Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 113 (1995)
Heft: 47

Artikel: Optimale Wiederverwertung von TBM-Ausbruchmaterial
Autor: Thalmann, Cédric
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-78816

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Cédric Thalmann, Zürich

Optimale Wiederverwertung von TBM-Ausbruchmaterial

Die Wiederverwertung der von Tunnelbohrmaschinen (TBM) gewonnenen Ausbruchmaterialien war aufgrund der reichlich vorhandenen Kiesvorkommen noch bis vor kurzer Zeit wirtschaftlich uninteressant. Neue TBM-Generationen und Aufbereitungstechniken werden es ermöglichen, Ausbruchmaterialien als hochwertige Betonzuschläge einzusetzen. Der Wiederverwertungsgrad ist von drei Parametern abhängig: Geologie, Maschinentyp und Aufbereitungstechnik.

Einfluss der geologischen und petrographischen Parameter

Wechselhafte Felsqualität im Untertagebau

Im Gegensatz zum offenen Kies- respektive Felsabbau kann beim Untertagebau innerhalb kurzer Zeitintervalle unterschiedliches Felsmaterial anfallen. Qualitätsänderungen des Ausbruchmaterials im Tunnelbau werden durch Petrographiewechsel, durch das Auffahren von Störungszonen oder durch rasche Alternation zwischen hochwertigen und minderwertigen Materialien hervorgerufen. So kann innerhalb desselben Tunnelquerschnittes ungeeignetes mit hochwertigem Material vermischt werden. Ein effizienter Kontrollmechanismus - der nicht negativ auf die Vortriebsleistung einwirkt - kann gewährleisten, dass Abweichungen an die gestellten Qualitätskriterien sofort erfasst werden. In Bild 1 sind die wichtigsten geologischen Parameter aufgelistet, die - neben der Inhomogenität der Gesteinsqualität - auf Grösse und Form der anfallenden TBM-Materialien einen Einfluss ausüben.

Petrographisch ungeeignete Komponente

Die SIA-Norm 162/1 schreibt für Beton ab B 30/20 einen maximalen Anteil an petrographisch ungeeigneten Komponenten von 5 Massenprozent vor. Steigt der Anteil auf 5 bis 10%, ist die Wirkung auf die Eigenschaft des Festbetons zu prüfen. Für Beton B 20/10 und B 25/15 ist ein Gehalt von 10 Massenprozent zulässig. Beträgt der Anteil 10 bis 15%, ist auch hier die Wirkung auf die Eigenschaft des Festbetons zu prüfen. Bei Tunnelbauten im zentralen Alpenraum besteht ein grosser Teil der zu durchfahrenden geologischen Schichtreihen aus Kristallingesteinen, die einen hohen Anteil an petrographisch ungeeigneten Komponenten aufweisen können. Es sind dies vor allem Schichtsilikate, deren häufigste Vertreter Biotit (Dunkelglimmer) und Muskowit (Hellglimmer) sind. Weitere Schichtsilikate sind z.B. Serizit, Talk, Serpentin, Chlorit und Tonmineralien. Glimmerführende Sande als Betonzuschläge haben im Nordtessin immer wieder zu Problemen geführt. Alluvialkies aus kristallinen Komponenten, welcher im Gegensatz zu frisch gewonnenem Felsmaterial seit Jahrtausenden exogenen Prozessen ausgesetzt war, besitzt eine Gesteinsoberfläche, die grösstenteils frei ist von leicht verwitterbaren Mineralien. So kann Pyrit (FeS_2) in Form von Nestern auf der Gesteinsoberfläche von frischen Ausbruchmaterialien in grösseren Mengen vorkommen. Auf der Halde aber «verrostet» Pyrit relativ rasch und verfärbt das Gestein rötlich-bräunlich. Über das Verhalten von gewissen Mineralien - zum Beispiel von frischen, unverwitterten Feldspäten oder gewissen Schichtsilikaten - im basischen Milieu (pH rund 12) des Zementleimes ist noch wenig bekannt. Ebenso lässt sich wenig über das Langzeitverhalten (z.B. Alkali-Reaktion) solcher Mineralien sagen.

Bei der Bestimmung des Schichtsilikatgehaltes muss grundsätzlich unterschieden werden zwischen freien Schichtsilikaten in der Sandfraktion, den Schichtsilikaten an der Gesteinsoberfläche und in den Aggregaten selber. Letztere haben keinen merklich negativen Einfluss, ausser der durch die Gesteinsanisotropie hervorgerufenen Abnahme der Gesteinsfestigkeit. Freie Schichtsilikate, die mit dem Mischwasser und Zement in Kontakt kommen, haben einen negativen Einfluss sowohl auf die Frischbetoneigenschaften als auch auf die Festbetoneigenschaften. Mit steigendem Gehalt an Schichtsilikaten nimmt die Wassermenge für gleichbleibende Verarbeitbarkeit zu. Untersuchungen haben gezeigt, dass schon weniger als ein Massenprozent freier Glimmerblättchen im Gesamtgemisch die 28-Tage-Druckfestigkeit um 10 bis 30 Prozent vermindern kann [1]. Die wörtliche Auslegung der Norm hinsichtlich der Massenprozente ist somit nicht zu empfehlen. Die Interpretation als Stück-% hingegen hat sich in der Praxis als tauglich erwiesen. Die Bestimmung der Glimmergehalte in Massenprozenten, vor allem in der massgebenden Sandfraktion 0/4 mm, kann in der Praxis nicht mit vernünftigem Aufwand durchgeführt werden. Glimmerbestimmungen im Sand, die mit einigermassen vertretbarem Aufwand durchgeführt werden, erfolgen mit dem Binocular und werden in Stück-% angegeben.

Die im Rahmen des Projektes AlpTransit Gotthard durchgeführten Aufbereitungs- und Betonversuche mit kristallinen Gesteinen haben ergeben, dass sich die ungünstigen Schichtsilikate zum weitaus grössten Teil im Feinsandbereich (0/1 mm) ansammeln [2].

Eine optimale Sandaufbereitung und -behandlung kann den Glimmergehalt im Vergleich zum anfallenden Rohsand des Fräs- oder Sprengvortriebes verringern (Bild 2). Eine weitere Optimierung der stark glimmerhaltigen Sande kann durch Substitution der abschlämmbaren Fraktion (0,063 mm) mit glimmerlosen Produkten erreicht werden.

Bild 1.
Einfluss von geologischen Parametern auf Grösse und Form des TBM-Ausbruchmaterials

Mass, Vorkommen	Geologische Parameter	Mass, Vorkommen
tief	Sprödigkeit	hoch
viele	Trennflächen (Klüftung, Verschiebungsfläche, usw.)	wenige
ausgeprägt	Textur (Schieferungsgrad, Anisotropie)	keine
senkrecht	Orientierung der Gesteinstextur zur Tunnelachse	parallel
hoch	Gebirgsdruck	niedrig
tief	Abrasivität des Gesteins	hoch
	grösser, dicker, gedrungen — Grösse und Form des Ausbruchmaterials — kleiner, dünner plattiger	
optimal	Weiterverarbeitung zu Betonzuschlägen	ungünstig

Natürliche und anthropogene Verunreinigungen

Ausbruchmaterialien aus dem maschinellen Vortrieb sind generell von einem Saum feinstkörniger Partikel der Zertrümmerungszone umgeben.

In alpinen und jurassischen Kalken sind Klüfte und Trennflächen oftmals mit Tonmineralien gefüllt, die bei der Vermischung mit Feinstmaterialien aus dem Fräsvorgang zu einer verstärkt bindigen Masse führen können.

Beim Einsatz von TBM-Maschinen ist der Gebrauch von ölhaltigen Materialien für Schmiermittel und Hydrauliksysteme unabdingbar, so dass es während dem Vortrieb zur Kontamination des Ausbruchmaterials kommen kann. Mit entsprechenden Auflagen können erhöhte Ölverunreinigungen vermieden werden. Beim Spritzbetoneinsatz - mit eventueller Zugabe von Stahlfasern - wird der Rückprall zusammen mit dem Aushub vermischt und kommt so in die Aufbereitungsanlage. Je nach Verwendungszweck des Materials ist der Spritzbetonrückprall mit möglichen Stahlfaserzusätzen unerwünscht.

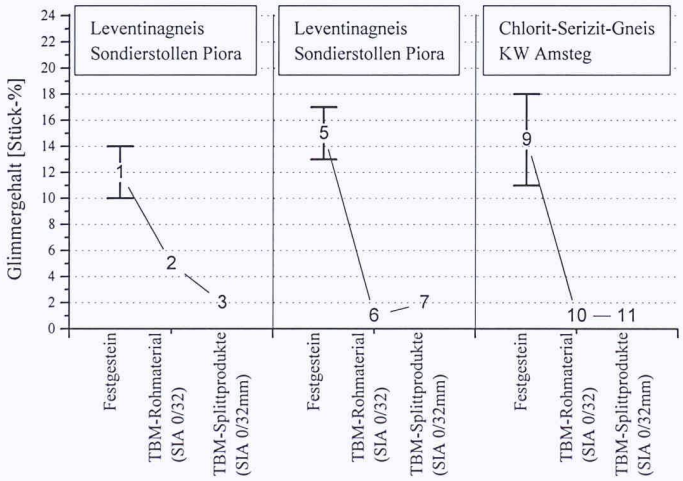
Gesteinsfestigkeit

Auf die Druckfestigkeit für Betonzuschläge wird in den Betonnormen nicht explizit eingegangen. Im allgemeinen gilt aber die Annahme, dass ein Beton nach 30 Tagen mindestens ein Drittel der Gesteinsfestigkeit erreichen wird. Für die Bestimmung der mechanischen Festigkeit oder des Bruchwiderstandes von Splitt werden nicht selten der Los-Angeles-Test oder der Zertrümmerungstest eingesetzt. Diese geben Auskunft über das Ausmass der Kornzertrümmerung beziehungsweise -verfeinerung infolge der kombinierten Beanspruchung auf Schlag und Abrieb. Für eine grobe aber dafür einfache Bestimmung der Festigkeit in Sedimenten kann auch der Schmidt'sche Rückprallhammer direkt an der Tunnelwand eingesetzt werden. An den gröberen TBM-Chips kann ebenfalls mit geringem Aufwand mittels dem Point-load-Prüfverfahren die indirekte Zugfestigkeit bestimmt werden. Neben dem im Vernehmlassungs-Entwurf vom Dezember 1980 zur SIA-Norm 198 (Geotechnische Information für die Beurteilung der Schrämm- bzw. Bohrbarkeit von Naturstein) erwähnten Cerchar-Test wird auch der sogenannte LCPC-Verschleiss-Test angeführt. Mit diesem Prüfverfahren lässt sich gleichzeitig ein LCPC-Brechbarkeitsindex bestimmen, der einen Vergleich mit der Gesteinsfestigkeit zulässt (Bild 3) [3].

Maschinenspezifische Parameter

Maschineller Vortrieb:

Der TBM-Bohrkopf ist je nach Durchmesser mit einer unterschiedlichen Anzahl von diskusähnlichen Schneidwerkzeugen (Meissel) in einem Abstand von 70 bis 85 mm ausgestattet. Mit bis zu 25 Tonnen pro Werkzeug werden diese auf konzentrischen Kreisen um die Drehachse der Kopfplatte gerollt und dringen 2 bis 10 mm pro Bohrkopfumdrehung in den Fels. Bei diesem Vorgang wird der Fels im Kontaktbereich mit dem Werkzeug regelrecht pulverisiert. An der Felsoberfläche kommt es zur Bildung von radial verlaufenden Rissen (Bild 4). Sobald sich Risse von zwei benachbarten Schneidspuren verbinden,



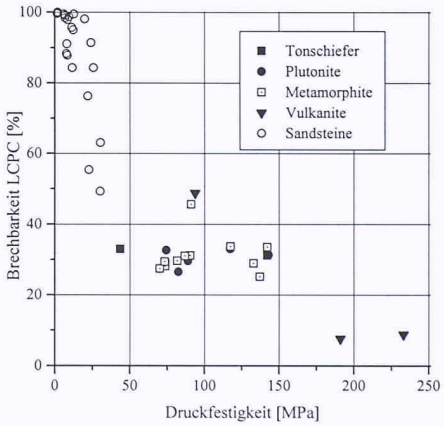
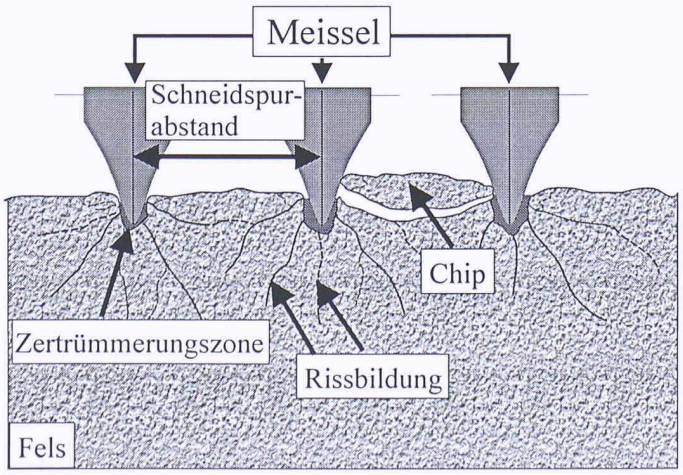


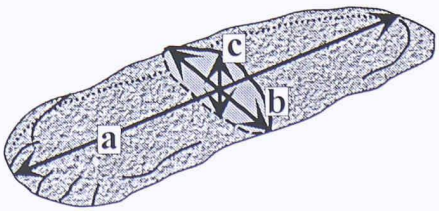
Bild 2 (oben links).
Gehalt an freien Glimmermineralien in Stück-%: 1/5/9 im Festgestein (mit Schwankungsbereich) 2/6/10 im TBM-Rohmaterial und 3/7/11 im aufbereiteten TBM-Material

Bild 3 (oben).
Abhängigkeit des LCPC-Brechbarkeitsindex zur einachsigen Druckfestigkeit [3]

Bild 4 (unten links).
Schematische Darstellung der Chipbildung beim maschinellen Tunnelvortrieb

Bild 5 (unten).
Schematische Darstellung des Ausbruchmaterials und dessen Kornachsen





kommt es zum Wegsplittern von grösseren Gesteinsbruchstücken, den sogenannten Chips.

Neben den eigentlichen Chips, welche zwischen zwei Schneidrollen herausgelöst werden, und dem Feinanteil aus der Zertrümmerungszone bilden sich vor allem kleinere Gesteinsbruchstücke, die vor der eigentlichen Chipbildung aus der Felsoberfläche abplatzen. Zusätzlich fallen in einem anisotropen Fels, der mit Klüften, Störungszonen oder Diskontinuitätsflächen durchsetzt ist, auch wesentlich grössere Gesteinsbrocken als die Chips an. Massgebend für die Grösse der ausgebrochenen Komponenten ist der Schneidrollenabstand, der bei Zunahme zu grösseren Chips und Gesteinsbruchstücken führt. So wird die maximale Breite der Chips durch den Meisselabstand abzüglich der Meisseldicke bestimmt. Mit den heutigen TBM weisen die Chips eine Breite (b, Bild 5) von ca. 55 bis 70 mm auf. Die Dicke (c) der Chips beträgt in der Regel 15 bis 25 mm und ist ebenfalls abhängig vom Schneidrollenabstand. Die Länge der Chips (a) variiert am stärksten und liegt im Bereich zwischen 100 und 300 mm.

Einen geringeren Einfluss als der Schneidrollenabstand, erkennbar vor allem in einem stark abrasiven Medium, übt der Zustand respektive der Abnützungsgrad der Schneidrollen auf die Grösse der anfallenden Komponenten aus. Der Einfluss anderer maschinenspezifischer Parameter wie zum Beispiel Bohrkopfdrehzahl, Drehmoment, Diskenform oder Diskendurchmesser auf die Grösse des Ausbruchmaterials ist eher minim (Bild 6). Die Annahme, dass zunehmender Anpressdruck zu dickeren Bruchstücken führt, konnte aufgrund bisheriger Erfahrungen nicht bestätigt werden.

Einfluss des Schneidrollenabstandes

Im August 1994 fand in Äspö im Süden Schwedens ein Fräsversuch unter der Leitung der Firma Robbins statt [4]. Der Untergrund besteht aus einem 1700 Millionen alten Granit (Smalands Granite) mit folgenden Felskennwerten (Tabelle 1).

Für die Versuchsanordnung stand folgender TBM-Typ im Einsatz (Tabelle 2).

Beginnend mit der Standard-Schneidrollenanordnung mit einem Schneidspurabstand von 86 mm (= 100 %) wurden zwei kurze Tunnelabschnitte mit Schneidspurabständen von 129 mm (= 150%) und 172 mm (= 200%) gebohrt. Bei den Versuchsanordnungen mit den vergrösserten Schneidspurabständen (150% und 200%) wurden die Schneidrollen im Brustbereich entfernt oder verschoben. Dies heisst, dass rund 60% des Tunnelquerschnittes mit vergrösserten Schneidrollenabständen gefräst werden konnten, wobei die Schneidrollen des Zentrums- und Kaliberbereiches unverändert blieben.

In Bild 7 sind die (Standard-)Siebkurven dargestellt, die durch den b-Korndurchmesser bestimmt werden. Die Siebkurven zeigen, dass bei zunehmendem Schneidrollenabstand der Sandanteil verkleinert respektive der Anteil an gröberen Komponeten deutlich zunimmt.

Die nachträglich mittels Stangensieben ausgesiebten Ausbruchmaterialien in Bild 8 ergeben eine Siebkurve, die auf der Dicke der Komponenten (c-Korndurchmesser) beruht. Auch hier zeigt sich die Zunahme an groben Ausbruchmaterialien bei vergrössertem Schneidspurabstand.

Alle drei Kornachsen-Grössen der Chips sind direkt abhängig vom Schneidrollenabstand. Die Vergrösserung des Schneidrollenabstandes um 50% führt zu rund 60% dickeren und zu rund 80% längeren Chips (Bild 9). Die Zunahme der Dicke und der Länge ist im Gegensatz zur Breite leicht überproportional.

Das obenstehende Bild 9 zeigt, dass ein Schneidrollenabstand von ca. 107 mm in einem granitischen Fels genügen würde, um Chips mit einer Dicke von rund 30 mm zu erhalten. Dadurch könnten auch die gröberen Betonzuschläge 16/32 mm in grösseren Mengen produziert werden.

Die TBM-Tests haben gezeigt, dass ein TBM-Vortrieb mit deutlich vergrössertem Schneidrollenabstand nicht unrealistisch ist. Eine grundsätzliche Bestätigung der positiven Befunde vom Äspö-Versuch mit einem weiteren Langzeittest wäre von besonderem Interesse, um dabei die Auswirkungen auf die Penetration respektive den Schneidrollenverschleiss zu ermitteln.

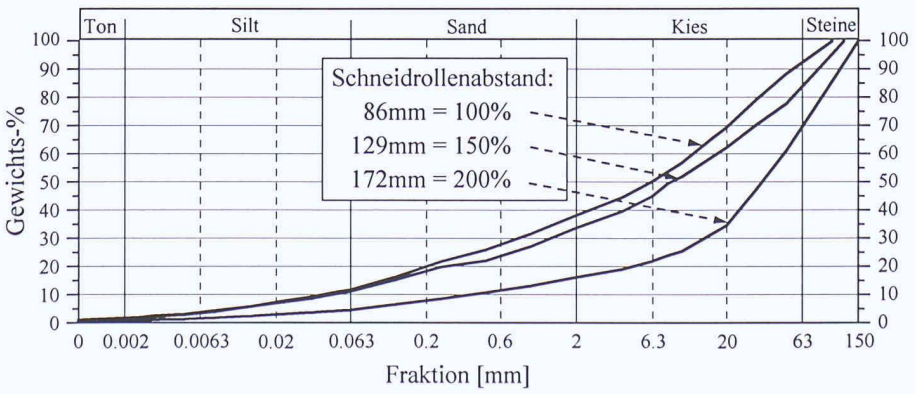
Zukünftige Tunnelbohrmaschinen

Neuere und zukünftige Tunnelprojekte weisen darauf hin, dass in Zukunft mit Tunnelbohrmaschinen mit grösseren Dimensionen zu rechnen ist. Bohrdurchmesser mit über 10 m, 20″-Disken und Schneid-

Mass, Vorkommen	Maschinenspezifische Parameter	Mass, Vorkommen
gross	Schneidrollenabstand	klein
klein	Abnützungsgrad der Schneidrollen	hoch
?	Anpressdruck der Schneidrollen	?
grösser, dicker, gedrungen	Grösse und Form des Ausbruchmaterials	kleiner, dünner plattiger
Optimal	Weiterverarbeitung zu Betonzuschlägen	ungünstig

Bild 6.
Einfluss von maschinenspezifischen Parametern auf Grösse und Form des TBM-Materials

Bild 7.
Siebkurven bei unterschiedlichem Spacing



Hersteller, Typ	ROBBINS JARAVA MK 15 - 1680 / 5.0
Bohrdurchmesser	5.0 m
Bohrkopf - Leistung	1680 kW
Bohrkopf - Anpressdruck	8330 kN
Bohrkopf - Umdrehung pro Minute	0 - 12.7 rpm VSD
Anzahl Schneidrollen	34
Schneidrollen - Durchmesser	17″
Maximaler Anpressdruck pro Schneidrolle	245 kN

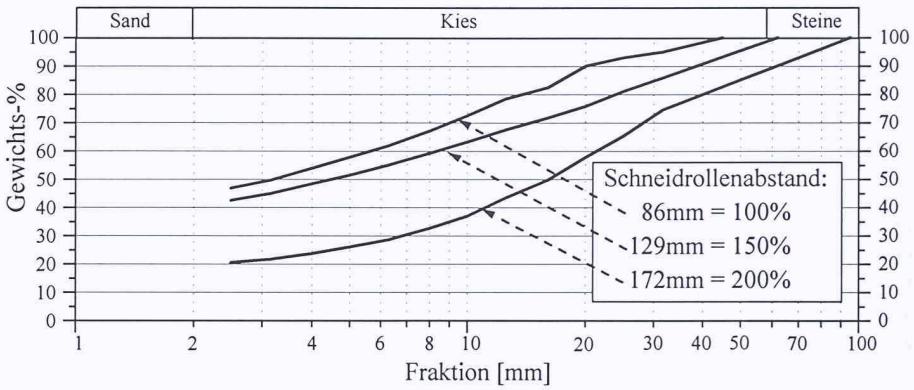
Tabelle 2.
TBM-Kennwerte

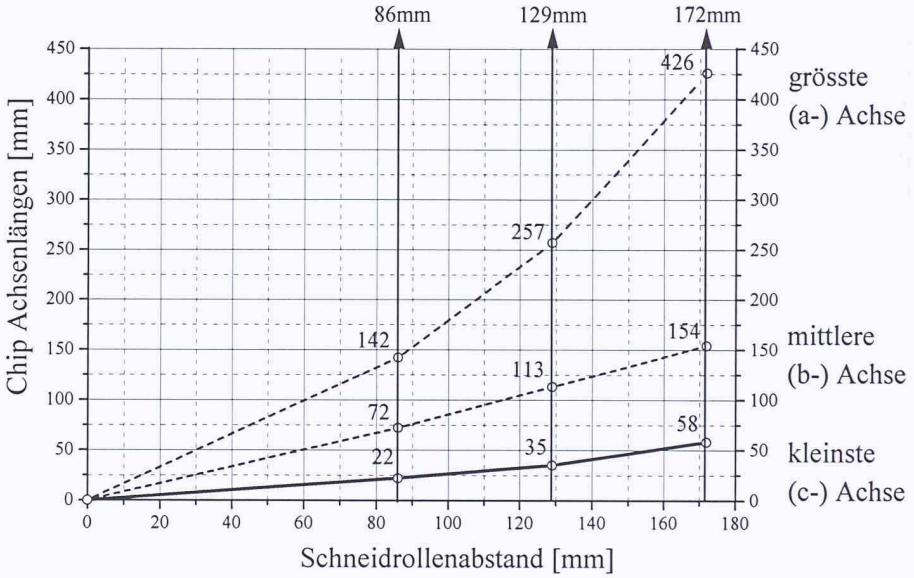
Einachsige Druckfestigkeit:	250	MPa
Point Load Index I_{s50}	7.5	MPa
Cherchar Abrasivitäts Index	5.3	

Tabelle 1.
Felskennwerte

rollenabstände bis 90 mm werden vermehrt eingesetzt werden. Der Einsatz von Maschinen, die nach der Methode der Hinterschneidtechnik arbeiten, ist für kurze Tunnelstrecken und spezielle Ausbruchprofile geeignet. Die in einem Sandstein durchgeführten Testversuche (CMM: Continous Mining Machine; Wirth GmbH und HDRK Mining Research Ltd.) haben gezeigt, dass rund 70 % der Komponenten eine Kornbreite von über 30 mm aufweisen.

Diese Weiter- und Neuentwicklungen haben neben zahlreichen Verbesserungen den Vorteil, dass vermehrt die erwünschten grösseren Ausbruchmaterialien anfallen werden (Tabelle 3).





Aufbereitungstechnik

Verwendung von TBM-Rohmaterial als Betonzuschlagstoffe

An der EMPA und in der Praxis durchgeführte Beton- und Pumpbetonversuche haben gezeigt, dass auch mit TBM-Rohmaterial (0 bis 32 mm) gute Frisch- und Festbetoneigenschaften erreicht werden können (s. Beitrag: Beton aus rohem TBM-Ausbruchmaterial; *Studer, W.* und *Olbrecht, H.P.* und Beton aus TBM-Ausbruchmaterial; *Kruse, M.* und *Weber, R.*). Mit dem Gebrauch von Rohmaterialien für einen «Normalbeton» (B30/20 und mehr) könnte auf aufwendige Splitt-Aufbereitungsarbeiten verzichtet werden.

Erfahrungen bei der Aufbereitung

Folgende Punkte müssen bei der Behandlung und Aufbereitung von maschinell gewonnenen Tunnelausbruchmaterialien beachtet werden: Der relativ hohe Feinanteil des Ausbruchmaterials zusammen mit dem Wasser führt beim Einbringen in Schutterwagen, auf Zwischendeponien oder in Silos zu einer starken Zementierung. Dies hat zur Folge, dass TBM-Material schon kurze Zeit nach dem Ablagern nur noch mit schweren Fahrzeugen bewegt werden kann. Die Lagerung von gefrästen Gesteinen in gängigen Silos muss vermieden werden, da dies zu Verstopfungen führt. Da auch im gefrästen Tunnelausbruchmaterial gröbere Komponenten mit einer Kantenlänge von über 200 mm vorhanden sein können, müssen diese Gesteinsbruchstücke mit einem Vorbrecher zerkleinert werden.

Aufgrund des stark bindingen Verhaltens des Ausgangsmaterials muss dieses mittels einer leistungsfähigen Waschtrommel gereinigt werden, da sonst die Siebe verstopft würden. Ungewaschene TBM-Materialien liessen sich eventuell mittels sogenannten Sternsieben auftrennen.

Die Auswahl und Einstelllung des Splittbrechers ist abhängig vom Ausgangsmaterial und von den gestellten Anforderungen an die Endkomponente. Der Brechvorgang für Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Vortrieb muss im Gegensatz zum konventionell gewonnenen Material schonungsvoller erfolgen, da die a priori zu geringen Kleinstdurchmesser der Grobfraktionen nicht allzu stark verkleinert werden dürfen. Es ist bekannt, dass das Gestein im Prallbrecher bei optimaler Drehzahl und Spaltweite durch dynamische Beanspruchung einen eher schonenden Brechvorgang erfährt und dadurch eine höhere Kubizität der Bruchstücke erreicht werden kann, als dies bei Druckbeanspruchung im Backen- oder Kegelbrecher der Fall ist. Geeignete Verfahren für die Splittproduktion sind z.B. Vertikalbrecher, die vermehrt kubischen Splitt mit abgerundeten Kanten liefern. Gebrochenes Material kann weiter mittels einer Friktionstrommel einem künstlichen Rundungsprozess unterworfen werden, um so die natürliche Kornform der Alluvialkiese nachzuahmen. Die Wirtschaftlichkeit solcher Friktionstrommeln und der Rundungsprozess allgemein werden in der Fachwelt kontrovers beurteilt, da zudem 5 bis 10 Prozent Ausschuss anfallen.

Grosse Sorgfalt muss der Sandaufbereitung geschenkt werden, damit eine optimale Siebkurve erreicht und eingehalten werden kann. Der abschlämmbare Feinstanteil (Filterkuchen: 0,063 mm) des Ausgangsmaterials und aus dem Brechprozess kann zusammen gegen 15 % der Gesamtmenge betragen. Die Schlammaufbereitungsanlage muss somit leistungsfähig sein und sollte die Möglichkeit gewähren, den Feinstanteil je nach petrographischer Eignung als Filler dem Sand wieder beigeben zu können, da sonst zuviel Überschuss anfällt. Ist der Feinstanteil petrographisch ungeeignet (z.B. stark glimmerhaltig), kann dieser durch ein geeignetes Ersatzprodukt ersetzt werden. Die Frage der Weiterverwertung des petrographisch ungeeigneten Fillers ist noch ungeklärt. Die Fraktionen bis 8 mm (zum Teil sogar bis 16 mm) weisen eine relativ gute Kubizität auf und müssen somit nicht mehr gebrochen werden (Bild 10). Die vor dem Brechprozess ausgesiebte Sandfraktion 0/4 mm und die Fraktion 4/8 mm können nach Bedarf so mit denselben anfallenden Frak-

Tabelle 3.
Massenprozentuale Angaben bei verschiedenen Ausbrucharten (TSM: Teilschnittmaschine, TBM: Tunnelbohrmaschine, CCM: Continuous Mining Machine, n: Anzahl Siebkurven)

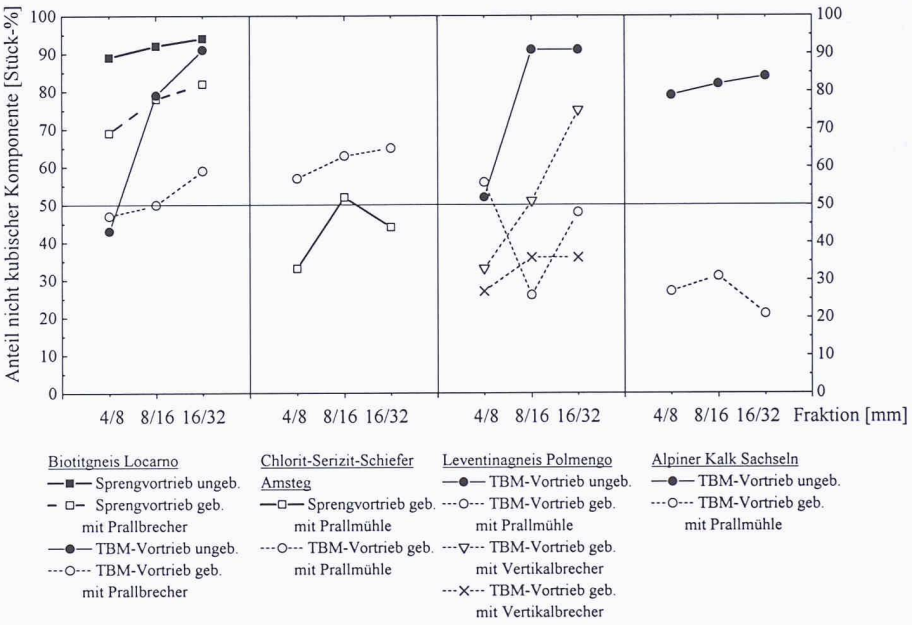
Art des Tunnelvortriebs	n	Schneid-spurab-stand [mm]	0 - 0.02 [mm]	0 - 4 [mm]	>30 [mm]	>100 [mm]
			Massenprozente			
konventioneller Sprengvortrieb (Kristalline Gesteine)	2	-	0-1	2-5	85-95	75-85
TSM-Vortrieb (Jura-Kalke)	14	-	5-15	15-40	5-40	0-5
TBM-Vortrieb (Sedimente, Plutonite, Metamorphite)	35	70-85	5-10	20-50	20-45	0-5
TBM-Vortrieb mit vergrössertem Spacing (Plutonite)	1 1 1	86 129 172	10 5 2.5	45 40 20	20 30 35	0 5 15
CCM-Vortrieb (Sandstein)	1	-	0-1	15-20	75-65	45-60

Bild 8 (links oben).
Siebkurven nach c-Korndurchmesser bei unterschiedlichem Spacing

Bild 9 (links unten).
Verhältnis des Schneidrollenabstands zu Chip-Kornachsen

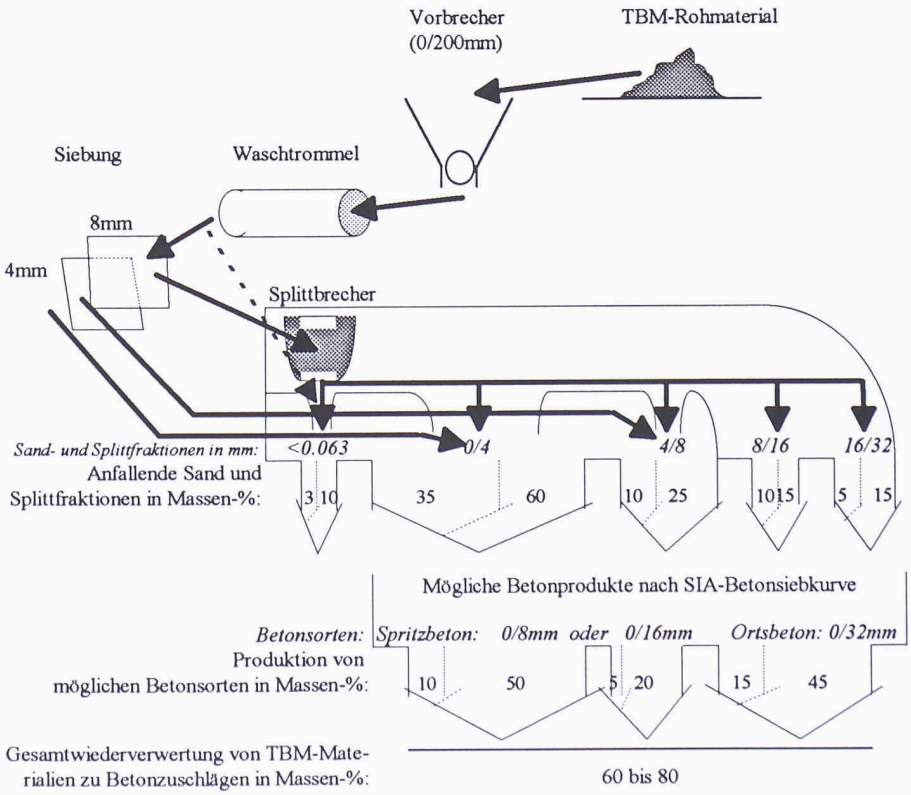
Bild 10 (rechts Mitte).
Kubizität von TBM-Rohmaterialien (ungeb. = ungebrochen) im Vergleich zu Splitten aus dem konventionellen Spreng- und TBM-Vortrieb

Bild 11 (rechts unten).
Materialbilanzen von Aufbereitungsversuchen (Minima und Maxima)



tionen aus dem Brechprozess gemischt werden. In Bild 11 ist ein grobes Modell für eine Aufbereitungsanlage für TBM-Materialien skizziert. Im unteren Teil der Grafik sind die Materialbilanzen solcher Aufbereitungsversuche aufgelistet, die mit TBM-Ausbruchmaterialien auf bestehenden Anlagen durchgeführt wurden.

Die verschiedenen Brechversuche haben alle positive Resultate erbracht und haben bewiesen, dass auch mit TBM-Material ein kubisches Maximalkorn von 32 mm produziert werden kann. Ein Grösstkorn zwischen 22 und 28 mm – wie es nicht selten in der Praxis für gebrochene Betonzuschläge verwendet wird – würde es erlauben, die Ausbeute an gröberen Splittprodukten zu erhöhen und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons zu verbessern. Die grössten Mengen fallen – zusammen mit der Voraussiebung der Rohmaterialien – in den Fraktionen 0 bis 8 mm an. Dies ist nicht unbedingt ein Nachteil, da im Tunnelbau grosse Mengen an Spritzbeton verwendet werden. Weiter kann mit TBM-Material – im Gegensatz zum konventionell gewonnenen Ausbruchmaterial – eine ausreichende Sandproduktion gewährleistet werden.



Normen bezüglich Splittbetonherstellung

Bei Tunnelprojekten wird ein grosser Teil der benötigten Kiesmaterialien für die Herstellung von Ort-, Pump- und Spritzbeton benötigt. Die Schweiz besitzt keine Normen, die speziell für Splittbeton ausgerichtet sind. Die bestehende SIA-Betonnorm 162 hat sich für Rundkiesmaterialien gut bewährt, hingegen kann sie für gebrochene Materialien nicht ohne weiteres übernommen werden. Die Norm lässt aber dem Anwender über den Weg von Vorversuchen die Möglichkeit, eigene Rezepturen zu erstellen, um die gewünschten Qualitätsanforderungen zu erreichen. In diesem Bereich besteht in der Schweiz ein Handlungsbedarf, Erfahrungs- und Richtwerte im Umgang mit Splittbeton festzulegen. Eine erfolgreiche und zufriedenstellende Wiederverwertung von TBM-Ausbruchmaterial kann aber nur gelingen, wenn alle Projektbeteiligten sich intensiv mit den Besonderheiten dieser Splittprodukte auseinandersetzen.

Ausblick

Der Wiederverwertungsgrad von heute anfallendem TBM-Ausbruchmaterial zu Betonzuschlagstoffen ist mit 60 bis 80 % weit höher als bis anhin angenommen. Optimales Zusammenwirken der Geologie, der TBM-maschinenspezifischen Parameter und Aufbereitungstechnik - letztlich auch der Splittbetontechnologie - erlaubt es, Ausbruchmaterial als Ersatz für hochwertige Kiesmaterialien in genügender Menge aufzubereiten.

Adresse des Verfassers:
Cédric Thalmann, Ingenieurgeologie ETHZ, ETH Hönggerberg; 8093 Zürich.

Literatur

[1]
Fookes, P. and *Revie, W.;* 1982: Mica in concrete - a case history from Eastern Nepal. Concrete March 1982.

[2]
A.S.E. Technik; Empa; *Ernst Basler* und Partner; ETHZ; 1995: Untersuchung zur Wiederverwendung von Ausbruchmaterial. Aufbereitungs- und Betonversuche von August 1994 bis März 1995. Schweizerische Bundesbahnen Projektleitung AlpTransit Gotthard. 7 Berichte.

[3]
Büchi, E., Mathier, J.-F., Wyss, Ch.; 1995 in Vorbereitung: Gesteinsabrasivität - ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergesteinen. Ein Vergleich zweier Prüfverfahren. Tunnel 5/95.

[4]
Büchi, E., und *Thalmann, C.;* 1995: Wiederverwertung von TBM-Ausbruchmaterial - Einfluss des Schneidrollenabstandes. TBM Know-how zum Projekt NEAT, Atlas-Copco-Robbins. Vortrag am Symposium Luzern, 16. März 95.