

Verwertung von Tunnelausbruchmaterial beim Projekt AlpTransit Gotthard

Dr. Cédric Thalmann: Beratender Geologe der Fach- und Koordinationsstelle Materialbewirtschaftung AlpTransit Gotthard; Büro für Ingenieurgeologie, Wabern

Ausgangslage

Beim neuen Gotthard-Basistunnel ist vorgesehen, den Tunnelausbau vornehmlich unter Verwendung von Betonzuschlagstoffen aus Ausbruchmaterial (rund 5 Mio. Tonnen) vorzunehmen. Für AlpTransit Gotthard lohnt sich diese Massnahme allein schon aus ökonomischen Gründen, da die Eigenaufbereitung wirtschaftlicher zu veranschlagen ist als die Fremdzulieferung von Kiessandmaterialien. Sie ergibt sich aber auch aus der Pflicht heraus, aus ökologischen Gründen die maximale Wiederverwendung des Ausbruchmaterials anzustreben und dadurch die Kiessandressourcen und Deponiekapazitäten zu schonen.

Die Eignung des Tunnelausbruchmaterials als Betonzuschlagstoffe bei der Durchörterung des Gotthard-Massivs wurde innerhalb des AlpTransit-Projektes mit umfangreichen Aufbereitungs- und Betonversuchen gezielt abgeklärt und nachgewiesen. Nach Abschluss des Prüfungssystems für Betonmischungen wird auch der industrielle Nachweis vorliegen, dass es mit der heutigen Betontechnologie möglich ist, mit aufbereiteten Tunnelausbruchmaterialien, namentlich aus dem maschinellen Vortrieb, einen Beton herzustellen, welcher die hohen Nutzungsanforderungen auch unter den harten Baustellenbedingungen im Gotthard-Basistunnel erfüllt.

Nun ist das Tunnelausbruchmaterial, aus dem die Zuschlagstoffe hergestellt werden, ein Naturprodukt, das mit der variierenden Lithologie mehr oder weniger starken Qualitätsschwankungen unterworfen ist. Der Materialauswahl und der Qualitätssicherstellung fällt deshalb bei diesem Rohstoff ein besonderes hohes Gewicht zu.

Dies sowie der Sachverhalt, dass der Bauherr auch Eigner des Tunnelausbruchmaterials resp. Lieferant der Zuschlagstoffe ist, setzen ein massgeschneidertes und in seiner Anwendung flexibles Qualitätsmanagement mit klaren Regelungen der Verantwortlichkeiten zwischen den einzelnen Beteiligten voraus.

Verantwortlichkeiten und Nahtstellen

Die erfolgreiche Herstellung von Spritz- und Ortsbeton aus aufbereitetem Tunnelausbruchmaterial basiert im wesentlichen auf drei Säulen:

1. Richtige Auswahl des geeigneten Rohmaterials
2. Optimale, auf das Rohmaterial ausgerichtete Aufbereitungstechnik
3. Beherrschung der Betonherstellung und -verarbeitung mit aufbereiteten Zuschlagstoffen

Der Bauherr als Materiallieferant, der Materialaufbereiter und der Tunnelbauunternehmer teilen sich hierbei über die verschiedenen Stadien hinweg die Verantwortung, bis das fertige Produkt bzw. Bauwerk vorliegt.

Im Grundsatz gilt, dass jeder Beteiligter für das Produkt hauptverantwortlich ist, welches er liefert bzw. herstellt. Als Eigner des Ausbruchmaterials trägt demnach der Bauherr die Hauptverantwortung für die richtige Auswahl des Rohmaterials. Mit dem Bezug der Zuschlagstoffe geht die Verantwortung auf die beauftragten Tunnelbau-Unternehmen bzw. deren Betonproduzenten über.

Optimierung des TBM-Ausbruchmaterials

Die Hauptlöse am Gotthard-Basistunnel sollen mehrheitlich mit Tunnelbohrmaschinen (TBM) aufgeföhren werden. Der Wiederverwertungsgrad des Ausbruchmaterials aus dem TBM-Vortrieb hängt bei gegebenen geologischen Verhältnissen von der Korngrösse des Ausbruchmaterials ab. Die Korngrösse des Materials wird im wesentlichen durch den Schneidrollenabstand der TBM-Rollenmeissel bestimmt. Um eine genügende Menge an Betonzuschlägen der Fraktion 16/22mm aufbereiten zu können (Brechen, Waschen, Klassieren), wird ein möglichst hoher Anteil an Grobkomponenten im TBM-Fräsmaterial angestrebt. Abbildung 1 zeigt den Materialanfall für verschiedene Abbauarten.

Abbildung 1: Materialanfall in Massenprozenten für verschiedene Vortriebsarten.

Art des Tunnelvortriebs	Schneid- rollenabstand	0-4	>32	>100
		[mm]		
Konventioneller Sprengvortrieb (Kristalline Gesteine)	-	2-5	85-95	75-85
Hinterschneidtechnik (Sandstein)	-	15-20	65-75	45-60
TSM-Vortrieb (Jurakalke)	-	15-40	5-35	0-5
TBM mit Warzenmeissel	60-70	30-50	2-20	0
TBM-Vortrieb mit Diskenmeissel (Sedimente, kristalline Gesteine)	65-85	15-50	5-50	0-10
TBM-Vortrieb mit vergrössertem Schneidrollenabständen (Plutonit)	86	45	20	0
	129	40	30	5
Versuch Äspö (Schweden)	172	20	35	15

Fräsversuche in einem Granodiorit¹ haben gezeigt, dass Schneidrollenabstände im Brustbereich von 130mm nicht unrealistisch sind und dabei die Vortriebsleistung nicht negativ beeinflusst wird. Mit der Erweiterung des Schneidrollenabstandes im Brustbereich der Hartgestein-TBM von den heute üblichen 80-90mm auf ca. 120mm lassen sich erhebliche Kosteneinsparungen realisieren. Diese Massnahme führt zu einer wesentlich höheren

¹ Bei Äspö (Schweden) wurde ein 420m langer Stollen mit einer Robbins Jarva MK 15-1680 und 5.0m Durchmesser im hartem Granodiorit aufgeföhren (BÜCHI und TAHLMANN 1994, 1995, 1996). Die Druckfestigkeit des Gesteins beträgt durchschnittlich 250 MPa. Während dem Vortrieb wurde der Schneidrollenabstand im Brustbereich versuchsweise von 86mm (Standard) auf 129mm (150%) und 172mm (200%) erweitert. Die Teststrecke betrug insgesamt 14m.

Ausbeutung des geeigneten Ausbruchmaterials für die Produktion von Betonzuschlagstoffen. Es ist zu erwarten, dass der vergrösserte Schneidrollenabstand auch weitere positive Auswirkungen auf den TBM-Vortrieb hat (Abbildung 2). Zudem bedeutet eine Erweiterung des Schneidrollenabstands die logische Konsequenz der TBM-Entwicklungen in den letzten Jahren, hin zu grösseren Rollenmeissel und höherer Belastbarkeit der Disken.

Abbildung 2: Vor- und Nachteile erweiterter TBM-Schneidrollenabstand

Vorteile Erweiterung Schneidrollenabstand	Nachteile Erweiterung Schneidrollenabstand
- höhere Ausbeute bei der Aufbereitung von Ausbruchmaterial für Betonzuschlagstoffe	- erhöhte Schneidrollenkontrolle
- TBM-Kapazität wird erhöht	- geringe praktische Erfahrung
- geringerer Energieverbrauch	- vertragliche Risiken
- geringere Verschleisskosten	
- geringere Stillstandzeiten	

AlpTransit Gotthard sieht vor, TBM mit variablen Schneidrollenabständen auszuschreiben und wird somit auch in diesem Bereich mit neuen und innovativen Lösungsansätzen arbeiten.

Anforderungen an das Rohmaterial und an die Zuschlagstoffe

Die Abgrenzung der Verantwortlichkeiten setzt voraus, dass an den Nahtstellen im Liefer- und Produktionsprozess der Zuschlagstoffe objektive Auswahl- und Abgabekriterien vorliegen. Diese Nahtstellen sind:

- Auswahl des Rohmaterials für die Materialaufbereitung (Materialtriage)
- Abgabe der aufbereiteten Zuschlagstoffe an den Tunnelbauunternehmer

AlpTransit Gotthard wird für diese Kontrollaufgabe ein spezielles Prüfsystem einrichten, welches auf den Ergebnissen der ETH-Dissertationsarbeit THALMANN (1996) aufbaut.

Das vorgeschlagene Prüfsystem basiert nebst Normvorschriften zu einem grossen Teil auf Erfahrungswerten, welche mit den Aufbereitungs- und Betonversuchen bei AlpTransit Gotthard gewonnen wurden. Es kann sowohl am Rohmaterial (TBM- als auch Sprengvortrieb) wie auch an den aufbereiteten Zuschlagstoffen angewendet werden. Anders als bei den Kiesrohstoffen im Mittelland (die einen natürlichen Ausleseprozess durchgemacht haben), fällt bei den AlpTransit-Zuschlagstoffen den physikalischen (Gesteinshärte) und petrographischen Prüfungen eine besondere Bedeutung zu.

Schweizerische Normenwerke² wurden soweit berücksichtigt, als sie sich auch auf Brechsand und Splitt aus Ausbruchmaterial anwendbar sind. Ausschlaggebend für die Auswahl der Prüfungsmethoden war, dass die Qualität bereits im Rohstadium bestimmt werden kann und nicht erst nach aufwendiger Aufbereitung des Rohstoffs (Tunnelausbruchmaterial).

² Gerade das SIA-Normenwerk basiert primär auf den Erfahrungen, welche mit rundem Alluvialkiesen gemacht wurden. Die Übernahme dieses Regelwerkes ist nicht ohne weiteres möglich.

Auswahlkriterien für das Rohmaterial

Die Anforderungen und Richtgrößen an das Rohmaterial sind so festgelegt, dass daraus ein Zuschlagstoff für einen Qualitätsbeton der Festigkeitsklasse B 40/30 aufbereitet werden kann (die anschließende materialgerechte Aufbereitungstechnik wird dabei vorausgesetzt).

Die massgebenden Gesteinsparameter, welche die Auswahl bestimmen, sind

- die Gesteins Härte: Kriterien vgl. Abbildung 3
- die Petrographie: Kriterien vgl. Abbildung 4

Abbildung 3: Auswahlkriterien Gesteins Härte

Art der Prüfung:	Prüfnorm	Nachzuweisender Kennwert	Bemerkungen
Brechbarkeits-Index	AFNOR P 18-579 (Verfahren modifiziert für TBM-Rohmaterial)	≤ 70 [-] ≤ 75 [-]	Richtwert Muss-Kriterium (falls Wert = 70-75: zusätzlich Prüfung I_{S50} nötig)
Punktlast-Index I_{S50}	ISRM 1985 (Verfahren modifiziert für TBM-Rohmaterial)	I_{S50} parallel: ≥ 2.5 [N/mm ²] I_{S50} isotrop: ≥ 3.5 [N/mm ²]	Richtwert Richtwert

Abbildung 4: Auswahlkriterien Petrographie

Art der Prüfung:	Prüfnorm	Nachzuweisender Kennwert	Bemerkungen
Makroskopische Petrographie		Schichtsilikatgehalt: \leq ca. 20 Stück-% Petrographie: i.O.	Visuelle Grobbeurteilung im Stollen
Mikroskopische Petrographie (Dünnschliff)		-	Mineralienbescrieb; Verwitterungsgrad; AAR-Gefährdung
Petrographisch ungeeignete Komponenten: Fraktion 1/4,4/22,22/128mm (exklusive freie Schichtsilikate.*)	(nach Definition AlpTransit in Anlehnung an SIA 162 / 1)	≤ 10 [Gew.-%]	Richtwert
Freie Schichtsilikate* im Rohsand (0.25-0.50mm)	(nach Definition AlpTransit)	≤ 40 [Stück-%]	Richtwert
Potentielle Alkali-Reaktivität AAR	AFNOR P18-588 AFNOR P18-589	Expansion ≤ 0.11 [%] Nicht reaktiv	Muss-Kriterium

* freie Schichtsilikate: losgelöste, nicht im Gesteinsverband eingebundene Schichtsilikate

Das Nichteinhalten von Richtgrößen bedeutet grundsätzlich nicht, dass die Betonqualitätsziele nicht erreicht werden können. Die Wirkung von erhöhten Werten auf die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons muss in einem solchen Fall aber mit Aufbereitungsversuchen und Betoneignungsprüfungen untersucht werden.

Qualitätsanforderungen Zuschlagstoffe

Die Anforderungen und Richtgrössen, welche an den aufbereiteten und abgabebereiten Zuschlagstoff gestellt werden, müssen Gewähr bieten, dass der Tunnelbauunternehmer die Verantwortung für die Herstellung der zu bestellenden Betonsorten übernehmen kann.

In der QM-Vereinbarung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer (Tunnelbauunternehmer) ist festzuschreiben, dass die Bauherrschaft mit dem Einhalten der definierten Qualitätsanforderungen ihren Qualitätsverpflichtungen als Materiallieferant vollumfänglich nachgekommen ist.

Daraus resultieren die nachstehend definierten Abgabekriterien. Sie unterscheiden sich nach den folgenden Parametern:

- Gesteinshärte: gemäss Los Angeles-Index prEN 1097-2
- Petrographie: Kriterien vgl. Abbildung 5
- Körnung (Granulometrie / Geometrie): Korngrössenverteilung für Splitt gemäss SN 670'710d; Für Sand spezielle Anforderung; Kornform gemäss Plattigkeitsindex prEN 933-6

Abbildung 5: Abgabekriterien Petrographie

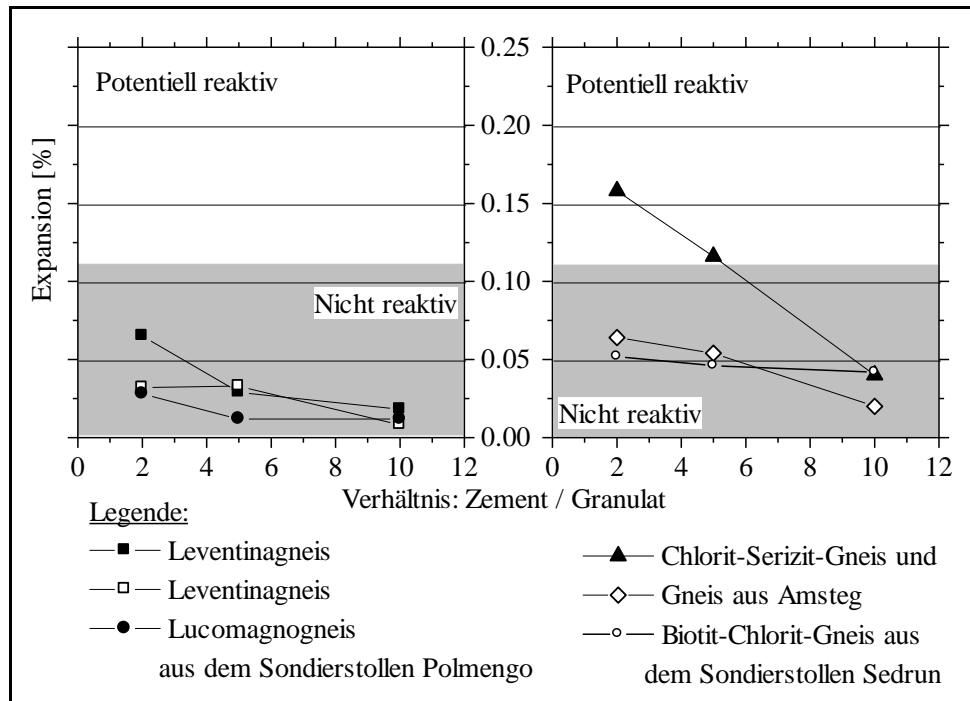
Art der Prüfung	Prüfnorm	Nachzuweisender Kennwert	Bemerkungen
Petrographisch ungeeignete Komponenten: 1/4, 4/8, 8/16, 16/22 mm (exklusive freie Schichtsilikate)	(nach Definition AlpTransit in Anlehnung an SIA 162 / 1	≤ 5 [Gew.-%]	Richtwert bei 5-10 Gew.-% Betoneignungsprüfungen erforderlich
Freie Schichtsilikate im gewaschenen Sand			
Grobsand 1/4 mm	(nach Def. AlpTransit)	≤ 5 [Stück-%]	Richtwert
Feinsand 0/1 mm	(nach Def. AlpTransit)	≤ 35 [Stück-%]	Richtwert
Mischsand 0/4 mm	(nach Def. AlpTransit)	≤ 35 [Stück-%]	Richtwert
(Bestimmung der Kennwerte an der Fraktion 0.25-.05mm)			bei >35 Stück-% Betoneignungsprüfungen erforderlich

Alkali-Aggregat-Reaktion

Untertagebauten fördern wegen der darin vorherrschenden klimatischen Bedingungen (hohe Feuchtigkeit und Temperaturen) eine mögliche Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR). Die bekannteste Art der Alkali-Aggregat-Reaktion ist die sogenannte Alkali-Silika-Reaktion (ASR), die in Form einer chemischen Reaktion zwischen löslichen Alkalien (K^+ , Na^+) im Betongemisch und löslichem Silizium oder mit reaktiven Silikaten der Aggregate auftritt. Das Produkt dieser Reaktion ist ein expansives Gel, welches zu Rissen im Betoninnern und an der Oberfläche führen kann. 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. Die im Rahmen der AlpTransit-Untersuchungen durchgeführten AAR-Prüfungen haben ergeben, dass gewisse kristalline Gesteinsserien im nördlichen Aar-Massiv

(vorwiegend Gneise mit retrograder Metamorphose) als potentiell reaktiv eingestuft werden müssen (s. Chlorit-Serizit-Gneis in Abbildung 6).

Abbildung 6: Potentielle Alkali-Aggregat-Reaktivität diverser Ausbruchmaterialien gemäss Testverfahren AFNOR P18-588.

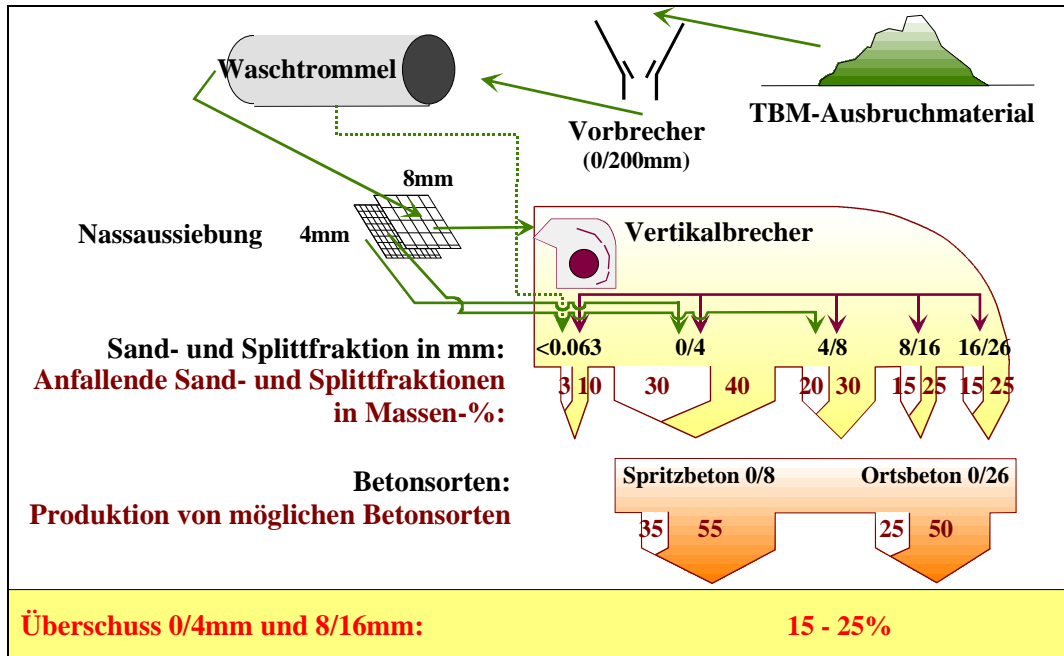


Aufbereitung von geeignetem TBM-Ausbruchmaterial zu Betonzuschlagstoffen

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. 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 welchen die Komponenten durch Korn-Korn-Kontakt gebrochen werden, als geeignet erwiesen. Zahlreiche Aufbereitungsversuche haben gezeigt, dass Rohmaterial erst ab der Fraktion 8mm (zum Teil auch höher) gebrochen werden muss, da die ungebrochenen Körner im Bereich <8mm 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 Verwertungsrate der TBM-Materialien in bezug auf die Zuschlagstoffproduktion um einiges höher liegt als angenommen. So können aus aufbereiteten Fräsmaterialien (Vertikalbrecher) durchschnittlich 35% eines Betongemisches 0-26mm und 45% eines Spritzbeton-Gemisches 0-8mm produziert werden. Der 'Überschuss' beträgt somit im Mittel 20% (Abbildung 7).

Abbildung 7: Aufbereitungsschema für die Produktion von Betonzuschlagstoffen aus geeignetem TBM-Tunnelschutt, mit Angabe der Materialflüsse und der daraus produzierbaren Betonprodukten. Es sind jeweils die Minimal- respektive Maximalwerte aus 10 verschiedenen Aufbereitungsversuchen angegeben.



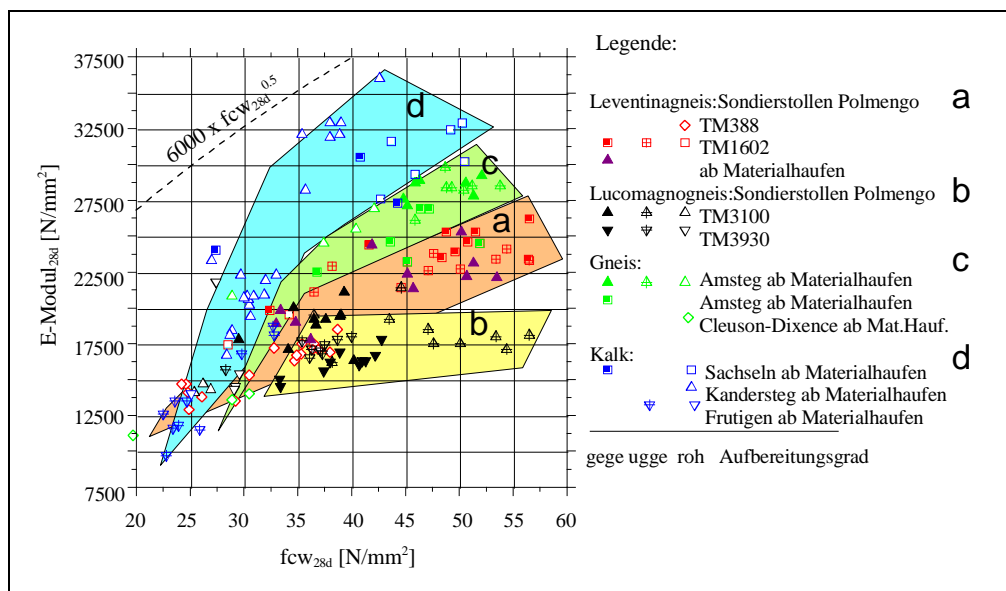
Betonqualität

Die Vorgaben und Empfehlungen in den Betonnormenwerken (sowohl in der Schweiz als auch in den meisten anderen Ländern) basieren auf natürlich gerundete Sand- und Kiesprodukte. Diese Normen können somit nicht bedingungslos für Splittbeton übernommen werden. Die wichtigsten Zielgrößen für die Betonqualitäten im Untertagebau sind nicht primär hohe Druckfestigkeiten, sondern ein möglichst störungsfreies Einbringen des Frischbetons, gute Frühfestigkeit und geringe Wasserleitfähigkeit. Mit den geprüften Zuschlagstoffen war es bei richtig gewählten Mischungen möglich, einen gut verarbeitbaren Beton von hoher Qualität unter Verwendung eines standardmässigen Portland-Zementes CEM I 42.5 herzustellen (KRUSE & WEBER, 1995). Aufgrund des grösseren Hohlraumgehalts des Splitt-Körnungsgemisches (ca. 40 Vol-%) im Vergleich zu Rundkies (ca. 25 Vol-%) benötigt der Beton aus gebrochenen Zuschlagstoffen eine erhöhte Zementleimmenge. Der benötigte Zementgehalt beträgt ca. 350 bis 400 kg/m³. Die Versuche haben bestätigt, dass sowohl Druckfestigkeit als auch Biegezugfestigkeit des Splittbetons gleich oder sogar höher sind als bei Beton mit Alluvialkies (Abbildung 8). Interessant sind hingegen die deutlich tieferen E-Module mit kristallinen Zuschlägen (Abbildung 9). Dieser wird vom Glimmeranteil in den Aggregaten beeinflusst. Tiefe E-Module sind für den Beton der Tunnelbauten nicht als Negativpunkt zu betrachten. Betonauskleidungen mit kleinem Elastizitätsmodul vermögen einen hohen Gebirgsdruck besser aufzufangen. Trotz des festgestellten erhöhten Schwindverhaltens des Betons, konnte dank des tiefen Elastizitätsmoduls kaum Schwindrisse beobachtet werden.

Abbildung 8: Hauptunterschiede des Splittbetons zum Beton mit Rundsand und Kies (Betonfestigkeitsklasse B40/30).

Eigenschaften	Pump- und Ortsbeton	Spritzbeton
Zementgehalt (CEM I 42.5)	5 - 20% höher	mindestens 450 kg/m ³
Wassermengefaktor W/Z	< 0.5 möglich	< 0.5 möglich
Zusatzmittel	Hochleistungsverflüssiger und ev. Luftporen	Hochleistungsverflüssiger, Pumphilfe und ev. Verzögerer resp. Beschleuniger
Einbringen resp. Applikation	generell heikler und empfindlicher	störungsanfälliger (höherer Pumpendruck)
Rückprall	-	tief (4 - 13%)
Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit	normal bis höher	normal bis höher
Elastizitätsmodul	bis 50% tiefer (vom Zuschlagstyp abhängig)	bis 50% tiefer (vom Zuschlagstyp abhängig)
Wasserdichter Beton	möglich	möglich
Schwinden	höher aber keine Risse infolge des tiefen E-Moduls	höher aber keine Risse infolge des tiefen E-Moduls

Abbildung 9: Würfeldruckfestigkeit fc_{w28d} (nach 28 Tagen) versus Elastizitätsmodul aufgeteilt nach Gesteinstypen und Aufbereitungsgrad der Betonzuschlagstoffe (gege: Material gebrochen und gewaschen; ugge; ungebrochen aber gewaschen; roh: Rohmaterial unbehandelt 0/32). Als Vergleich ist die bekannte Beziehung für einen Beton aus Alluvialkies ($E\text{-Modul} = 6000 \times fc_{w28d}^{0.5}$) aufgeführt.



Literatur

- 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.
- KRUSE, M. & WEBER, R. (1995): Beton aus TBM-Ausbruchmaterial. Schw. Ing. u. Arch. Nr. 47.
- 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. Schw. Ing. u. Arch. 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; Lieferung 91 (ISBN 3-907997-24-7).