

# Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem konventionellen und maschinellen Tunnelvortrieb zu Kiesersatzprodukten – eine Herausforderung an die Kieswerke

C. Thalmann

In den nächsten Jahren fällt aufgrund zahlreicher neuer Tunnelbauten eine bedeutende Menge an Ausbruchmaterialien an. Eine Weiterverwertung der qualitativ geeigneten Materialien drängt sich aus verschiedenen Gründen auf. Die benötigte Splittmenge für Tunnelbauten – welche rund 30 Prozent des anfallenden Ausbruchmaterials entspricht – könnte aus geeigneten,

Ausgangsmaterialien für Beton, Spritzbeton, Koffermaterial, Auffüllungen, usw. gewonnen werden. Eine möglichst nahe der Tunnelbaustelle gelegene Aufbereitungsanlage würde Transportfahrten reduzieren. Der für eine Weiterverwertung geeignete Überschuss könnte an Dritte abgegeben werden.

## Bewirtschaftung von Tunnelausbruchmaterialien

Tunnelausbruchmaterial wurde in der Vergangenheit vorwiegend für einfache Zwecke, etwa als Massenschüttgut eingesetzt. Überflüssiges Material wurde wie Siedlungsabfall oder Bauschutt entsorgt. In neuerer Zeit wurde vereinzelt Ausbruchmaterial – vorwiegend aus dem konventionellen Sprengvortrieb – für Tunnelbauwerke oder andere Zwecke mit Erfolg zu Splitt und Schotter verarbeitet und eingesetzt. So wurden z.B. für Bauten der N8 (Koffermaterial und Ortsbeton) das aus Kalken und Sandsteinen bestehende Ausbruchmaterial verwendet (Giudicetti, F. et al.; 1983). Ebenfalls wurden für Betonbauten und Koffermaterial der Strassentunnel Kerenzberg (Kieselkalke) und Pierre Pertuis (Malm-Kalke) maschinell und konventionell gewonnene Ausbruchmaterialien gemischt eingesetzt. Kieselkalke des Tunnels Crapteig wurden z. T. ebenfalls als Betonzuschläge weiterverwertet (Marty, Th.; 1992). In Amsteg und am Vereina wird zur Zeit das konventionell gewonnene, kristalline Material je nach Qualität zu verschiedenen Splittprodukten verarbeitet. Die Paragneise aus dem Vereinatunnel sollen sogar als Hartschotter für die zukünftige Rhätische Bahn dienen.

Im Gegensatz zum konventionell gewonnenen Ausbruchmaterial kann maschinell gewonnenes, für gewisse Zwecke unbehandelt eingesetzt werden. So kann unverändertes Ausbruchmaterial aus TBM (Tunnelbohrmaschine) oder TSM (Teilschnittmaschine) generell als Massenschüttgut für Dammschüttungen, Auffüllungen, Hinterfüllungen, Lärmschutzwälle, usw. verwendet werden. Die Anforderungen an solche Materialien sind gering. Die Verwendung solcher Produkte hat sich auch im Forstrassenbau als positiv erwiesen. Vor allem Kalke, wie z.B. aus dem Tunnel Bözberg oder Pierre Pertuis, zeigen ein stark bindiges Verhalten auf, welches die Staubeentwicklung eindämmt (»Juragrien«). Unverändertes TBM-Ausbruchmaterial kann weiter im Strassenbau als Kiessand II verwendet werden (Figur 2). Materialien

aus dem Tunnel Mappo-Moretina in Locarno bestehend aus Gneisen und Amphiboliten (EPFL; 1993) sowie Gneise aus den Kraftwerkstollen Pradella-Martina, haben sich als gut verdichtbar erwiesen.

Die Tendenz der heutigen Tunnelprojekte weist darauf hin, dass in Zukunft vermehrt Tunnelausbruchmaterial als Kiesersatz eingesetzt wird. Die im Rahmen der Alptransit-Vorprojekte erstellten Materialbewirtschaftungskonzepte zeigen deutlich, dass auch hier eine umfassende Weiterverwertung von Tunnelausbruchmaterial angestrebt wird. Neben konventionell gewonnenem Ausbruchmaterial sollen auch TBM-Materialien für die Bauprojekte am Vereina, in Amsteg und für Cleuson-Dixence eingesetzt werden. Mit dem Gebrauch von Kiesersatzprodukten aus dem TBM-Vortrieb werden wir in naher Zukunft Neuland betreten. Von allen Projektbeteiligten fordert dies grosse Flexibilität und die Bereitschaft, einen Mehraufwand für umfassende Voruntersuchungen zu leisten. Schliesslich führt der Gebrauch von Kiesersatzprodukten zur Schonung der hochwertigen Alluvialkiesvorkommen (Jäckli & Schindler; 1986).

## Entstehung und Charakterisierung von Tunnelausbruchmaterial aus dem TBM-Vortrieb

Zum besseren Verständnis wird hier kurz auf den maschinellen Fräsvorgang und die Entstehung des Ausbruchmaterials eingegangen.

### Fräsvorgang und Entstehung von TBM-Material:

Das Kernstück einer Vollschnitt-TBM bildet die Kopfplatte am Bohrkopf, die je nach Durchmesser mit einer unterschiedlichen Anzahl von diskusähnlichen Schneidwerkzeugen in einem Abstand (Spacing) von 60 bis 80mm ausgestattet ist. Diese werden unter grosser Last – bis zu 20 Tonnen pro Schneidwerkzeug – auf konzentrischen Kreisen um die Drehachse der Kopfplatte gerollt und dringen zwischen 2 bis 10

mm pro Bohrkopfdrehung in den Fels. Bei diesem Vorgang wird der Fels im Kontaktbereich mit dem Werkzeug regelrecht pulverisiert (crushed zone), und es kommt zur Bildung von radialverlaufenden Rissen an der Felsoberfläche. Sobald sich Rissysteme von zwei benachbarten Schneidspuren verbinden, kommt es zum Wegsplintern von grösseren Gesteinsbruchstücken, den sogenannten Chips. Bei diesem komplexen, bis heute nicht genau modellierbaren Vorgang, wirken sowohl Zug- wie auch Scherkräfte. An den Chipsrändern selber bilden sich ebenfalls Mikrorisse, die gegen das Kornzentrum hin aber ausheilen. Dass so entstehende Gesteinsbruchstück weist eine deutlich plattig-ellipsoide Kornform auf (Figur 1), mit stark rauher Oberfläche und nicht selten eckigen Kanten. Bei Teilschnittmaschinen (TSM), die eher in weicheren Gesteinen eingesetzt werden, wird der Fels geschrämmt, was zu ähnlichen Kornformen führt. Einen wichtigen Einfluss auf die Rissverteilung, deren Eindringtiefe und somit die Chipdicke, üben der Anpressdruck und der Abstand der Schneidwerkzeuge aus. Neben den maschinenspezifischen Parametern kommen bei der Chipsbildung auch die in Tabelle 1 aufgeführten geologischen Verhältnisse zum tragen. Im Gegensatz zu den bedingt beeinflussbaren TBM-Parameter, können die geologischen Verhältnisse nicht ausgewählt werden.

### Kornform der TBM-Chips:

Gewisse Trends bezüglich der Kornform zeichnen sich unabhängig der in Tabelle 1 aufgelisteten Faktoren ab: Chips mit einem grösseren Korndurchmesser als 8 mm, weisen

generell ein  $c/b$ -Kornachsenverhältnis  $< 0.5$  auf ( $c$  = kleinster;  $b$  = mittlerer ;  $a$  = grösster Korndurchmesser) und sind somit als plattig zu bezeichnen (Figur 1). Die Fraktionen kleiner 8mm weisen ein zunehmendes  $c/b$ -Kornachsenverhältnis auf und kommen vermehrt in den Kornformbereichen für stengelige und kubische Körner zu liegen. Generell ist bei abnehmender Grösse der Korngruppen eine Zunahme des  $c/b$ - und des  $c/a$ -Achsenverhältnisses und eine Abnahme des  $b/a$ - Achsenverhältnisses zu beobachten.

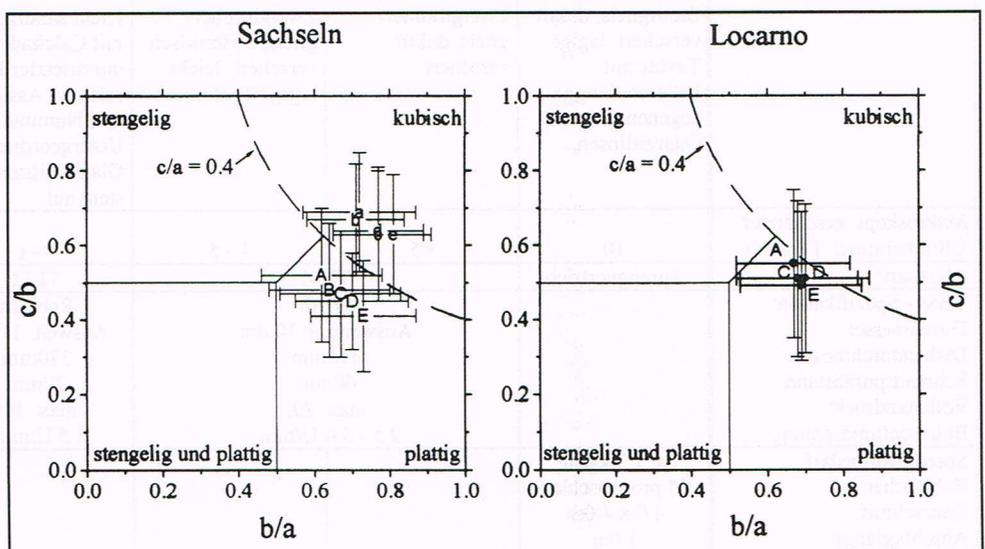
### Kornverteilung:

Siebanalysen zeigen, dass unveränderte TBM-Materialien eine relativ gute Abstufung aufweisen und nicht von einer oder mehreren Kornfraktion beherrscht werden (Figur 2). Die Siebkurven werden durch den mittleren Korndurchmesser bestimmt und sagen somit nichts über Länge und Dicke der Chips aus. Interessant ist aber, dass die Siebkurven beinahe ausnahmslos in den Korngrössenverteilungsbereich für Kiessande II (nach VSS 670 120b) zu liegen kommen, deren Norm keine Konzession an die Kornform stellt. Der Anteil der Fraktionen  $\leq 0.02$  mm beträgt für unveränderte TBM-Materialien in der Regel 1 bis 5 Massen-%. Diese Aussage gilt nur für Proben, die unmittelbar nach dem Fräsvorgang auf dem Förderband entnommen wurden. Durch Materialumlagerungen und nach Transportfahrten nehmen Ton- und Siltfraktionen mengenmässig zu. Dies ist auf gegenseitige Abrasion von kantigen und länglichen Komponenten zurückzuführen (Figur 2). Infolge der Wasserzugabe auf den TBM-Förderbändern zur Staubunterdrückung hatten die Feinst-

Geologische Parameter = nicht beeinflussbar	Maschinenspezifische TBM-Parameter = bedingt beeinflussbar
Petrographie	Bohrkopfdrehzahl
Felsfestigkeit (Härte u. Sprödigkeit)	Drehmoment
Abrasivität des Gesteins	Andruck pro Werkzeug
Klüftung und Trennflächen	Diskform und Diskenzustand
Textur (Anisotropie)	Diskendurchmesser
Struktur	Schneidspurabstand (Spacing)
Orientierung der Gesteinstextur relativ zur Tunnelachse	Vollschnitt- oder Erweiterungsmaschine (Teilschnittmaschine)

**Tabelle 1 (oben):**  
Einfluss von geologischen und maschinenspezifischen Parameter auf die Chipbildung und -form.

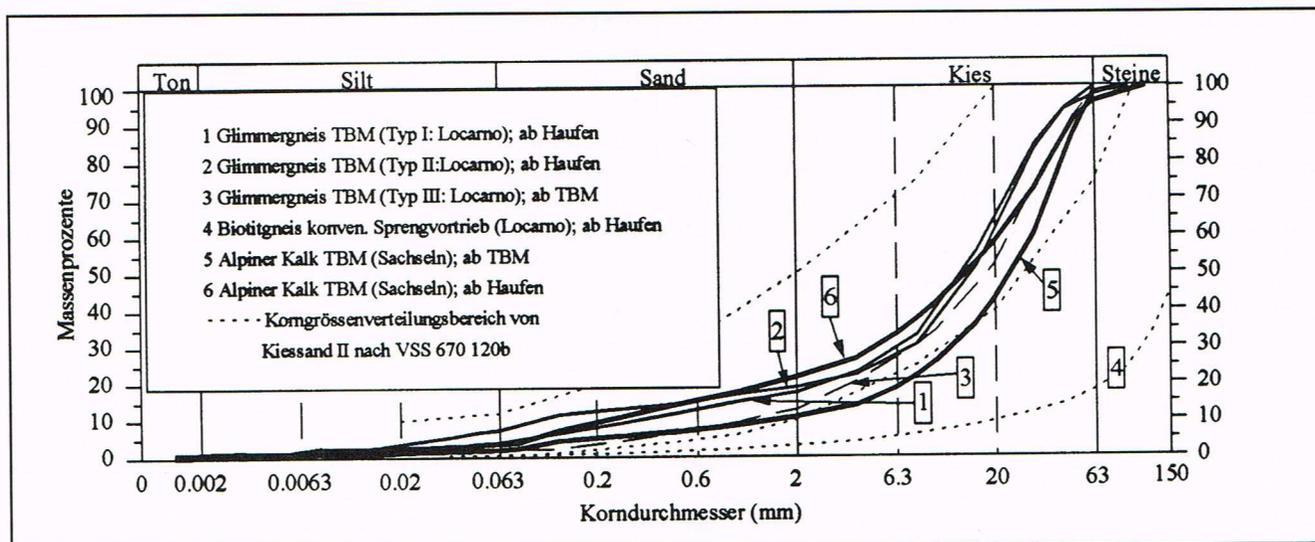
**Figur 1: Kornformdiagramm** mit Mittelwerten (A,a – E,e) und Standardabweichungen (+) für verschiedene Fraktionen von unaufbereitetem und aufbereitetem TBM-Materialien (alpiner Kalk aus dem Tunnel Sachseln und Glimmergneis aus dem Tunnel Mappo-Moretina bei Locarno). Pro Fraktion wurden 200 Komponenten ausgezählt.



- A – E: *unaufbereitetes TBM-Material /*
- a – e: *aufbereitetes TBM-Material (Sachseln)*
- A,a: *Fraktion 4/6.3(Sachseln) / 4/8 (Locarno)*
- B,b: *Fraktion 6.3/8 (Sachseln)*
- C,c: *Fraktion 8/10(Locarno und Sachseln)*
- D,d: *Fraktion 10/16(Locarno und Sachseln)*
- E,e: *Fraktion 16/20(Locarno und Sachseln)*

### Achsenbeschriftung:

- $b/a$ : *Verhältnis der mittleren (b) zur grössten (a) Kornachse*
- $c/b$ : *Verhältnis der kleinsten (c) zur mittleren (b) Kornachse*



Figur 2: Siebanalysen von unveränderten Tunnelausbruchmaterialien aus dem maschinellen und konventionellen Vortrieb. Die TBM-Materialien wurden sowohl unmittelbar nach dem Fräsvorgang, als auch nach Umlagerung und Transport ab Haufen entnommen. Sieblinien werden durch den mittleren b-Korndurchmesser bestimmt.

fraktionen zum grössten Teil an den Chips. Der Anteil an groben Fraktionen mit einem mittleren b-Durchmesser  $\geq 30$  mm beträgt für TBM-Material 20 bis 40 und für TSM-Material 5 bis 25 Massen-%. Der Anteil der Komponenten mit dem Kleinstdurchmesser  $\geq 30$  mm beträgt für TBM-Material hingegen weniger als 10 und für TSM-Material weniger als 5 Massen-%.

## Zwei Beispiele von Aufbereitungs-Vorversuchen für die Herstellung von Betonzuschlagstoffen aus Tunnelausbruchmaterialien

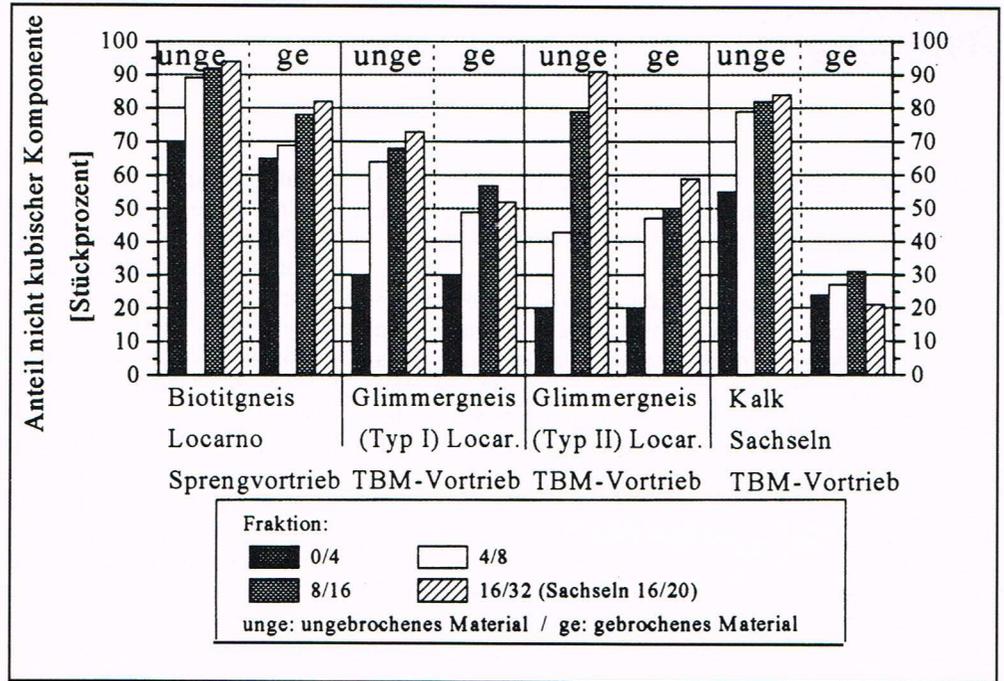
Bis heute wurden ein paar wenige Aufbereitungsversuche mit TBM-Materialien durchgeführt, die kaum umfassend untersucht und ausgewertet wurden. Grossangelegte Auf-

bereitungsversuche mit einem breitabgestützten Untersuchungsprogramm sind zeitaufwendig und somit kostspielig. Ein solcher Vorversuch für die Herstellung von Betonzuschlägen wurde anfangs 1993 in Sargans im Rahmen des Alptransit-Vorprojektes mit maschinell und konventionell gewonnen Gneisen aus dem Umfahrungstunnel Mappo-Moretina (Locarno) durchgeführt (Ingenieurgesellschaft Gotthard - Basistunnel; 1993). Ein weiterer Vorversuch konnte anfangs 1994 in Wimmis mit alpinen Kalken aus dem Umfahrungstunnel Sachseln durchgeführt werden. Diese Untersuchungen sind Teil der Dissertation »Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial aus dem maschinellen Vortrieb« an der ETH Zürich. Es sei hier betont, dass es sich um Vorversuche handelt, bei denen Standardanlagen verwendet worden sind. Es ist anzu-

Gesteinsname:	Biotitgneis	Glimmergneis (Typ I)	Glimmergneis (Typ II / III)	Alpiner Kalk (Bürgen-Kalk)
Entnahmeort:	Tunnel Mappo-Moretina (Tenero bei Locarno)			Tunnel Sachseln
Gesteinsbeschreibung:	Dunkelbrauner Biotitgneis, duktil verschert, lagige Textur mit helleren, langgezogenen Quarzilinsen.	Heller Zweiglimmergneis, duktil verschert.	Heller Zweiglimmergneis, mylonitisch verschert, leicht lagige Textur.	Dunkler, z.T. leicht sandiger, mit Calcitadern durchsetzter Kalk, reich an Assilinen und Nummuliten. Untergeordnet tritt Glaukonitsandstein auf.
Makroskopi. geschätzter Glimmeranteil: [Vol-%]	10	<5	1 - 5	<<1
Abbauart:	Sprengvortrieb	TBM		TBM
TBM - Spezifikation:		Wirth		Robbins
Durchmesser:		Ausweitung 10.8m		Ausweit. 11.7m
Diskendurchmesser:		416mm		330mm
Schneidspurabstand:		60mm		70mm
Rollenanddruck:		max. 20t		max. 10t
Bohrkopfumdrehung:		2.5 - 3.0 U/min.		3.5 U/min.
Sprengstoffbedarf:	ca. 1.3 kg/m <sup>3</sup>			
Bohrlöcher:	55 pro Abschlag			
Querschnitt:	4.0 x 4.0m			
Abschlaglänge:	3.0m			

Tabelle 2: Gesteinsbeschreibung und Gesteinsgewinnung der Ausbruchmaterialien.

**Figur 3: Anteil nicht kubischer Komponente der unaufbereiteten (ungebrochen) und aufbereiteten (gebrochen) Ausbruchmaterialien.**



nehmen, dass für eine zukünftige, optimale Aufbereitung solcher TBM-Materialien, speziell konzipierte Aufbereitungsanlagen eingesetzt werden. Die hier vorgestellten Beispiele sollen aufzeigen, was mit bestehenden Anlagen möglich ist.

**Verwendete Ausbruchmaterialien und deren Gewinnung:**

Die für diese Versuche verwendeten Materialien und deren Gewinnung sind in Tabelle 2 charakterisiert.

Wie erwartet, weisen die TBM-Rohmaterialien aus Locarno, im Gegensatz zum konventionell gewonnenen Material, einen viel höheren Anteil an feinen Komponenten auf (Figur 2). Das Grösstkorn der TBM-Materialien beträgt 60 bis 80mm (b-Durchmesser).

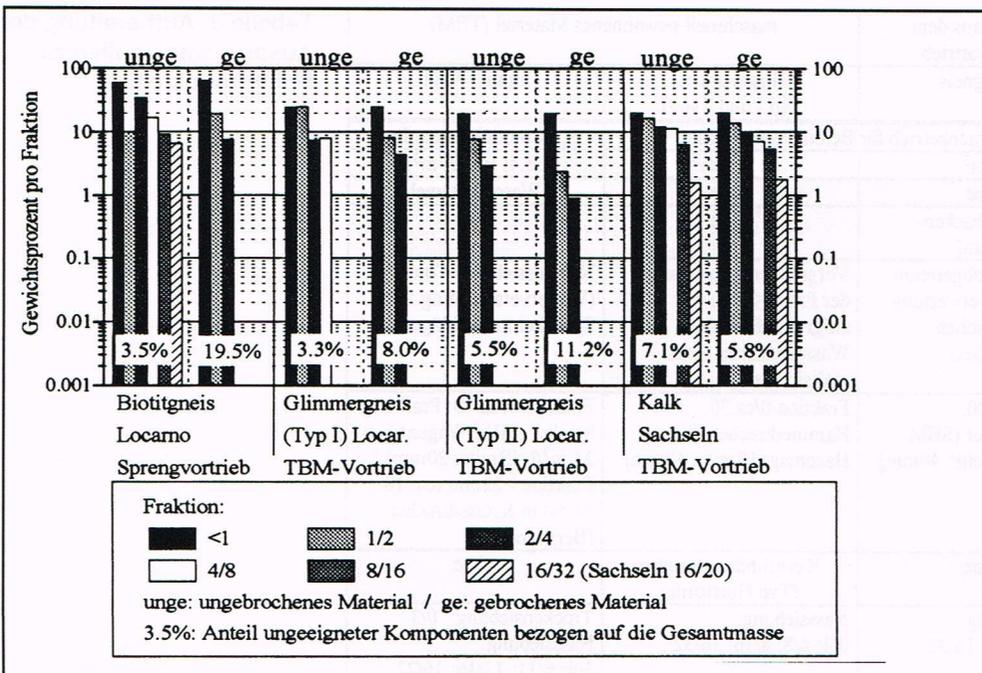
**Kornformen:**

Der Anteil an nicht kubischen TBM-Komponenten beträgt für die gröberen Glimmergneis-Fractionen (>8mm) gegen 75 Stück-% (Figur 3). Aufgrund der deutlich ausgeprägten

Gesteinstextur des Biotitgneises aus dem Sprengvortrieb, bildete dieser – im Gegensatz zum TBM-Gneis – mit 90 Stück-% eine grössere Menge an nicht kubischen Ausgangsmaterialien. Interessanterweise weisen die Kalke ohne Gesteinstextur mit rund 80 Stück-% ebenfalls einen sehr hohen Anteil nicht kubischer Körner auf. Die Fraktionen 0/4mm der beiden Gneise (TBM-Materialien) und die Fraktion 4/8mm der Glimmergneise Typ II weisen eine gute Kornform auf und müssten somit nicht gebrochen werden.

**Petrographisch ungeeignete Komponenten:**

Petrographisch ungeeignete Komponenten in kristallinen Betonzuschlagstoffen sind vorallem Glimmerminerale (Biotit, Muskowit, Serizit, Chlorit, usw.) und gröbere, gut spaltbare Feldspäte. Die à priori klein ausgebildeten Glimmerblättchen reichern sich bei jeder Gesteinszertrümmerung im Feinbereich an. Der im Biotitgneis enthaltene Glimmergehalt von ca. 10% wird durch den Sprengvortrieb und Umlagerungsprozesse in der Fraktion <1mm auf über 50 Ge-



**Figur 4: Anteil petrographisch ungeeigneter Komponenten (logarithmische Darstellung der Gewichtsprozente).**

wichts-% angereichert. Der Fräsvorgang durch die TBM erhöht den Glimmergehalt von ursprünglich 5% im Festgestein auf rund 15 Gew.-% in der Sandfraktion <1mm (Figur 4).

Beim Bürgen-Kalk aus Sachseln sind es vor allem weiche, leicht mergelige Gesteinsbruchstücke und gröbere Calcitkristalle mit ausgeprägter Spaltbarkeit, die sich ungünstig auf die Betoneigenschaften auswirken und somit als petrographisch ungünstig bezeichnet wurden. Auch hier reichern sich die ungünstigen Komponenten am häufigsten in den feinen Fraktionen an.

## Aufbereitung:

Die Aufbereitung der Tunnelausbruchmaterialien erfolgte auf zwei verschiedenen Standardanlagen (Tabelle 3). Für den Brechprozess der Gneise wurde ein Prallbrecher eingesetzt. Die TBM-Glimmergneise wurden zusätzlich mittels einer Kornrundsungsanlage (Friktionstrommel) künstlich gerundet. Die Kalke wurden mit einem Prallbrecher zerkleinert. Der Rücklauf der Fraktion >22mm (ca. 10 Massen-%) wurden zusätzlich mittels eines Kreiselbrechers zerkleinert.

Eine Abtrennung der kubischen TBM-Materialien bei 8mm durch Trockensiebung war bei den Glimmergneisen aufgrund des stark bindigen Verhaltens dieser Ausgangsstoffe (hoher Wassergehalt) unmöglich. Der primäre Waschvorgang der Kalke aus Sachseln ermöglicht eine Abtrennung bei 7mm. Ein Waschvorgang hat den weiteren Vorteil, dass der Unterkorn-Anteil im Gegensatz zum ungewaschenen Material gering gehalten werden kann.

Der Einsatz von Friktionstrommeln als Rundungsprozess wird in der Fachwelt kontrovers beurteilt. Die Aufbereitungskosten werden erhöht und ein weiterer Arbeitsvorgang wird notwendig. Weiter fällt mit ca. 5% ein zusätzlicher Materialverlust in Form von Schlamm auf, der entsorgt werden muss. Die Praxis hat bewiesen, dass auch mit richtig konzipierten Splittprodukten und optimal abgestuftem Brechsand gleichwertige Frisch- und Festbetoneigenschaften erreicht werden können, wie dies mit Rundkies und Rundsand erreicht wird.

## Splittprodukte:

In Figur 5 sind die angefallenen Splittprodukte als ausgefüllte Balken dargestellt. Die Menge der unaufbereiteten Rohprodukte sind als Vergleich mit leeren Balken angegeben. Das Mengenverhältnis der aufbereiteten zur unaufbereiteten Fraktion wird hier als Ausnützungsfaktor (unterstrichener Wert) bezeichnet.

Bei den Massenprozent-Angaben der Gneise handelt es sich um Schätzungen. Die Materialverluste für die Gneise infolge Transport, Aufbereitung und Kornrundung (Schlamm) wurden mit je 5 Massen-% angenommen. Die Genauigkeit der Angaben beträgt für die Gneisprodukte rund  $\pm 3$  Massen-%. Die Materialströme der Kalke wurden gewogen und sind mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  Massen-% angegeben.

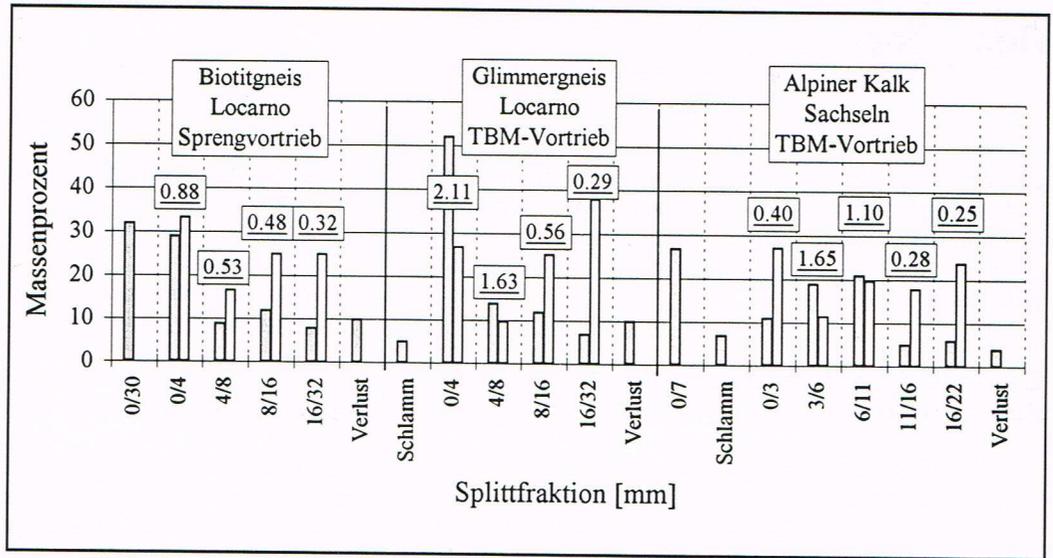
Abgesehen von den 32 Massen-% der Biotitgneis-Fraktion 0/30mm aus dem Sprengvortrieb, die infolge des allzu hohen Glimmergehaltes nicht weiterverwertet werden konnte, weist dieses Ausgangsmaterial mit 0.32 bis 0.88 den ausgeglichensten Ausnützungsfaktor auf. Der Aufbereitungsversuch führte für die Biotitgneise zu einer Splittproduktionsmenge von rund 68 Massen-%. Die durch das Vorbrechen ausgeschiedene Fraktion 0/30mm kann normalerweise auf die Splittprodukte aufgeteilt werden, was zu einer wesentlichen Erhöhung der Splittproduktmengen führen würde. Falls diese Materialien aber zusätzlich einem Waschvorgang und einer Glimmerabscheidung unterzogen würden, müsste mit einem zusätzlichen Verlust von über 10% gerechnet werden. Der Wiederverwertungsanteil solcher glimmerhaltigen Sprengmaterialien würde somit maximal 80% betragen.

Der Ausnützungsfaktor, der mit TBM-Vortrieb gewonnen Glimmergneisen, variiert zwischen 0.29 bis 2.11 und ist im Vergleich zum Biotitgneis weniger ausgeglichen. Die gewonnene Grobfraktionsmenge ist relativ bescheiden, der Anteil der Feinfraktionen hingegen übermässig gross (>50%). Die Splittproduktionsmenge beträgt für die TBM-Glimmergneise rund 85 Massen-%. Auch hier müsste bei einem Waschvorgang und Glimmerabscheidung mit einem Verlust von 10%

	Material aus dem Sprengvortrieb	maschinell gewonnenes Material (TBM)	
	Biotitgneis	Glimmergneis Typ I und Typ II	alpiner Kalk
Anlagen	Steinbruchbetrieb für Betonkiesproduktion		Splittproduktionsanlage
Aufbereitungsmenge	16m <sup>3</sup>	2 x 16m <sup>3</sup>	68.4t (ca. 27m <sup>3</sup> )
Waschvorgang	ohne	ohne	Waschtrommel
Vorbrechen	Einschwingenbackenbrecher [100mm]	ohne	ohne
Siebung	Fraktion 0/30 abgetrennt (keine Weiterverwertung aufgrund des hohen Glimmergehaltes)	Vorgesehene Absiebung der Frak. <8mm war aufgrund des hohen Wassergehaltes nicht realisierbar	Nassaushebung <7mm (Weiterverarbeitung zu Spritzbetonzuschlägen)
Brechvorgang	Fraktion 30/100: Hammerbrecher (SBM Hazemag) [Breite: 40mm]	Fraktion 0/ca. 70: Hammerbrecher (SBM Hazemag) [Breite: 40mm]	Fraktion 7/ca. 70: Prallbrecher (SBM Wageneder) 25 m <sup>3</sup> /h [Breite: 20mm] / Fraktion >22mm (ca. 10 M-%) in Kreiselbrecher (Bergeand)
Nachbehandlung	ohne	Kornrundsungsanlage (Typ Hurricane)	ohne
Siebung Fraktion [mm]	Trockensiebung: 0/4; 4/8; 8/16; 16/32	Nasssiebung: 0/4; 4/8; 8/16; 16/32	Trockensiebung: 0/3 Nasssiebung: 3/6; 6/11; 11/16; 16/22

**Tabelle 3: Aufbereitung der Ausbruchmaterialien zu Splittprodukten.**

**Figur 5: Ausgefüllte Balken: Massenprozent der aufbereiteten Splittprodukte. Leere Balken: Massenprozent der unaufbereiteten Rohmaterialien. Unterstrichener Wert über den Balken: »Ausnutzungsfaktor« (Mengenverhältnis unaufbereitetes / aufbereitetes Material).**



Bei der Fraktion 0/7 des Kalkes handelt es sich um abgetrennte, ungebrochene TBM-Materialien. Die Fraktion 0/30 des Biotitgneises wurde aufgrund des hohen Glimmergehaltes nicht weiterverarbeitet. Verlust: Massenverluste infolge Transport und Aufbereitung.

gerechnet werden, was zu einer Wiederverwertungsmenge von maximal 75% führen würde.

Die mit TBM-Vortrieb gewonnenen Kalke aus Sachseln weisen einen Ausnutzungsfaktor zwischen 0.25 und 1.65 auf und sind somit mit den TBM-Gneisen vergleichbar. Wie anfangs erwähnt, ist diese Splittproduktionsanlage auf ein Grösstkorn von 22mm ausgerichtet. Der Anteil der Komponenten grösser 22mm betrug nach dem ersten Brechvorgang ca. 10%. Die theoretisch erreichbare Splittfraktion 16/32mm würde für die Kalke – ähnlich der TBM-Gneise – gegen 5 Massen-% erreichen. Die Fraktion 0/7mm (27 Massen-%) wurde unmittelbar nach der Waschtrommel und vor dem Brechvorgang ausgesiebt. Dieses Material könnte entweder auf die gebrochenen Splittprodukte aufgeteilt werden oder als Spritzbetonzuschläge verwendet werden. Aus den TBM-Kalken konnten – ohne ausgesiebte Fraktion 0/7mm – 62 Massen-% zu Splittprodukten verarbeitet werden. Zusammen mit der Fraktion 0/7mm ergibt dies eine Wiederverwertungsmenge von 89%.

**Kornformen der Splittprodukte:**

Im Gegensatz zu den Richtlinien der alten Norm SIA 162 (1968) stellen die neueren Ausgaben keine Anforderung an die Kornform. Die Praxis hat aber gezeigt, dass für Pumpbeton und gut verarbeitbaren Beton, deutlich weniger als 50 Stück-% an nicht kubischen Komponenten als geeignet betrachtet wird. Der Anteil nicht kubischer Komponenten der Biotitgneise aus dem Sprengvortrieb konnte aufgrund der deutlich ausgeprägten Gesteinstextur von ursprünglich 86 auf nur 74 Zahl-% gesenkt werden (Figur 3). Die TBM-Gneise des Typs I konnten von 59 auf 47, diejenigen des Typs II von 58 auf 44 Stück-% verbessert werden. Eine erstaunlich gute Kornform wurde mit den TBM-Kalken von ursprünglich 75 auf 25 Stück-% nicht kubischen Komponenten erreicht.

**Petrographisch ungeeignete Komponenten der Splittprodukte:**

Der Aufbereitungsprozess der glimmerhaltigen Materialien führt im Gegensatz zum Fräsvorgang zu einer geringeren Zunahme des Glimmeranteiles in den Feinstfraktionen (Figur 4). Für die restlichen Fraktionen bleibt der Glimmeranteil etwa gleich oder nimmt leicht ab, da sich die Glimmerblättchen durch die Aufbereitung weiter verkleinern. Bezogen auf die Gesamtmasse nimmt der Glimmeranteil hingegen für den Brechsand um ein Drei- bis Fünffaches zu, da der angefallene Sandanteil im Vergleich zum Ausgangsprodukt um einiges höher ist. Gesamtglimmeranteile von 10 bis 20 Massen-% sind als hoch einzustufen und geben bei der Betonproduktion gewisse Probleme auf. Hier stellt sich die Frage, ob eine mögliche Glimmerabscheidung zu einer deutlichen Reduktion des Glimmergehaltes führen würde. Denkbar wäre auch ein Austausch der Fraktion <1mm oder <2mm mit glimmerfreien Produkten.

Der Anteil an petrographisch ungeeigneten Komponenten innerhalb der aufbereiteten Kalke ist gegenüber dem Rohprodukt leicht zurückgegangen. Die mergeligen Komponenten werden durch die Aufbereitung beinahe vollständig ausgewaschen. Als ungeeignete Komponenten bleiben hauptsächlich die gut spaltbaren Calcitkörner übrig.

**Produktebilanz für Betonzuschlagstoffe:**

Mit den aufbereiteten Splittprodukten können theoretisch die in Tabelle 4 aufgeführten Zuschläge für Beton und Spritzbeton nach Norm SIA 162 zusammengesetzt werden. Die kleinsten Restmengen – Fraktion 0/4mm mit 5 Massen-% – weisen die konventionell gewonnenen Biotitgneise auf. Beide TBM-Materialien zeigen ähnliche Restmengen in der Höhe von 20 Massen-%, die für die TBM-Gneise als Fraktion 0/4mm und für die TBM-Kalke als Fraktion 3 bis 11mm übrig-

**Tabelle 4: Theoretische Produktebilanz der aufbereiteten Splittprodukte zu Betonzuschlagstoffen. [In den eckigen Klammern sind die Werte mit abgetrennter Fraktion angegeben].**

[Angaben in Massenprozent]	Splittprodukte			Betonzuschläge aus den Splittprodukten				
	Schlamm, Verlust, usw.	Abtrennung: (0/30 Biotitgneis; 0/7 Kalk)	Erhaltene Splittmenge	0-32 (*Kalk 0-22)	0-16	0-8	Verwertung als Betonzuschläge	Restmengen
Biotitgneis konven.	10	32	[58] 90	47	27	21	95	5
Glimmergneis TBM	15	0	85	27	23	30	80	20
Kalk TBM	11	27	[62] 89	*30	21	27	78	22

bleiben. Bezüglich zur Produktion von Betonzuschlagstoffen ergibt sich für die genannten Materialarten ein Gesamtwiderverwertungsgrad von 85 % für die konventionell gewonnenen Gneise und ca. 70 % für die TBM-Gneise und TBM-Kalke.

## Beton und Spritzbeton aus den gewonnenen Splittprodukten

Ziel der Betonierversuche war es, die grundsätzliche Eigenschaft der aufbereiteten und z. T. unaufbereiteten Tunnelausbruchmaterialien für die Verwendung als Beton- respektive Spritzbetonzuschläge nachzuweisen. Eine Optimierung der Rezepturen wird erst in einer zweiten Phase angestrebt.

Die Beton- und Spritzbetonversuche mit den glimmerhaltigen Zuschlägen wurden im Rahmen des Alptransit-Vorprojektes im Versuchsstollen Hagerbach AG unternommen. Wie erwartet, haben die stark glimmerhaltigen Zuschläge der Feinstfraktionen auf den Wasserbedarf, die Verarbeitbarkeit und z.T. auf die Endfestigkeit einen negativen Einfluss ausgeübt. Die mittels Kornrundschanlage gerundeten Materialien zeigen – wie für Rundmaterialien üblich – bessere Frischbetoneigenschaften als die ungerundeten Splitte. Hingegen sind die Festbetoneigenschaften der gerundeten Zuschläge im Vergleich zu den ungerundeten eher geringer.

An der EMPA wurden sowohl mit aufbereiteten als auch mit unaufbereiteten TBM-Kalken diverse Betonversuche durchgeführt. Erstaunlicherweise sind die mit den unbehandelten Rohmaterialien erreichten Frisch- und Festbetoneigenschaften im Vergleich mit den aufbereiteten Splittprodukten nahezu gleichwertig. Mit der nach dem Waschvorgang abgetrennten Fraktion 0/7mm wurden Spritzbetonversuche im Versuchsstollen der Firma Laich SA in Tenero (Chiasso) unternommen. Entgegen allen Erwartungen sind die Resultate erstaunlich gut ausgefallen. Weitere Beton- und Spritzbetonversuche werden im Rahmen dieser Dissertation mit unaufbereiteten und aufbereiteten TBM-Materialien demnächst an der EMPA und in den neu eingerichteten Versuchsstollen in St. Ursanne stattfinden. Genauere Angaben und Resultate all dieser Betonversuche werden zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht.

## Schlussbemerkungen

Die hier beschriebenen Aufbereitungs-Vorversuche haben überaus positive Resultate erreicht. Sie haben gezeigt, dass mit geeigneten Ausbruchmaterialien aus dem maschinellen Tunnelvortrieb, Splittprodukte für die Betonproduktion hergestellt werden können. Einzig eine genügend grosse Menge an gröberen Ausgangsmaterialien (>30mm) ist mit den heutigen TBM noch nicht gewährleistet. Optimierte Aufbereitungstechniken werden es erlauben, die Splittqualität bezüglich Kornform, Sandabstufung und Restmengen zu verbessern. Hierfür sind langjährige Erfahrung und geeignete Aufbereitungsanlagen der Splitt- und Kieswerke gefragt. Folgende Fragen müssen in diesem Zusammenhang noch geklärt werden:

- Welches sind die geeignete Brecheranlagen für Materialien, die eine deutliche Schieferung (Textur) aufweisen?

- Welcher Aufbereitungsprozess bildet ein möglichst kubisches Korn?
- Wie kann eine optimale Sandabstufung erreicht und eingehalten werden?
- Können Glimmerminerale in der Sandfraktion mit vernünftigem Aufwand ausgeschieden werden?

## Verdankungen

Leiter dieser Dissertation ist Prof. C. Schindler, Vorsteher der Abteilung Ingenieurgeologie an der ETH Zürich. Dank seinem Interesse für Kiessubstitute begann diese Arbeit Mitte 1992. Die Dissertation konnte mittels massgeblicher finanzieller Unterstützung seitens der AlpTransit-Projektleitungen Gotthard und Lötschberg, vertreten durch die Herren F. Kilchenmann (BLS) und P. Zuber (SBB) für ein Teilsalär und für die Anschaffung von Prüfgeräten weitergeführt werden. Probenentnahmen und TBM-Tests in Sachseln erfolgten in bester Zusammenarbeit mit der ATS (Arbeitsgemeinschaft Tunnel Sachseln), dem Tunnelgeologen Dr. Wildberger (Dr. von Moos AG) und der Hilfe von Dr. Büchi (Geotest AG). Materialtransporte und die aufwendigen Aufbereitungsversuche wurden von der Firma Kiestag AG (Hr. Schüpbach und Hr. Lehmann) in Wimmis kostenlos durchgeführt. Betonuntersuchungen wurden an der EMPA (Abteilung Beton und Bindemittel) unter der Leitung von Hr. Studer und Hr. Ohlbrecht unternommen. Dank der – ebenfalls kostenlosen – Unterstützung von Hr. Teichert (Laich SA) fanden höchst ermutigende Spritzbetonversuche mit diesen eher ungewohnten TBM-Rohmaterialien statt.

## Literaturangaben

- EPFL, 1993: Compactage de déchets rocheux de tunnels, essais en laboratoire, matériaux provenant du tunnel Mappo – Morettina a Locarno. Recherche No 60/91 de l'Institut des sols, roches et fondations.*
- Giudicetti F., Kunz U., Jenk K.; 1983: Foundationsschichten, Bauwerks- und Belagsbeton mit 100% gebrochenem Gestein. Einbau an der Nationalstrasse N8 am Brienzensee. Schweiz. Ing. und Arch. 46/83, 1081-1091.*
- Ingenieurgesellschaft Gotthard-Basistunnel, 1993: Betonzuschlagstoffe aus Tunnel-Ausbruchmaterial. Interner Bericht.*
- Jäckli H. & Schindler C., 1986: Möglichkeiten der Substitution hochwertiger Alluvialkiese durch andere mineralische Rohstoffe. Beitr. Geol. Schweiz. geotech. Ser. 68.*
- Marty T., 1992: Vortriebssicherung mit Stahlfaser-Nassspritzbeton im Tunnel Crapeig. Vortrag: Europäisches Symposium für Tunnelbau 5. Febr. 1992 in Olten.*

**Verfasseranschrift:**  
**Dipl.-Geologe Cédric Thalmann**  
**Bescholdstrasse 5**  
**3012 Bern**

### Technische Fachstelle

Dieser Bericht wurde auf Wunsch der Technischen Fachstelle FSK für die DSB verfasst. Wir danken dem Autor bestens.  
Dr. R. Teutsch