Zeitschrift: Cementbulletin

Herausgeber: Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB AG)

Band: 64 (1996)

Heft: 9

Artikel: Zuschlagstoffe aus TBM-Material

Autor: Hermann, Kurt / Egmond, Bram von

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-153818

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: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://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 Schüttund Auffüllmaterial vorzuziehen. In
 einer Zeit, in der die abbaubaren



TBM-Material aus dem Polmengostollen.

Foto: Empa, Dübendor



Kiessand aus dem Schweizer Mittelland.

Foto: Empa, Dübendorf

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

kann TBM-Material ein wichtiges Kiessandersatzmaterial werden. Voraussetzung dafür ist, dass seine Eignung als Zuschlagmaterial überzeugend nachgewiesen wird.

Reserven an Alluvialkies in der Schweiz immer knapper werden,

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 (Dun-

kelglimmer) und Muskowit (Hell-glimmer).

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

Foto: Empa, Dübendorf

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].

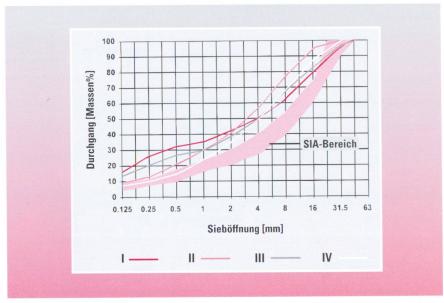


Abb. 1 Korngrössenverteilung der TBM-Materialien I bis IV (siehe Text) [5].

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.

	Bezeichnung	Herkunft	Hohlraum- gehalt Vol.%	Anteil nicht kubischer Körner (Fraktion 8–16 mm) Zahl%
1	Leventinagneis	Sondierstollen Polmengo Tunnelmeter: 387390 m	36,6	74
II	Toniger Kalkschiefer	Raum Kandertal	42,1	76
Ш	Biotitgneis aus der Lucomagno-Zone, schiefrig, leicht porphyrisch	Sondierstollen Polmengo Tunnelmeter: 4600	37,2	77
IV	Schwarzer Dachschiefer	Sondierstollen Frutigen Abschnitt 1001500 m	42,3	65

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

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 Zementund Zusatzmitteldosierungen (Ta-

Material		Versuch					
		 Leventinagneis	 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			201/04/11/05		The second		
Druckfestigkeit f _c , Alter 28 Tage	N/mm ²	30,5	34,4	37,1	23,9		
E-Modul, Alter 28 Tage	N/mm²	13 500	19700	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		1,51,7	0,51,1	1,11,2	1,21,5		
Beurteilung		hoch	tief mittel	mittel	mittelhoch		
Frosttausalzverhalten ∆m ₃₀	g/m ²	7004400	14 500	8400	9100 ²⁾		
Beurteilung		mitteltief	tief	tief	tief		

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 rund50 % der Werte, die mit Zuschlag

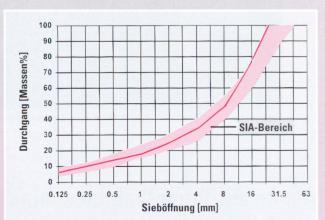
- aus dem schweizerischen Mittelland bei gleicher Festigkeit erreicht werden.
- Teilweise waren die Schwindverformungen erheblich grösser als bei «normalem» Beton (Ursachen: niedrigere E-Moduln und grössere Zementsteinanteile).
- Die Wirkung der Luftporenmittel war stark von der Zuschlagart abhängig.

Betone aus TBM-Material

Aaregranit



Leventinagneis



Siebkurve des eingesetzten TBM-Materials

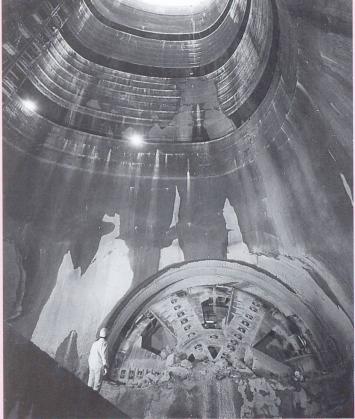
Zementgehalt	320 kg/m ³
HBV	1,0 Massen% von CEM I
LP	0,04 Massen% von CEM I
W/Z-Wert	0,50
Luftporengehalt	6,0 Vol.%
Verdichtungsmass	1,13
Ausbreitmass	400 mm
Entmischungsmass	2,06
Druckfestigkeit	47 N/mm ²

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.

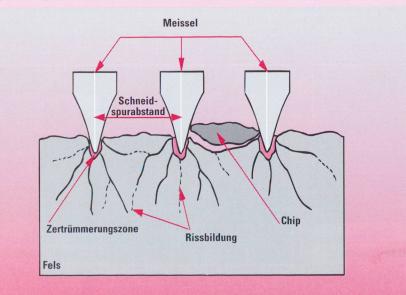
Im Kontaktbereich mit dem Werkzeug wird der Fels «pulverisiert», zudem entstehen radial verlaufende Risse in der Oberfläche (siehe *Schema* unten). Wenn sich die Risse von zwei benachbarten Schneidspuren verbinden, splittern grössere Gesteinsstücke ab; es bilden sich die sogenannten «TBM-Chips». Weitere 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

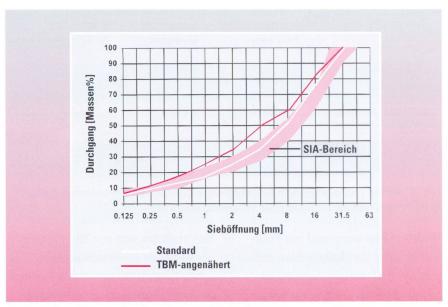


Abb. 2 Siebkurven der Zuschlagstoffe für Betonierversuche mit «veredeltem» TBM-Material (modifiziert, nach [1]).

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

	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 670710 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 Zah1 %	≤ 5 Zahl%
Sorte 2: TBM-Rohmaterialien ungebrochen, nassklassiert	≤ 12 Zahl %	≤ 8 ZahI%	≤ 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 Prall-mühlen 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/m³ 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 670710 d: «Sand, Kies, Splitt und Schotter für Beläge – Qualitätsvorschriften», Ausgabe Oktober 1988.
- [8] van Egmond, B., und Hermann, K., «Zu-schlagstoffe», 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:		
Siebkurve (vergl. <i>Abb. 2)</i>		TBM-Material roh unsortiert, Quelle [6]	TBM-Material ungebrochen, nassklassiert		TBM-Material gebrochen, nassklassiert	
			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	В	С	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/mm ²	-	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 (qw < 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