung der Gesteinshärte stellt die petrographische Beschreibung ein weiteres Kriterium für eine Evaluation des Ausbruchmaterials dar. Für eine erste Beurteilung genügt eine makroskopische Beschreibung und Klassifikation des Bohrgutes in Anlehnung an CEN/TC/154/SC6/N137E (1991).

Im Hinblick auf eine Wiederverwertung des anfallenden Rohsandes muss der Gehalt an ungeeigneten Komponenten bestimmt werden. In Sedimentgesteinen sind es vor allem weiche, leicht mergelige Gesteinsbruchstücke und gröbere Calcitkristalle mit ausgeprägter Spaltbarkeit, die als ungeeignet bezeichnet werden. Bei Tunnelbauten im zentralen Alpenraum besteht ein grosser Teil der zu durchfahrenden geologischen Schichtreihen aus kristallinen Gesteinen, die einen hohen Anteil an Schichtsilikaten aufweisen können. Diese sind oftmals < 2 mm im Durchmesser und werden durch den Aufbereitungsprozess in den Feinstfraktionen angereichert.

Freie Schichtsilikate (nicht im Gesteinsverband eingebunden), die mit Mischwasser und Zement in Kontakt kommen, haben einen negativen Einfluss sowohl auf Frischbeton- als auch auf Festbetoneigenschaften. Mit steigendem Gehalt an Glimmer nimmt auch die Wassermenge für gleichbleibende Verarbeitbarkeit zu. Gesamtglimmergehalte von < 10 Stück-% (bezogen auf die Gesamt-Zuschläge im Betongemisch) haben sich in den durchgeführten Untersuchungen nicht merklich auf Betoneigenschaften ausgewirkt. Eine quantitative Glimmerbestimmung der ungeeigneten Komponenten in der Sandfraktion 0 bis 4 mm wird am einfachsten mittels Binocular an Unterfraktionen durchgeführt.

Nach Bedarf empfiehlt es sich bereits in der Phase der Voruntersuchungen eines Untertagebaus, Aggregatuntersuchungen an repräsentativen Gesteinsproben (Handstücke aus der Oberfläche oder aus Sondierstollen, Bohrkerne usw.) durchzuführen, wie zum Beispiel Frost-/Tauwechsel-Verhalten, Gehalte an Chlorid, schwefelhaltige Bestandteile, Radioaktivität der Zuschläge usw.

Untertagbauten fördern wegen der darin vorherrschenden klimatischen Bedingungen (hohe Feuchtigkeit und Temperaturen) eine mögliche Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR). Die bekannteste Art der Alkali-Aggregat-Reakation ist die sogenannte Alkali-Silikat-Reaktion (ASR), die in Form einer chemischen Reaktion zwischen löslichen Alkalien (K^+, Na^+) im Betongemisch und löslichem Silizium oder reaktiven Silikaten der Aggregate auftritt. Das Produkt dieser Reaktion ist ein expansives Gel, welches zu Rissen im Betoninnern und an der Oberfläche führen kann. Auf internationalem Niveau wurde keine einheitliche Normierung betreffend der AAR erreicht, da die möglichen Reaktionen vom jeweiligen Zuschlagstyp der geologischen Region abhängig sind. In den CEN-Normen wurde auf eine europaweite Normierung verzichtet und empfohlen, auf die nationalen Normen und Erfahrungen zurückzugreifen. Die Schweiz kennt keine Normen bezüglich der AAR, da bis anhin kaum Schadensfälle öffentlich bekannt wurden (Hammerschlag & Regamey, 1995). Die im Rahmen der AlpTransit-Untersuchungen durchgeführten AAR-Prüfungen haben ergeben, dass von den bis anhin acht untersuchten Aggregat-Typen aus kristallinen TBM-Ausbruchmaterialien eine Gesteinssorte als potentiell gefährdet bezeichnen werden muss (AAR-Prüfungen wurden gemäss französischen Normen durchgeführt: AFNOR P18-588 Mikrobar-Mörtel Schnellprüfung und AFNOR P18-589 Bestimmung der potentiellen Reaktivität der Aggregate mittels chemischem Versuch).

6. Einfluss der Abbaumethode und Geologie auf das Ausbruchmaterial

Die heutigen stark weiterentwickelten Vortriebsmethoden sind neben dem konventionellen Sprengvortrieb der maschinelle Vortrieb mit Tunnelbohr-(TBM) und Teilschnittmaschinen (TSM). Im Vergleich zum Haufwerk des konventionellen Sprengvortriebes ist dasjenige des maschinellen Vortriebes feinkörnig und fällt durch seine typische plattig-stengelige Kornform auf.

TBM-Fräsmaterialien lassen sich in vier charakteristische Gruppen unterteilen (Bild 8):

- Gesteinsmehl: Zertrümmerungszone im Kontaktbereich Fels-Diske
- Gesteinssplitter, -bruchstücke: Lösen und Abplatzen kleinerer Gesteinskomponenten
- Chip (Span): Lösen zwischen zwei Schneidrollenspuren
- Blöcke: Lösen von grösseren Bruchstücken infolge Trennflächen im Fels

Um eine genügende Menge an Betonzuschlägen der Fraktion > 16 mm aufbereiten zu können (Brechen, Waschen, Klassieren), wird ein möglichst hoher Anteil an Grobkomponenten im TBM-Fräsmaterial angestrebt. Der Grobanteil wiederum ist massgeblich von den in

Bild 9 aufgeführten maschinenenspezifischen und geologischen Parametern abhängig:

- Der Schneidrollenabstand übt den wichtigsten Einfluss seitens der TBM auf die Korngrössenverteilung des Fräsmaterials aus. Ein erhöhter Spurabstand steigert die Komponentengrösse und die Menge an gedrungenen (gröberen) Bruchstücken im Ausbruchmaterial. Es ist die einzige maschinenspezifische Änderung, die ohne grösseren Aufwand vorgenommen werden kann. Fräsversuche in einem Granodiorit haben gezeigt, dass Schneidrollenabstände im Brustbereich von 130 mm nicht unrealistisch erscheinen und dabei die Vortriebsleistung nicht negativ beeinflusst wird (Büchi & Thalmann, 1995). Der Anteil an Komponenten > 32 mm wird dadurch beinahe verdoppelt (Bild 10).
- Diverse Fräsversuche haben ergeben, dass ein erhöhter Anpressdruck nicht sicher zu gröberen Chips führt (overbreak).
- Einen kleineren und kaum erkennbaren Effekt auf die Bohrgutgrösse hat auch der Schneidring-Abnützungsgrad, da dieser, gesamthaft betrachtet, nicht stark variiert.
- Neben diesen maschinenspezifischen Parametern beeinflussen vor allem geologische und petrographische Verhältnisse die Grösse des anfallenden Ausbruchmaterials. Mit zunehmender Dichte an Trennflächen im Gebirge und/oder erhöhtem Gebirgsdruck steigt auch der Anteil an groben Komponenten.

Zusammenfassend sind in Bild 11 die anfallenden Materialmengen des TBM-Vortriebs im Vergleich zu anderen Vortriebsarten aufgeführt. Aus der Zusammenstellung wird ersichtlich, dass beim konventionellen Sprengvortrieb der grösste Anteil an groben Komponenten anfällt (Büchi & Thalmann, 1996).

Bild 8: Schematische Darstellung des Fräsvorganges mit den anfallenden TBM-Bohrgut-Typen

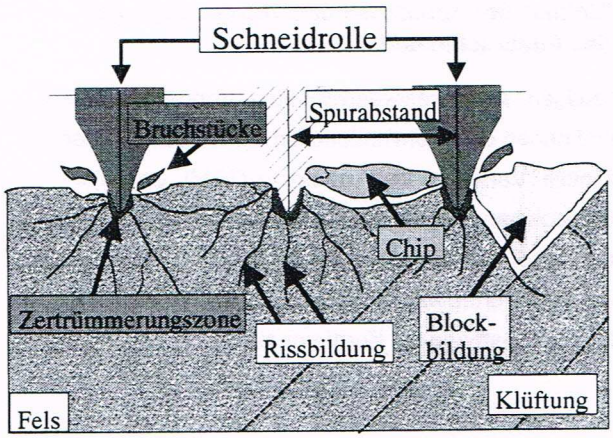


Bild 9: Einfluss der massgebenden maschinenspezifischen und geologischen Parameter, die zu einer erhöhten Menge an grösseren TBM-Ausbruchmaterialien führen

Maschinenspezifische Parameter	Einfluss klein – hoch
grosser Schneidrollenabstand	
ausgewogener Anpressdruck	
kleiner Abnützungsgrad der Schneidrollen	
Geologische Parameter	
Trennflächen im Fels (Klüftung, Bankung, usw.)	
hoher Gebirgsdruck	
vorhandene Textur (Schieferungsgrad, Anisotropie)	
Winkel zwischen Textur zur Tunnelachse	

Bild 10: Abhängigkeit der Korngrössenverteilung zum TBM-Schneidrollenabstand

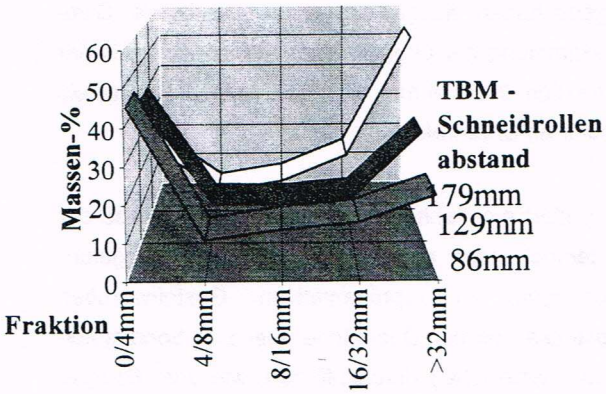


Bild 11: Materialanfall in Massenprozenten für verschiedene Vortriebsarten (Min.- bzw. Max.-Werte)

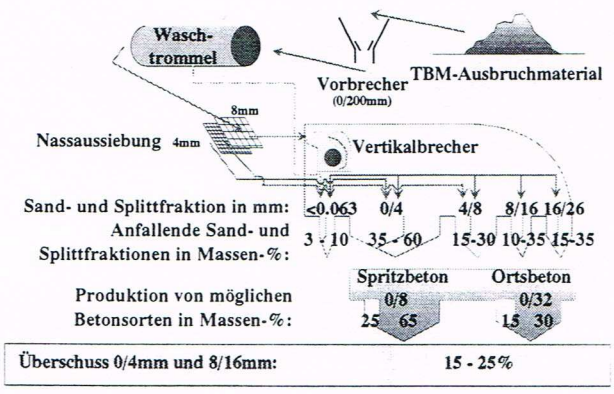
Art des Tunnelvortriebs	Schneid-rollen-abstand	0-4	>32	>100
	[mm]			
Konvention. Sprengvortrieb(Kristalline Gestei.)	-	2-5	85-95	75-85
Hinterschneidtechnik (Sandstein)	-	15-20	65-75	45-60
TSM-Vortrieb (Jura-Kalke)	-	15-40	5-35	0-5
TBM mit Warzenmeissel	60-70	30-50	2-20	0
TBM mit Diskenmeissel (Sedimente, kristall. Ge.)	65-85	15-50	5-50	0-10
TBM mit vergrössertem Schneidrollenabständen (Plutonit)	86 129 172	45 40 20	20 30 35	0 5 15

7. Aufbereitung von geeignetem TBM-Ausbruchmaterial zu Betonzuschlagstoffen

Eine optimale Zubereitung von Betonzuschlägen aus TBM-Fräsmaterial benötigt – im Gegensatz zum Ausbruch aus dem Sprengvortrieb – zusätzliche aufbereitungstechnische Massnahmen (Thalmann, 1994 und 1995). TBM-Bohrgut muss vorab intensiv mit Waschtrommeln vom Feinstanteil gereinigt werden. Dies bedingt eine leistungsfähige Schlammpressanlage (Bild 12). Weiter gilt es, die a priori kleinen TBM-Gesteinsbruchstücke mittels geeigneter Verfahren schonend zu brechen, damit kein Sandüberschuss anfällt. Hierbei hat sich das sogenannte Vertikal-Brechersystem, in welchem die Komponenten durch Korn-Korn-Kontakt gebrochen werden, als geeignet erwiesen. Zahlreiche Aufbereitungsversuche haben gezeigt, dass Rohmaterial erst ab der Fraktion 8 mm (zum Teil auch höher) gebrochen werden muss, da die ungebrochenen Körner im Bereich 0-8 mm oftmals die Kornform-Anforderungen an Betonzuschläge bereits erfüllen. Diese ungebrochenen Komponenten können mit denjenigen der gebrochenen Fraktionen vermischt werden.

Bei diesen verfahrenstechnischen Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Wiederverwertungsrate der TBM-Materialien in bezug auf die Zuschlagstoffproduktion um einiges höher liegt als angenommen. So können aus aufbereiteten Fräsmaterialien (Vertikalbrecher) durchschnittlich 35 % eines Betongemisches 0-32 mm und 45 % eines Spritzbeton-Gemisches 0-8 mm produziert werden. Gemäss Bild 12 beträgt der 'Überschuss' somit im Mittel 20 %.

Bild 12: Schematische Darstellung der Aufbereitung von TBM-Material mit Angabe der Materialflüsse und den daraus produzierbaren Betonprdukten



8. Erfahrungen mit Splittbeton

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse aufgeführt, die im Zusammenhang der AlpTransit-Versuche gewonnen werden konnten.

8.1 Pump- und Ortbeton

- Die SIA-Betonnormen (SIA 162) basieren auf Erfahrungen, die mit Rundkies gemacht werden konnten. Die darin aufgeführten bekannten Beziehungen der Betoneigenschaften können im Zusammenhang mit Splittbeton nicht ohne weiters übernommen werden.
- Splittbeton benötigt auf Grund des höheren Holraumgehaltes 5 bis 20 % mehr Zement im Vergleich zu Alluvialkiesgemischen.
- Ein Wasser-Zement-Verhältnis (W/Z) unter 0.5 für einen gut verarbeitbaren Beton ist auch mit gebrochenen Zuschlägen möglich. Die Variationsbreite des W/Z-Wertes liegt aber zwischen 0.43 bis 0.63.
- Die Elastizitätswerte (E-Modul) liegen bis 50 % unter der bekannten Grössenordnung des Betons mit Alluvialkies. Der E-Modul des Betons ist abhängig vom Typ der eingesetzten Zuschläge. So weisen Betone mit kristallinen Komponenten einen tieferen E-Modul auf als mit Zuschlagstoffen bestehend aus Kalk. Tiefere E-Module für Tunnelbauten sind nicht als Negativpunkt zu betrachten, da diese druckhaftes Gebirge besser auffangen können.
- Das Schwindmass des Splittbetons ist infolge der erhöhten Zementmengen generell höher als mit Rundkies. Aufgrund der geringeren E-Module konnten aber keine Schwindrisse am Beton selbst beobachtet werden.

8.2 Spritzbeton

- Der Umgang mit Splittbeton beim Spritzbeton ist generell störungsanfälliger als mit Rundkies und bedarf somit grösserer Sorgfalt. Der benötigte Pumpendruck ist für gebrochene Aggregate höher.
- Die Zementmenge beträgt mindestens 450 kg/m^3.
- Die gemessenen Feinstaubbelastungen (MAK-Werte) mit kristallinen Zuschlägen liegen in tolerierbaren Grössenordnungen.
- Die Rückprallwerte weichen mit 4 bis 13 % nicht wesentlich von denjenigen mit Rundkies ab.

9. Schlussbemerkung

Haufwerk aus dem Untertagbau (auch TBM-Fräsmaterial) wird in Zukunft vermehrt als Kiesersatzprodukt eingesetzt werden. Damit diese Betonzuschlagstoffe die gestellten Betonanforderungen erfüllen können, muss deren Eignung im Sinne einer Qualitätssicherung mittels praxisfreundlichen Prüfverfahren nachgewiesen werden. Solche Eignungsprüfungen werden bereits heute auf der Hochgebirgbaustelle Cleuson-Dixence (TBM-Vortrieb) und beim kürzlichen begonnen Zwischenangriff in Sedrun (Spengvortrieb) eingesetzt.

10. Verdankungen

Dieser Beitrag ist als Kurzfassung aus der Dissertation 'Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen' entnommen (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Ingenieurgeologie; Referent: Prof. Dr. C. Schindler, Korreferenten: Prof. Dr. Böhni, Dr. E. Büchi, W. Studer). Die Forschungsarbeit konnte dank der finanziellen Unterstützung der Schweizerischen Bundesbahnen SBB und der Bern-Lötschberg-Bahn BLS realisiert werden.

11. Literatur

Büchi, E., Mathier, J. & Wyss, Ch. (1995): Gesteinsabrasivität - ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein. Tunnel 5/95.

Büchi, E. & Thalmann, C. (1995): Wiederverwertung von TBM-Ausbruchmaterial . Einfluss des Schneidrollenabstands. TBM Know-How zum Projekt NEAT, Atlas Copco-Robbins Symposium, 16. März 95, Luzern.

Büchi, E. & Thalmann, C.(1996): Wiederverwendung des Haufwerks bei konventionellem Vortrieb im Vergleich zu TSM- und TBM-Vortrieb. Atlas Copco & Dynamit Nobel Bohr- und Sprengtechnik-Symposium, 18. Januar 96, Zürich.

Bundesverband Naturstein-Industrie (1993): Bauen mit Splittbeton. Bundesverband Naturstein-Industrie e.V., Bonn.

Dubuisson, B. (1959): Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment. Exécution de la construction traditionnelle, Titre II-3e Partie, Paris.

Hammerschlag, J.-G. & Regamey, J.-M. (1995): Barrage de l'Ilsee - assainissement. Research and development in the field of dams, proceedings, september 1995 Crans-Montana, Switzerland

Kruse, M. & Weber, R. (1995): Beton aus TBM-Ausbruchmaterial. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 47.

Schindler, C. (1991): Wie sicher sind geologische Prognosen? Sammelband des Symposiums 'Sicherheit und Risiken bei Untertagebauwerken' vom 21.-22. März 1991, ETH Zürich.

Thalmann, C: (1994): Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem konventionellen und maschinellen Tunnelvortrieb zu Kiesersatzprodukten - eine Herausforderung an die Kieswerke. Schweizer Baustoff-Industrie 6/94.

Thalmann, C: (1995): Optimale Wiederverwertung von TBM-Ausbruchmaterial. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 47.

Thalmann, C. (1996): Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen. Beiträge zur Geologie der Schweiz, geotechnische Serie, Lief. 91.

AFNOR P 18-579 (1990): Granulats - essai d'abrasivité et de broyabilité. Association Française de Normalisation, Paris

AFNOR P 18-588 (1991): Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin - Essai accéléré sur mortier Microbar. Association Française de Normalisation, Paris.

AFNOR P 18-589 (1992): Réactivité potentielle de type alcali silice et alcali silicate - test cinétique-méthode chimique. Association Française de Normalisation, Paris

CEN/TC/154/SC6/N137E: (1991): Draft simplified method for description and petrography submitted to SC6 for approval in november 1991. Europäisches Komitee für Normung.

CEN/TG/07/A5 (1992): Method for determination of the resistance to fragmentation: Los-Angeles-Test. Europäisches Komitee für Normung.