Zuschlagstoffe aus TBM-Material

Autor(en): **Hermann, Kurt / Egmond, Bram von**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **64 (1996)**

Heft 9

PDF erstellt am: **27.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-153818

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Zuschlagstoffe aus TBM-Material

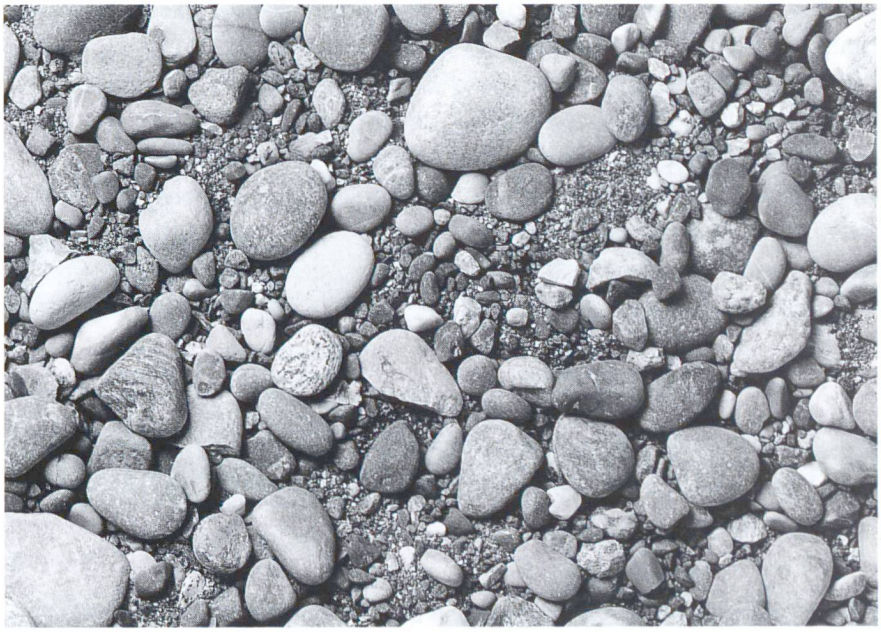
Tunnelausbruchmaterial darf grundsätzlich als geeignet zur Substitution von Alluvialkies betrachtet werden.

Schätzungsweise 35 bis 40 Mio. t Tunnelausbruchmaterial werden beim Bau der Neubaustrecken des Projekts AlpTransit Gotthard zwischen Arth-Goldau und Lugano anfallen [1], davon allein etwa 24 Mio. t beim Gotthard-Basistunnel. Solche Mengen stellen hohe Anforderungen an die Materialbewirtschaftung. Diese basiert auf drei Hauptzielen [2]:

- möglichst vollständige Wiederverwertung des anfallenden Materials
- möglichst geringe Raum- und Umweltbelastung
- Wirtschaftlichkeit

Bezüglich des beim Fräsvortrieb durch Tunnelbohrmaschinen (TBM) anfallenden Ausbruchmaterials (TBM-Material) bedeutet dies, dass dafür hochwertige Anwendungen zu finden sind: Der Einsatz als Betonzuschlagstoff oder als Kiessandersatz ist dem Einsatz als Schütt- und Auffüllmaterial vorzuziehen. In einer Zeit, in der die abbaubaren

TBM-Material aus dem Polmengostollen. Foto: Empa, Dübendorf



Kiessand aus dem Schweizer Mittelland. Foto: Empa, Dübendorf

TBM-Material aus dem Raum Kandertal (Breite der Maurerkelle: 12 cm).

Foto: Empa, Dübendorf

Reserven an Alluvialkies in der Schweiz immer knapper werden, kann TBM-Material ein wichtiges Kiessandersatzmaterial werden. Voraussetzung dafür ist, dass seine Eignung als Zuschlagmaterial überzeugend nachgewiesen wird.

Geologie und Petrographie

Die Zusammensetzung und damit auch die Qualität des Ausbruchmaterials, das im Verlauf eines Tunnelbaus anfällt, kann sehr schnell ändern. Verantwortlich dafür sind Änderungen im geologischen Aufbau des Gebirges.

Im zentralen Alpenraum besteht ein Teil der durchfahrenen Schichtreihen aus Kristallingestein, das im Hinblick auf die Betonherstellung petrographisch ungeeignete Komponenten enthält. Zu nennen sind hier beispielsweise frische unverwitterte Feldspäte und vor allem gewisse Schichtsilikate mit den beiden wichtigsten Vertretern Biotit (Dunkelglimmer) und Muskowit (Hellglimmer).

Tunnelausbruchmaterialien können drei Arten von Schichtsilikaten enthalten:

- freie Schichtsilikate in Sandfraktionen
- Schichtsilikate an Gesteinsoberflächen
- Schichtsilikate in Aggregaten

In der Norm SIA 162/1 [3] sind die tolerierbaren Anteile an petrographisch ungeeigneten Komponenten in Zuschlagstoffen begrenzt (siehe *Tabelle 1*). Erfahrungen zeigen jedoch, dass bereits weniger als 1 Massen% freier Glimmerblättchen im Kiessandgemisch die 28-Tage-Druckfestigkeit eines Betons um 10 bis 30 % vermindern kann. In Betonen ≥ B 30/20 werden aber bis zu 5 Massen% petrographisch ungeeigneter Komponenten zugelassen. Die ungeprüfte Übernahme der Grenzwerte in *Tabelle 1* ist deshalb gefährlich. Anstelle der sehr aufwendigen Bestimmung des Gehalts an ungeeigneten Komponenten in Massen% wird ohnehin häufig eine Bestimmung des Gehalts in Zahl% unter dem Binokular durchgeführt. Bei Untersuchungen von zukünftigem AlpTransit-Material wurden die freien Schichtsilikate vor allem im Feinsandbereich gefunden. Durch das Waschen während des Aufbereitens von TBM-Material kann sich bei geeigneter Prozessführung der Glimmergehalt stark reduzieren.

Beton	Tolerierter Anteil an petrographisch ungeeigneten Komponenten	Anteil an ungeeigneten Komponenten, der Prüfung der Festbetoneigenschaften erfordert
≥ B 30/20	5 Massen%	5–10 Massen%
B 25/15 B 20/10	10 Massen%	10–15 Massen%

Tab. 1 Petrographische Anforderungen an Zuschlagstoffe für normierte Betone gemäss Norm SIA 162/1 [3].

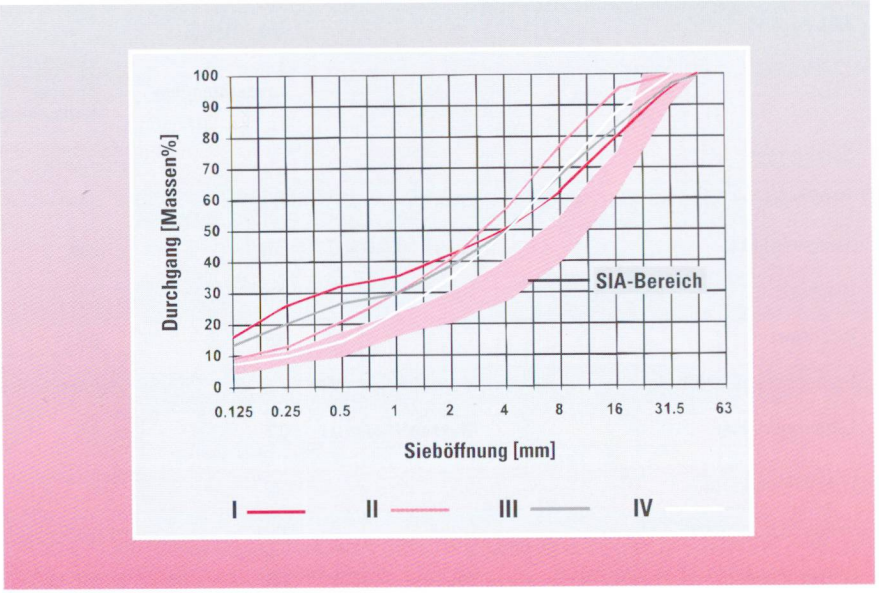


Abb. 1 Korngrössenverteilung der TBM-Materialien I bis IV (siehe Text) [5].

Beton aus TBM-Material

TBM-Materialien erfüllen gewisse Anforderungen der SIA- und SN-Normen nicht (Kornform, Korngrössenverteilung, Gehalt an petrographisch ungeeigneten Komponenten usw.). Mit entsprechend grossem Aufwand und hohen Verlusten könnten Kiessandmaterialien aufbereitet werden, die den Anforderungen der Normen besser entsprechen.

Von den zuständigen Stellen von AlpTransit wird allerdings das Performance-Prinzip unterstützt: Definiert werden muss primär nicht die genaue Zusammensetzung eines Kiessandes oder Betons, sondern seine Eigenschaften und Qualitäten.

Diese Philosophie lässt sich auch mit der gegenwärtig gültigen Norm SIA 162 [4] vereinbaren, die sich bei der Verarbeitung von Rundkiesmaterial bewährt hat. Gebrochenes und anderes nicht normkonformes Material kann als Zuschlag verwendet werden, wenn seine Eignung mittels Prüfungen und Vorversuchen nachgewiesen wird. Von dieser Möglichkeit wird beim Einsatz von TBM-Material ausgiebig Gebrauch gemacht.

Beton aus «rohem» TBM-Material

In einer Versuchsserie an der Empa in Dübendorf [5] wurden vier verschiedene TBM-Materialien eingesetzt, die aus Vorarbeiten für die Neat (Neue Eisenbahn-Alpentransversale) und bei einem Untertagebau im Raum Kandertal stammen (*Tabelle 2*). Das Hauptziel bestand darin, aus diesen Zuschlägen gut pumpbare Betone B 30/20 herzustellen.

Für die Versuche wurden die Bestandteile > 32 bzw. > 40 mm des TBM-Materials abgetrennt. Das übrige Material wurde unverändert eingesetzt. Im Vergleich zu alluvialem Schweizer Kiessand ist der Sandanteil wesentlich höher (siehe Siebkurven in *Abbildung 1*). Charakteristisch für die TBM-Materialien sind der grosse Anteil an nicht kubischen Körnern und der grosse Hohlraumgehalt bei loser Schüttung (*Tabelle 2*).

Der grosse Hohlraumgehalt bedingt im Vergleich zu Betonen aus Alluvialkies wesentlich höhere Zement- und Zusatzmitteldosierungen (*Ta-*

	Bezeichnung	Herkunft	Hohlraumgehalt Vol.%	Anteil nicht kubischer Körner (Fraktion 8–16 mm) Zahl%
I	Leventinagneis	Sondierstollen Polmengo Tunnelmeter: 387…390 m	36,6	74
II	Toniger Kalkschiefer	Raum Kandertal	42,1	76
III	Biotitgneis aus der Lucomagno-Zone, schiefrig, leicht porphyrisch	Sondierstollen Polmengo Tunnelmeter: 4600	37,2	77
IV	Schwarzer Dachschiefer	Sondierstollen Frutigen Abschnitt 100…1500 m	42,3	65

Tab. 2 TBM-Material, das möglichst unverändert für die Betonherstellung eingesetzt wurde [5].

Material		Versuch I Leventinagneis	II Toniger Kalkschiefer	III Biotitgneis	IV Schwarzer Dachschiefer
Betonrezepte					
TBM-Material (trocken), 0–32 / 40 mm	kg/m³	1680	1660	1630	1610
Zement (CEM I)	kg/m³	380	380	385	390
Wasser	kg/m³	239	230	235	250
W/Z-Wert		0,63	0,61	0,61	0,64
Hochleistungsverflüssiger	Massen% von CEM I	1,5	1,2	1,5	1,4
Luftporenbildner	Massen% von CEM I	0,2	0,4	0,25	0,3
Frischbetonwerte					
Rohdichte	kg/m³	2219	2252	2312	2239
Luftporengehalt	Vol.%	4,8	3,3	2,4	3,8
Verdichtungsmass		1,26	1,13	1,14	1,25
Ausbreitmass	mm	360	390	340	370
Wassergehalt im Frischbeton	kg/m³	240	249	235	260
WZ-Wert		0,63	0,66	0,61	0,67
Festbetonwerte					
Druckfestigkeit f_c, Alter 28 Tage	N/mm²	30,5	34,4	37,1	23,9
E-Modul, Alter 28 Tage	N/mm²	13 500	19 700	17 800	11 800
Wasserleitfähigkeit	g/m²h	19	23	17	25
Schwindwert [1] nach 28 Tagen	‰	0,47	0,52	0,24	0,90
Luftporengehalt LP, Aussenschicht	Vol.%	5,71	1,80	2,41	4,28
Frostbeständigkeit, Aussenschicht LP / n – U_{kr} = FS		1,5…1,7	0,5…1,1	1,1…1,2	1,2…1,5
Beurteilung		hoch	tief … mittel	mittel	mittel…hoch
Frosttausalzverhalten Δm_{30}	g/m²	700…4400	14 500	8400	9100 [2]
Beurteilung		mittel…tief	tief	tief	tief

1) An separat hergestellten Prüfkörpern, bei 20 °C/70% r.F.
2) nach 20 Frosttauwechseln

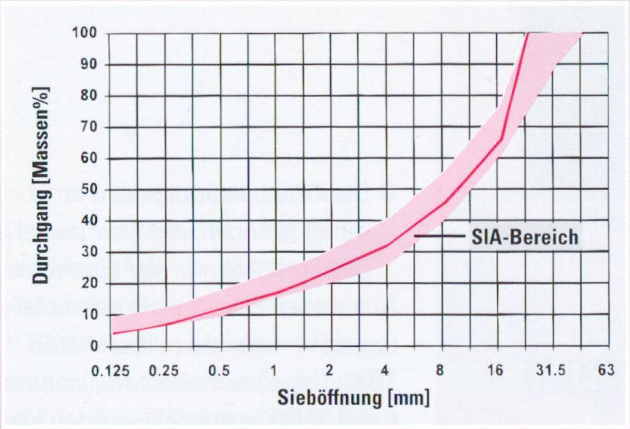
Tab. 3 Betonrezepte, Frisch- und Festbetonwerte für die Betone aus unverändertem TBM-Material [5].

belle 3). Pro Versuch wurden jeweils 6–8 m³ Beton hergestellt, in einem Fahrmischer etwa 15 min transportiert und anschliessend mit einer Pumpe in die Schalung eingefüllt. Die resultierenden Frisch- und Festbetoneigenschaften sind ebenfalls in *Tabelle 3* zusammengefasst. Einige Mühe verursachte die Entleerung der feuchten TBM-Materialien aus den Silos, was teilweise viel manuellen Einsatz erforderte. Die übrigen Verarbeitungsschritte bereiteten keine Probleme. Wichtige Ergebnisse der Versuchsserie sind:

- Es resultierten gut verarbeitbare Baustellenbetone; mit Ausnahme von Versuch IV wurde überall die angestrebte Festigkeitsklasse B 30/20 erreicht.
- Die E-Moduln betrugen nur rund 50 % der Werte, die mit Zuschlag aus dem schweizerischen Mittelland bei gleicher Festigkeit erreicht werden.
- Teilweise waren die Schwindverformungen erheblich grösser als bei «normalem» Beton (Ursachen: niedrigere E-Moduln und grössere Zementsteinanteile).
- Die Wirkung der Luftporenmittel war stark von der Zuschlagart abhängig.

Betone aus TBM-Material

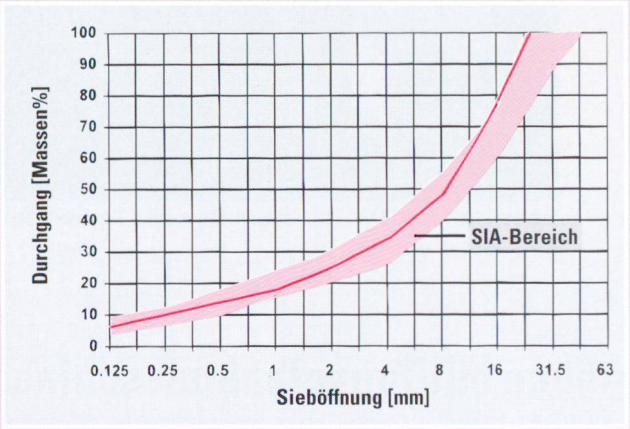
Aaregranit



Siebkurve des eingesetzten TBM-Materials

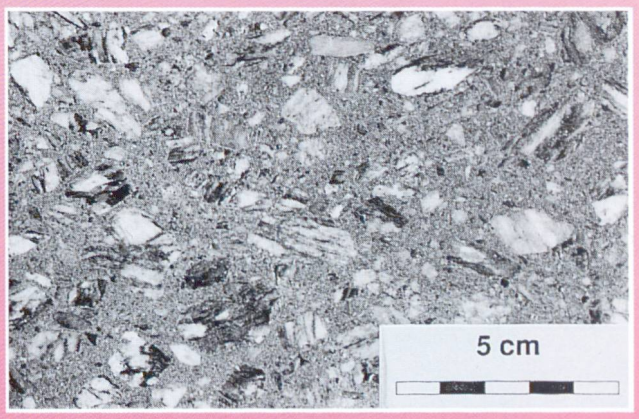
Zementgehalt	320 kg/m^3
HBV	1,0 Massen% von CEM I
LP	0,04 Massen% von CEM I
W/Z-Wert	0,50
Luftporengehalt	6,0 Vol.%
Verdichtungsmass	1,13
Ausbreitmass	400 mm
Entmischungsmass	2,06
Druckfestigkeit	47 N/mm^2

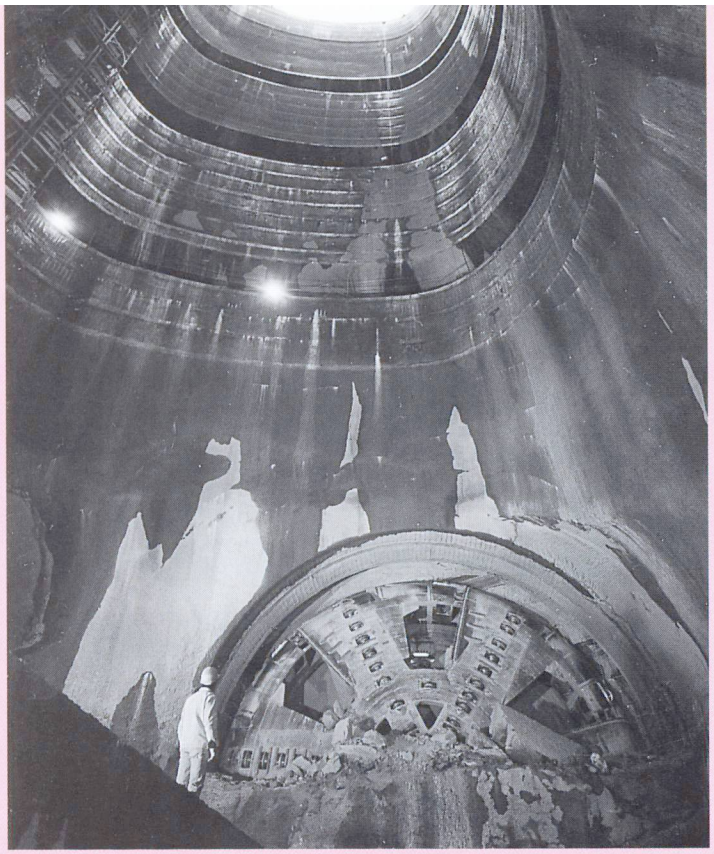
Leventinagneis



Siebkurve des eingesetzten TBM-Materials

Zementgehalt	350 kg/m^3
HBV	1,2 Massen% von CEM I
LP	0,06 Massen% von CEM I
W/Z-Wert	0,50
Luftporengehalt	4,8 Vol.%
Verdichtungsmass	1,16
Ausbreitmass	370 mm
Entmischungsmass	1,67
Druckfestigkeit	40 N/mm^2



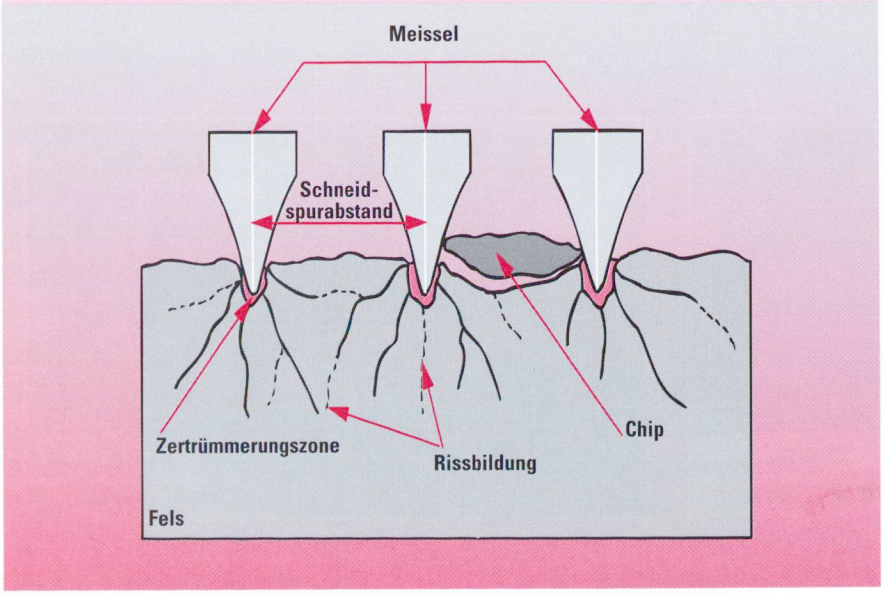


Bohrkopf der TBM, die beim Bau des Tunnel de Pomy (N 1) eingesetzt wurde. Foto: CPT / C. Cuendet, Clarens

Abbau mit Tunnelbohrmaschinen (TBM)

Die Kopfplatte am Bohrkopf einer Vollschnitt-TBM ist mit zahlreichen diskusähnlichen Schneidwerkzeugen (Meissel) im Abstand von etwa 60 bis 85 cm versehen. Der Bohrkopf dringt mit 2 bis 10 mm pro Umdrehung in den Fels ein. Auf die einzelnen Schneidwerkzeuge, die auf konzentrischen Kreisen um die Drehachse der Kopfplatte gerollt werden, wirkt dabei eine Last von bis zu 25 t.
Im Kontaktbereich mit dem Werkzeug wird der Fels «pulverisiert», zudem entstehen radial verlaufende Risse in der Oberfläche (siehe *Schema* unten). Wenn sich die Risse von zwei benachbarten Schneidspuren verbinden, splittern grössere Gesteinsstücke ab; es bilden sich die sogenannten «TBM-Chips». Weitere Gesteinsbruchstücke platzen bereits vor der Chipbildung von der Felsoberfläche ab, und in anisotropen Felsen (Felsen mit Klüften, Störungszonen, Diskontinuitätsflächen) können auch wesentlich grössere Gesteinsbrocken als die Chips anfallen (Kantenlängen teilweise > 500 mm).
Mit heutigen TBM produzierte Chips sind etwa 100 bis 300 mm lang, 55 bis 70 mm breit und 15 bis 25 mm dick. Ihre maximale Grösse wird durch viele Faktoren bestimmt, massgebend ist aber der Schneidspurabstand.
Quellen: [9, 10]

Chipbildung mit modernen TBM nach [9]. Zeichnung: TFB / S. Einfalt, ZSD



- Die Frostbeständigkeit war mittel bis hoch, die Frosttausalzbeständigkeit nur tief bis mittel.

Aus diesen Fakten lässt sich ableiten, dass mit nicht aufbereiteten TBM-Chips baustellentauglicher Beton B 30/20 hergestellt werden kann. Eine Ausnahme ist der Schwarze Dachschiefer (Versuch IV), der sich nur bedingt eignet. Da Beton B 30/20 für die meisten Anwendungen im Hochbau ausreicht, besteht hier eine Möglichkeit, kostbaren Alluvialkies durch TBM-Material zu substituieren.
Ähnlich positive Resultate wurden auch bei vergleichbaren Versuchen mit TBM-Material wie Kalkstein (Malm und Tertiär), Chlorit-Serizit-Gneis oder Prasinit (Grüngestein) gemacht [6].

Beton aus «veredeltem» TBM-Material

Charakteristisch für TBM-Material sind der hohe Sandanteil, der hohe Prozentsatz an nicht kubischen Komponenten sowie oft der relativ hohe Anteil an petrographisch ungeeigneten Komponenten im Feinbereich. Durch schonendes Brechen in Prallmühlen oder Vertikalbrechern kann die Menge der kubischen Komponenten erhöht werden. Da die schädlichen Beimengungen (Glimmerblättchen) vorwie-

gend in Sandfraktionen < 0,5 mm auftreten, werden sie durch die Waschvorgänge mindestens teilweise entfernt.

Mit TBM-Material aus dem Polmengostollen und aus einer Zone mit Erstfelder Gneis wurden Versuche angestellt, in denen die Zuschlagqualität unterschiedlich stark verbessert wurde [1]:

- Sorte 1 = unbehandeltes Rohmaterial, abgetrennt bei 32 bis 40 mm
- Sorte 2 = gewaschene, nicht gebrochene Sand- und Kieskomponenten, getrennt in Fraktionen 0–4, 4–8, 8–16 und 16–32 mm und erneut zusammengesetzt
- Sorte 3 = gewaschene, gebrochene Sand- und Kieskomponenten, getrennt in Fraktionen 0–4, 4–8, 8–16 und 16–32 mm und erneut zusammengesetzt

Bei den Sorten 2 und 3 wurden jeweils Kiessandgemische mit Siebkurven im SIA-Bereich und solche mit Siebkurven oberhalb des SIA-Bereichs («feinkörnigere» Siebkurve) zusammengestellt *(Abbildung 2)*.

Das für die Versuche verwendete TBM-Material aus dem Polmengostollen ist ein leicht glimmerhaltiger Leventinagneis, der bei den südlichen Baulosen des Gotthard-Basistunnels in grossen Mengen anfallen wird. Hauptbestandteile sind Feldspäte (40–45 Vol.%), Quarz (30–35 Vol.%) und Glimmer (Muskowit und Biotit; 0–15 Vol.%). Die analogen Versuche mit einem Chlorit-Serizit-Gneis/Schiefer aus der geologischen Zone des Erstfelder Gneises werden hier nicht beschrieben.

Tabelle 4 enthält Angaben zur Kornform der TBM-Materialien. Sie zeigt, dass der Anteil an nicht kubischen Komponenten stark abnimmt, wenn

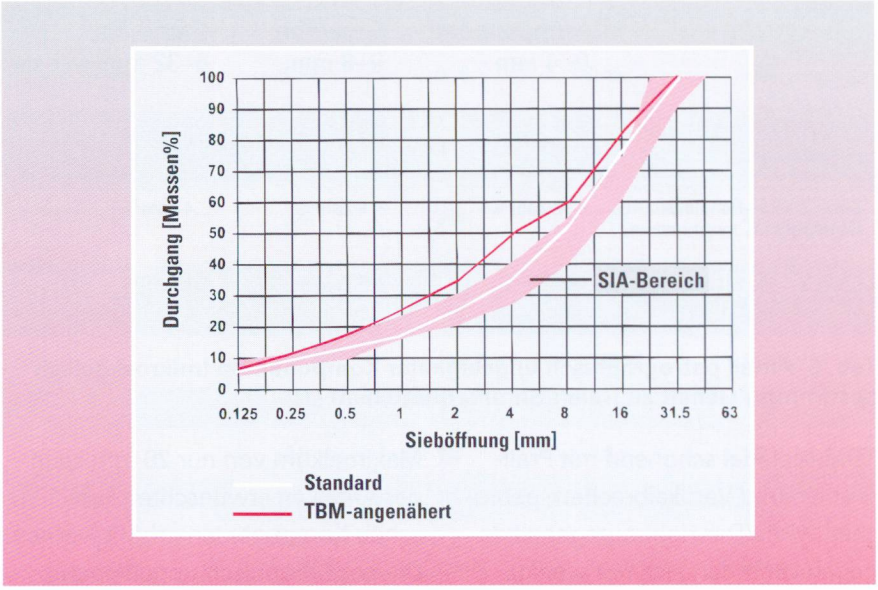


Abb. 2 Siebkurven der Zuschlagstoffe für Betonierversuche mit «veredeltem» TBM-Material (modifiziert, nach [1]).

	Frakt. 4–8 mm	Frakt. 8–16 mm	Frakt. 16–32 mm
TBM-Chips ungebrochen (Sorten 1 und 2)	63–70%	72–85%	79–96%
TBM-Chips gebrochen (Sorten 3)	26–57%	26–63%	31–75%

Tab. 4 Anteil an nicht kubischen Komponenten, bestimmt gemäss SN 670 710 d (siehe [7, 8]) in den für die Versuche eingesetzten Zuschlagmaterialien [1].

	Komponente 0–4 mm	Gemisch 0–8 mm	Gemisch 0–32 mm nach SIA
Sorte 1: TBM-Rohmaterial ungewaschen	≤ 14 Zahl%	≤ 9 Zahl%	≤ 5 Zahl%
Sorte 2: TBM-Rohmaterialien ungebrochen, nassklassiert	≤ 12 Zahl%	≤ 8 Zahl%	≤ 4 Zahl%
Sorte 3: TBM-Materialien gebrochen, nassklassiert	≤ 9 Zahl%	≤ 4 Zahl%	≤ 2 Zahl%

Tab. 5 Anteil petrographisch ungeeigneter Komponenten (mikroskopisch bestimmter Gehalt an freien Glimmerblättchen) [1].

TBM-Material schonend mit Prallmühlen und Vertikalbrechern gebrochen wird. (Der Hohlraumgehalt dagegen verändert sich nur wenig.) Nachteilig ist, dass der Anteil an der Fraktion 16–32 mm relativ klein ist. Wenn Betonzuschlag 0–32 mm mit einer Siebkurve im SIA-Bereich aus TBM-Material allein zusammengesetzt werden soll, nimmt deshalb der Nutzungsanteil stark ab. Durch das Brechen des TBM-Materials auf ein Maximalkorn von nur 26 mm kann der Anteil an erwünschten kubischen Komponenten erhöht werden. Die petrographisch ungeeigneten Schichtsilikate im TBM-Rohmaterial waren vor allem in den Sandfraktionen. In den Aufbereitungsanlagen wurde ein relativ hoher Anteil an Feinanteil ausgewaschen. Dadurch verminderte sich der Glimmergehalt stark *(Tabelle 5)*, gleichzeitig nahm auch der Mehlkorngehalt ab (12–15 Massen% in der Sandfraktion 0–4 mm); er wurde nicht durch Fremdmaterial erhöht.

Die Zementdosierung wurde auf den relativ hohen Hohlraumgehalt abgestimmt; die für das Pumpen von gebrochenem Material geltende Mindestzementmenge von 330 kg/m^3 wurde dabei beträchtlich überschritten. Die verwendeten Luftporenmittel verbesserten neben der Frostbeständigkeit auch die Verarbeitbarkeit. In *Tabelle 6* sind eine Auswahl geeigneter Betonrezepte sowie die Frisch- und Festbetonwerte für Zuschläge aus Leventinagneis zusammengestellt. Vergleichbare Resultate wurden auch mit dem Chlorit-Serizit-Gneis/Schiefer erzielt. Mit allen untersuchten Materialien konnte gut verarbeitbarer Beton hergestellt werden. Bei Verwendung von aufbereiteten Zuschlägen lag der W/Z-Wert um 0,5. Die Versu-

Literatur

[1] *Kruse, M.*, und *Weber, R.*, «Beton aus TBM-Ausbruchmaterial – Aufbereitungs- und Betonversuche im Hinblick auf AlpTransit Gotthard», Die Schweizer Baustoff-Industrie **1995** [8], 26–30 bzw. Schweizer Ingenieur und Architekt **1995** [47], 1082–1086 (1995).

[2] *Zbinden, P.*, und *Hitz, A.*, «Die Materialbewirtschaftung beim Projekt AlpTransit Gotthard», Schweizer Ingenieur und Architekt **1995** [47], 1080–1081 (1995).

[3] Norm SIA 162/1: «Betonbauten – Materialprüfung», Ausgabe 1989.

[4] Norm SIA 162: «Betonbauten», Ausgabe 1989 (rev. 1993).

[5] *Olbrecht, H.P.*, und *Studer, W.*, «Kiessubstitution durch Tunnelausbruchmaterial», Die Schweizer Baustoff-Industrie **1995** [8], 32–35.

[6] *Olbrecht, H.P.*, und *Studer, W.*, «Beton aus TBM-Chips», Schweizer Ingenieur und Architekt **1995** [47], 1087–1090 (1995).

[7] Norm SN 670 710 d: «Sand, Kies, Splitt und Schotter für Beläge – Qualitätsvorschriften», Ausgabe Oktober 1988.

[8] *van Egmond, B.*, und *Hermann, K.*, «Zuschlagstoffe», Cementbulletin **64** [7/8], 3–11 (1996).

[9] *Thalmann, C.*, «Optimale Wiederverwertung von TBM-Ausbruchmaterial», Schweizer Ingenieur und Architekt **1995** [47], 1091–1096 (1995).

[10] *Thalmann, C.*, «Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem konventionellen und maschinellen Tunnelvortrieb zu Kiesersatzprodukten – eine Herausforderung an die Kieswerke», Die Schweizer Baustoff-Industrie **1994** [6], 24–32.

Zuschläge		Sorte 1:	Sorte 2:		Sorte 3:	
		TBM-Material roh	TBM-Material ungebrochen, nassklassiert		TBM-Material gebrochen, nassklassiert	
Siebkurve (vergl. *Abb. 2)*		unsortiert, Quelle [6]	TBM-angenähert	gemäss SIA-Bereich	TBM-angenähert	gemäss SIA-Bereich
Rohdichte trocken	kg/m³	1609–1713	1696–1757	1636–1753	1768–1817	1600–1784
Hohlraumgehalt trocken	Vol.%	36–39	37–43	33–40	33–44	33–41
Mischung		*A*	*B*	*C*	*D*	*E*
Zuschlag trocken	kg/m³	1680	1750	1800	1780	1800
Zement (CEM I)	kg/m³	380	330	350	330	330
Hochleistungsverflüssiger	Massen% von CEM I	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Luftporenbildner	Massen% von CEM I	0,20	0,15	0,15	0,20	0,15
W/Z-Wert	–	0,63	0,54	0.50	0,55	0,50
Frischbetonwerte						
Verdichtungsmass	–	1,08	1,11	1,12	1,15	1,13
Ausbreitmass	mm	–	320	360	390	430
Festbetonwerte						
Druckfestigkeit nach 28 Tagen	N/mm²	30,5	50,1	54,6	45,3	51,1
Elastizitätsmodul nach 28 Tagen	N/mm²	–	23 200	23 600	23 400	24 600
Gesamtporosität	Vol.%	–	15,9	14,3	15,8	13,0
Anteil Luftporen n – U_E	Vol.%	–	2,0	1,6	2,0	1,8
Wasserleitfähigkeit	g/m²h	19	12	10	15	8
Frostbeständigkeit	–	ca. 1,6 hoch	1,4 mittel	1,4 mittel	1,5 hoch	1,6 hoch
Frosttausalzbeständigkeit Δm_{30}	g/m_2	≤ 4400 mittel-tief	100 hoch	60 hoch	400 hoch	30 hoch
Schwinden nach 91 Tagen	‰	–	–	–	0,39	–

Tab. 6 Ausgewählte Betonmischungen mit zugehörigen Frisch- und Festbetoneigenschaften gemäss Norm SIA 162/1 [1].

che mit aufbereitetem Material (Mischungen B bis E, *Tabelle 6)* lassen den Schluss zu, dass Betone der Festigkeitsklassen B 40/30 bis B 45/35 hergestellt werden können, die niedrige Wasserleitfähigkeiten (q_w < 12 g/m²h gilt als wasserdicht) sowie mittlere bis hohe Frost- und Frosttausalzbeständigkeiten aufweisen. Wie bereits bei anderen Untersuchungen wurden E-Moduln gemessen, die etwa 40 % niedriger als diejenigen von vergleichbarem weichplastischem Beton mit alluvialen Zuschlagstoffen aus dem Mittelland waren.

Erfreuliche Aussichten

Die hier besprochenen Untersuchungen zeigen, dass mit TBM-Material Beton hergestellt werden kann, der verschiedenen Anforderungen genügt. Je höher diese sind, desto grösser wird der Aufwand bei der Aufarbeitung des Ausbruchmaterials oder bei den betontechnologischen Massnahmen. Die Tatsache, dass allein durch das Abtrennen von Material mit einem Korndurchmesser > 32 mm Zuschlagmaterial aufbereitet werden kann, mit dem gut verarbeitbarer Baustellenbeton der Festigkeitsklasse B 30/20 produziert werden kann, eröffnet erfreuliche Perspektiven: TBM-Material darf grundsätzlich als geeignet zur Substitution von Alluvialkies betrachtet werden. *Bram van Egmond* und *Kurt Hermann, TFB*