
SPRITZBETON MIT AUFBEREITETEM BÜNDNER SCHIEFER IM BAUPROJEKT BRENNER BASISTUNNEL

SHOTCRETE WITH RECYCLED BÜNDNER SCHIST AT BRENNER BASE TUNNEL

Roland **Murr**, Matthias **Hofmann**, Tobias **Cordes**, Konrad **Bergmeister**
Brenner Basistunnel BBT SE, Innsbruck, Österreich

Im Baulos E52, Wolf II, wurde die Aufbereitung von Tunnelausbruch für die Herstellung von Spritzbeton umgesetzt. In dem Beitrag wird von Beginn der Aufbereitungskonzeption, der Rezepturfindung, über Beschleunigerversuche, Ausführung und Bewertung der Spritzbetonqualität mit Integration der Bauteilprüfung aufgeführt, wie in Zusammenspiel mit Planer, Bauausführenden, Geotechnik, Bauüberwachung und Bauherrn eine optimierte Lösung für eine Verwendung von aufbereiteten Tunnelausbruch zur Spritzbetonherstellung umgesetzt wurde. Erweitert werden diese Überlegungen mit der Betrachtung des Einflusses des aufbereiteten Materials und des Spritzbetons auf das Deponievolumen.

In the construction lot E52, Wolf II, the preparation of tunnel excavations for the production of shotcrete was implemented. From the beginning of the preparation concept, the determination of the recipe, accelerator tests, execution and evaluation of the shotcrete quality with integration of in-situ testing, the article describes how an optimized solution for the use of recycled tunnel excavation for shotcrete production was implemented in cooperation with the planner, building contractor, geotechnics, construction supervision and client. These aspects are expanded by examining the influence of the recycled material and the sprayed concrete on the volume of the deposit.

1. Baulos Wolf II

Der Brenner Basistunnel ist als Kernstück ein wesentlicher Teil der transeuropäischen Nord-Südverbindung zwischen Helsinki und Valletta (Malta). Die Errichtung des Nord-Südkorridors ist Teil des TEN – Strategieplans zur Bewältigung des steigenden Waren- und Personenverkehrs. Mit dem Strategieplan wird der Ausbau der schienengebundenen Infrastruktur prioritär verfolgt, der Brenner Basistunnel unterliegt auf Grund der Wichtigkeit der höchsten Förderung durch die Europäische Union.

Das Baulos Wolf II ist Teil des Brenner Basistunnels und umfasst im Wesentlichen folgende bauliche Maßnahmen:

- 4.000 m Zufahrtstunnel, Ausbruchfläche 120m², über den die zentrale Baustellenlogistik für das anschließende Hauptbaulos sichergestellt werden muss
- Anbindekaverne, Abzweigekaverne, Lüfterkaverne, Ausbruchflächen 230-350m²
- 950 m Schutterstollen, Ausbruchfläche ca. 60m²
- 180 m Querverbindungstunnel vom Zufahrtstunnel zum Erkundungsstollen
- 1.140 m Umleitungsstollen für Padasterbach, Ausbruchfläche 26m²
- 360 m Umleitungsstollen für Padasterbach in offener Bauweise

- 145 m Querdrainagestollen, Ausbruchsfläche 10 m²
- 700 m Innenschale Padastertunnel
- 1.000 m Innenschale Saxenertunnel, Anschluss zur Autobahn A13
- Wasserbauwerke (Geschiebesperren, Einlaufbauwerke, Fischteiche etc.) im Padastertal
- Deponiebau der Deponie Padastertal

Alle Tunnel dieses Loses in geschlossener Bauweise wurden zyklisch aufgeföhren. Die Auftragssumme des Bauloses betrug ca. 104 Mio. Euro, der Baubeginn fand am 4. Dezember 2013 statt.

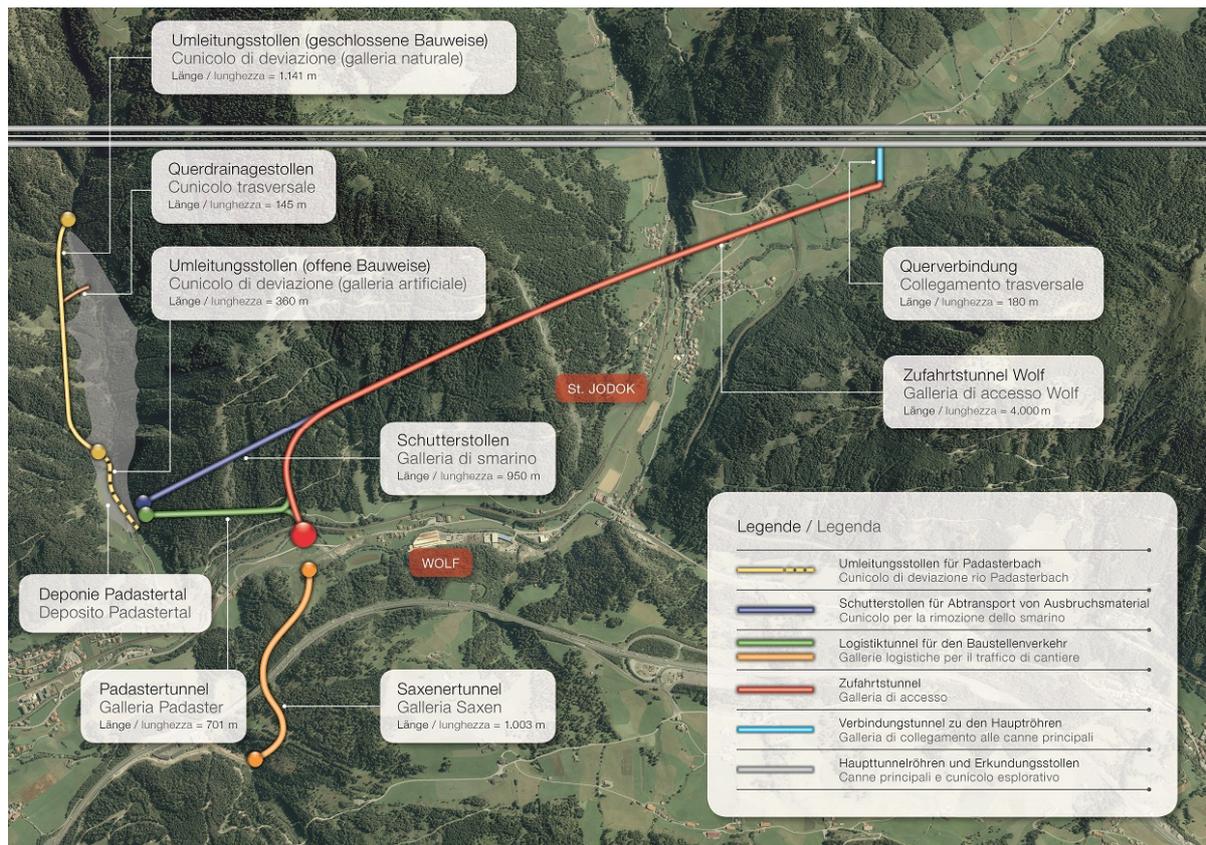


Bild 1: Baulos Wolf II, E52 (Bild: BBT SE)

2. Aufbereitung von Tunnelausbruch für die Betonherstellung

Auf Grund des Ziels des Abfallwirtschaftsgesetzes (AWG) [8] der „Verwertung von Abfall“ (siehe AWG §1 bzw. §8 (3)) wurden von der Brenner Basistunnel BBT SE Studien unter Einbeziehung der Universität für Bodenkultur Wien und externer Experten die Hauptlithologien des österreichischen Projektgebiets (Innsbrucker Quarzphyllit und Bündner Schiefer) auf die Möglichkeit einer Aufbereitung für Gesteinskörnung für Beton und Filtermaterial durchgeführt. Da eine Verwendung von Bündner Schiefer für Beton zum Ausführungszeitpunkt in keinem Gewinnungsbetrieb in Österreich erfolgte, war dessen Eignung als Gesteinskörnung unklar. Untersuchungen für den Bündner Schiefer (siehe z.B. [1]) haben ergeben, dass durch Brechen, Sieben und Waschen aufbereiteter Bündner Schiefer als Gesteinskörnung für Spritzbetone als auch konstruktive Betone geeignet ist. Im Gegensatz dazu konnte die Eignung des Innsbrucker Quarzphyllits, der im nördlichen Projektgebiet ansteht, als Gesteinskörnung für höherwertige konstruktive Betone nicht nachgewiesen werden.

Im Zuge der Bauausführung des Bauloses Wolf II erfolgten innovative Schritte zur Optimierung der Materiallogistik und es konnten wertvolle Erfahrungen für den Einsatz von aufbereitetem Tunnelausbruchmaterial als Gesteinskörnung für die Betonproduktion gewonnen werden. Hauptsächlich wurde Spritzbeton (knapp 100.000 m³) mit aufbereitetem Material hergestellt.

Eine Aufbereitung und Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial brachte für das Projekt folgende positive Aspekte:

- Einsatz des aufbereiteten Tunnelausbruchmaterials und somit Kostenreduktion bei den extern anzukaufenden Inertstoffen
- Reduktion des Deponievolumens und der Transportwege
- Erfüllung der AWG Forderung, dass Ausbruchmaterial recycelt werden soll
- Verbesserung der Ökobilanz (z.B. CO₂, SO₂, nicht-erneuerbare Energie und mineralische Ressourcen entsprechend [2])

3. Geologie und Aufbereitungskonzept

In Bezug auf Aufbereitung und Herstellung der Fraktionen musste ein optimales, baustellen-taugliches Konzept gefunden werden.

Der Zugangstunnel Wolf Süd liegt zur Gänze im Glockner Deckenkomplex, welcher am Westrand des Tauernfensters die Obere Schieferhülle aufbaut. Die Gesteine gehören zu den Mittleren und Unteren Bündnerschiefern. Der vordere, längere Abschnitt (von Tm 200-3150) liegt in den Mittleren Bündnerschiefern und der hintere, kürzere Abschnitt (Tm 3150-3373) in den Unteren Bündnerschiefern. Die Mittleren Bündnerschiefer bestehen vorwiegend aus kalkreichen Bündnerschiefern („Kalkschiefer“) mit kalkarmen Einschaltungen („Kalkphyllit“). Die Unteren Bündnerschiefer bestehen zum überwiegenden Teil aus graphitischen Kalkphylliten mit Einschaltungen von Schwarzphylliten und teilweise auch Kalkschiefern. Alle drei genannten Haupt-Gesteinsarten (Kalkschiefer-Kalkphyllit-Schwarzphyllit) treten selten isoliert in reiner Form auf, sondern liegen als verschuppt-verfaltete Wechselfolgen vor, wobei meist eine Gesteinsart dominiert. Im Folgenden werden die Gesteine (Hauptgesteinsarten) näher beschrieben:

- **Kalkschiefer**

Die Kalkschiefer und Kalkglimmerschiefer zeigen einen deutlichen Lagenbau mit grobkörnigen Lagen aus Kalzit, Quarz, Muskovit-Serizit, wenig Chlorit und Graphit. Die feinkörnigen, deutlich geschieferten Lagen bestehen hauptsächlich aus Muskovit-Serizit, wenig Quarz, Kalzit, Graphit. Häufig treten weiße Kalzitadern und -knauern mit lokalen Quarzgehalten auf. Die Kalkschiefer lösen meist dünnplattig bis plattig, selten auch dünnbankig und sind gegenüber den Kalkphylliten und graphitreichen Kalkphylliten bzw. Schwarzphylliten "sprödfester" und weniger stark verfältelt. Sie weisen einachsiale Druckfestigkeiten von 50-100 MPa auf. Hellgrau-grau, nicht wasserempfindlich.

- **Kalkphyllit**

Meist dunkelgraue, schiefrig-dünnplattig lösende Gesteine mit einachsialen Druckfestigkeiten von 25-50 MPa. Das Gestein besteht hauptsächlich aus Serizit neben Chlorit, Quarz und Kalzit. Typisch ist auch ein teilweise hoher Graphitanteil und eine Pyritführung. Die phyllitischen Lagen sind meist intensiv verfältelt. Häufig treten weiße Kalzitadern und -knauern mit lokalen Quarzgehalten auf.

- Schwarzphyllit bzw. graphitischer Kalkphyllit

Dunkelgraue bis schwarze feinlamierte Phyllite mit erhöhten Graphit- und Pyritanteilen. Gering kalkhaltig. Echte Schwarzphyllite treten nur untergeordnet auf, meist handelt es sich um graphitreiche bzw. graphitische Kalkphyllite. Die Schwarzphyllite lösen schiefbrig und sind verfältelt. Daneben treten weiße Kalzitadern und -knauern mit lokalen Quarzgehalten auf. Sie weisen einachsiale Druckfestigkeiten von <25 bis -<50 MPa auf und haben damit niedrigere Druckfestigkeiten als der Kalkphyllit.

- Störungsgesteine

Je nach Zerschierungsgrad treten feinkörnige, schluffig-tonige Typen (Fault gouge), d.h. vollkommen zerscherte-zerriebene Gesteine und geschieferte (Proto)Kataklasite auf. Bei den Kataklasiten ist das Primärgefüge (Schieferung) noch reliktsch erhalten, das zerrüttete Gestein aber nur mürbfest bis entfestigt. Protokataklasit zeigt einen vergleichsweise geringeren Zerschierungsgrad mit meist typischen Sigmoidal-Scherbahnen, Fault gouge Material trat bislang nur in wenigen cm starken Scherbändern auf.

Der Bündner Schiefer ist aus aufbereitungstechnischer Sicht vor allem durch seine gute Spaltbarkeit entlang der Scherflächen und plattiges Auftreten gekennzeichnet. Um geeignete Gesteinskörnungen für die Betonproduktion herzustellen, wurden daher die einzelnen Brechstufen vor allem so gewählt, dass die erforderliche Kornform erreicht wurde.

Zu diesem Zweck und zur Gewinnung von Fraktionen für die Rezepturfindung dienten zwei Aufbereitungsversuche im Dezember 2013 und März 2014 mit folgender Anlagenkonstellation (siehe [1]):

- Versuchsserie 1: Backenbrecher – Prallmühle
- Versuchsserie 2: Backenbrecher – Prallmühle – Vertikalmühle

Die Versuchsserie 1 zeigte, dass eine Produktion von Gesteinskörnungen aus Bündnerschiefer grundsätzlich möglich ist, jedoch die Einhaltung der erforderlichen Kornform nur schwer erreicht werden kann. Man entschied sich daher für den zusätzlichen Einsatz einer dritten Brechstufe in Form einer Vertikalmühle. Vertikalmühlen dienen hauptsächlich dazu, eine möglichst kubische Kornform und in weiterer Folge einen möglichst geringen LA-Wert zu erreichen.

Mit Erkenntnissen aus den Versuchen wurde im März 2014 begonnen, die Anlage in Wolf zu planen, die folgenden Voraussetzungen entsprechen sollte (siehe auch [3]):

- geringer Platzbedarf
- schnelle Verfügbarkeit
- flexible Anlagenkonstellation
- geringe Aufbereitungsverluste
- vertretbare Investitionskosten

3.1 Geringer Platzbedarf

Die komplette Planung und Umsetzung erfolgte parallel zum laufenden Vortrieb. Der zur Verfügung stehende Platz im Padastertal war zu gering, um alle drei Brechstufen auf der BE-Fläche Padastertal zu installieren (siehe Bild 2). Daher wurde die Vorabsiebung in der Lüfterkaverne aufgebaut. Ein weiterer Aspekt war die ganzjährige Verfügbarkeit und der von der Umwelt weitgehend unabhängige durchführbare Betrieb der Vorabsiebung untertage.

3.2 Schnelle Verfügbarkeit

Vom Beschluss zur Umsetzung bis zur vollen Inbetriebnahme lag ein Zeitraum von lediglich viereinhalb Monaten. Im Vergleich dazu sind bei Gewinnungsbetrieben Zeiträume von zwei Jahren üblich.

3.3 Flexible Anlagenkonstellation

Die Anlagenkonstellation wurde so gewählt, dass auch eine etwaige im Baubetrieb notwendige örtliche Verlegung möglich gewesen wäre. Die Wahl eines mobilen Zwischensiebes nach der 2. Brechstufe wurde getroffen, um in Stillstandzeiten der Nassaufbereitung (z.B. im Hochwinter) und somit Ausfall der Produktion von Gesteinskörnungen für Beton eine Produktion von Baustoffen für den Deponiebau (z.B. Filterkies) zu ermöglichen.

Ein maßgebender Faktor für die Planung der Aufbereitung des Tunnelausbruchs war die Umstellung der Aufbereitungsanlage. Abhängig von den Bauphasen mussten große Mengen an Sand für Spritzbeton, grobe Körnungen für Innenschalenbeton und größere für Filterschichten der Deponie produziert werden. Das Aufbereitungskonzept berücksichtigte folglich eine schnelle Umstellung der Brechstufen um mit einem kurzfristigen Rückbrechen von Überschusskörnungen auf Änderungen des Bedarfes reagieren zu können.

3.4 Geringe Aufbereitungsverluste

Die Wahl des Trennschnittes der Vorabsiebung ist ein Kompromiss zwischen einem möglichst hohen Anteil an Materialwiederverwertung einerseits und dem Ausscheiden der weniger oder nicht geeigneten Anteile wie Glimmer- und Graphitreiche Lagen andererseits. Dabei erwies sich der Trennschnitt bei 32 mm als vorteilhaft. Ein ähnliches Verhalten zeigte sich bei der Erzielung der geeigneten Kornform, da durch mehrmaliges Brechen zwar die Kornform verbessert, aber höhere Aufbereitungsverluste erzeugt wurden. Das Erreichen einer ausreichenden Kornform bei möglichst geringem Anteil an Abschlämmbaren wurde im Betrieb durch eine regelmäßige Anpassung der Drehzahl der Prallmühle und Vertikalmühle erreicht.

3.5 Vertretbare Investitionskosten

Die geplante kurze Einsatzdauer erforderte geringe Investitionskosten. Es wurden sowohl gebrauchte Geräte aufgrund einer schnelleren Verfügbarkeit als auch im Falle der Nassaufbereitung neue Geräte zur Gewährleistung einer hohen Qualität angeschafft. Durch eine Produktion im Voraus konnte ein Stillstand der Nassaufbereitung im Hochwinter vorgesehen werden. Ansonsten wären wesentlich höhere Investitionen in Form einer winterfesten Einhausung notwendig gewesen.

Folgendes Anlagenschema wurde vorgesehen:

- Backenbrecher
- Vorabsiebung bei 32 mm
- Prallmühle
- Zwischensiebung (für eine mögliche Produktion von Filterkies 16/32)
- Vertikalmühle
- Nasssiebung 0/4, 4/8, 8/22 mm
- Nachwaschen Sand 0/4 mm im Schöpfrad

3.6 Bauablauf

Von der Ortsbrust wurde das Tunnelausbruchsmaterial zur Grobaufbereitung in die Lüfterkaverne transportiert, mittels Backenbrecher zerkleinert und bei 32 mm vorabgesiebt. Der weitere Brechvorgang erfolgte in der Aufbereitung im Padastertal mittels Prallmühle und Vertikalmühle zur Herstellung der groben und feinen Fraktionen verbunden mit einer Verbesserung der Kornform und des LA-Wertes.

Für die Spritzbetonproduktion mit einem Sandanteil von ca. 70% wurden die Überschusskörnungen sowohl in der Prallmühle als auch in der Vertikalmühle rückgebrochen.



Bild 2: Überblick über die Materialaufbereitung im Padastertal

4. Rezepturfindung

Für die Herstellung der Spritzbetonschale kam im Zufahrtstunnel Wolf ein Spritzbeton der Sorte SpC25/30(120)/II/J2/XC4/GK8 zum Einsatz, der auf der Baustellenmischanlage Wolf gemischt wurde. Die Betonfestigkeitsklasse wurde auf Grund von Optimierungen auf Basis der angetroffenen Geologie und den gemessenen Verformungen festgelegt. Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit wurde großer Wert auf eine hohe Gefügedichte gelegt, die verstärkt durch die Prüfung der Wassereindringtiefe an Bohrkernen aus Spritzkisten und dem Bauwerk kontrolliert wurde.

Die Ausarbeitung der Rezeptur erfolgte in zwei parallel laufenden Schritten:

- Bindemittelleim- und Mörtelversuche mit unterschiedlichen Erstarrungsbeschleuniger (EB) ohne Bezug auf den Bündner Schiefer
- Betonzusammensetzung, Frischbeton- und Spritzversuche mit aufbereitetem Bündner Schiefer und den Bindemittelkombinationen der Bindemittelleim- und Mörtelversuche

4.1 Bindemittelleim- und Mörtelversuche

Für eine optimierte Wahl des Erstarrungsbeschleunigers und zur Verbesserung der Abstimmung zwischen Erstarrungsbeschleuniger und Bindemittelkombination wurden im Labor Versuche zur Bestimmung der Erstarrungszeiten, Druckfestigkeitsentwicklung im jungen Alter (3h bis 24h) und Festigkeitsabfall im Alter von 7 Tagen im Vergleich zum nicht beschleunigten Mörtel durchgeführt. Die Versuche wurden entsprechend der Richtlinie Spritzbeton [4] durchgeführt, deren Ergebnisse in den Bildern 3 bis 5 angeführt sind.

Bei der Ermittlung der Erstarrungsbeschleunigung mit einem Bindemittel CEM I 52,5 N konnte festgestellt werden, dass bei den verschiedenen Produkten die geforderte Erstarrungsbeschleunigung mit deutlich unterschiedlichen Dosierhöhen erreicht wurde. Bei der Versuchsdurchführung führte das Einmischen mancher Erstarrungsbeschleuniger-Bindemittelkombinationen auf Grund der hohen Reaktivität sehr schnell zu einer Klumpenbildung und zu Inhomogenitäten im beschleunigten Bindemittelleim. Es zeigte sich auch, dass Erstarrungsbeschleunigerprodukte, die hohe Frühfestigkeiten innerhalb des jungen Alters (bis 24h geprüft) ermöglichten, einen höheren Festigkeitsverlust im Vergleich zum nicht beschleunigten Nullmörtel aufwiesen.

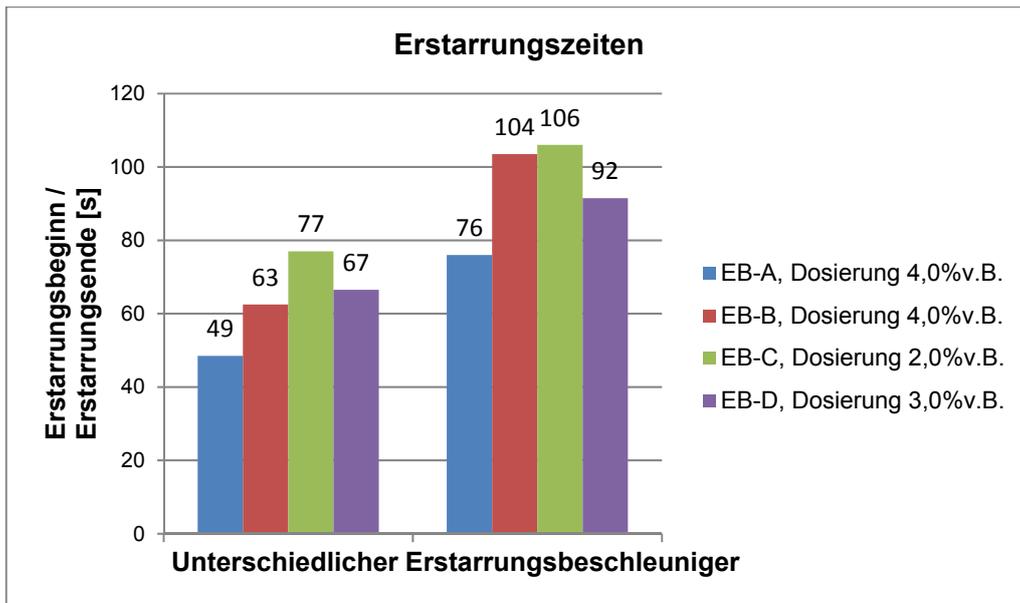


Bild 3: Ermittlung der Erstarrungsbeschleunigung vom Bindemittelleim mit unterschiedlichen Erstarrungsbeschleuniger Produkten

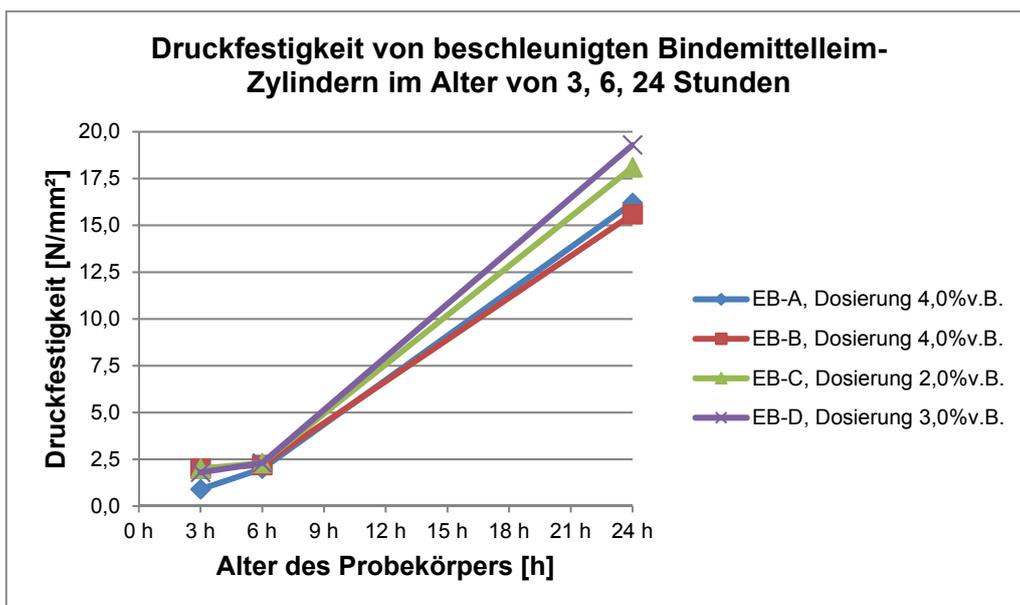


Bild 4: Ermittlung der Druckfestigkeitsentwicklung von beschleunigten Bindemittelleim-Zylindern mit unterschiedlichen Erstarrungsbeschleuniger Produkten

Darauf aufbauend wurde in der Anwendung eine Bindemittelkombination aus einem CEM I 52,5 N und einem CEM II/A-M 42,5 N im Verhältnis 50% zu 50% und der Zugabe eines hydraulisch reaktiven Zusatzstoffs Typus II (AHWZ) gewählt, wodurch die Klumpenbildung und das Auftreten von Inhomogenitäten deutlich verringert werden konnte. Der am Mörtelprisma im Alter von 7 Tagen ermittelte Festigkeitsabfall betrug je nach Produkt zwischen 8% und 22% gegenüber dem nicht beschleunigten Nullmörtel, siehe Bild 5.

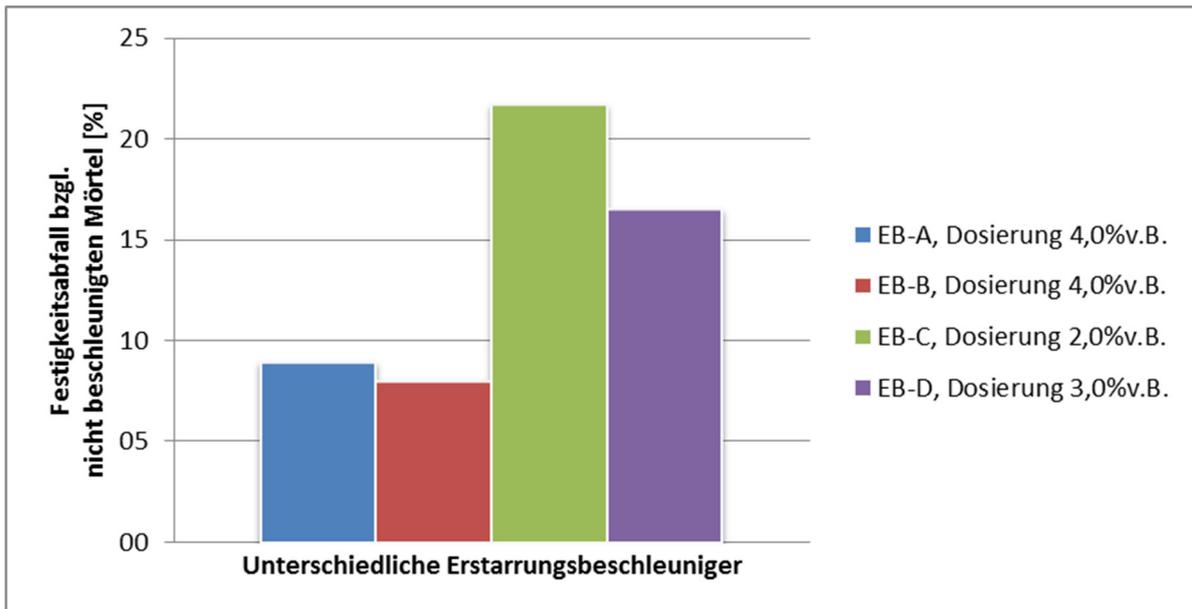


Bild 5: Ermittlung des Festigkeitsabfalls von beschleunigten Mörtelprismen (neue Bindemittelkombination) mit unterschiedlichen Erstarrungsbeschleunigern Produkten im Alter von 7 Tagen

4.2 Betonzusammensetzung, Frischbeton- und Spritzversuche

Ausgehend von einer „Standard“-Spritzbetonrezeptur mit 420 kg/m^3 Bindemittel wurde, zufolge des höheren Wasserbedarfs und des Einflusses der Schichtsilikate, der Bindemittelgehalt angehoben. Gleichzeitig mussten für die Einfuhr von Feinluft in den Frischbeton und zur Verbesserung der Konsistenzhaltung neue Zusatzmittel eingesetzt werden. Der im Bündner Schiefer vorhandene Graphitanteil war zwar absolut gesehen sehr gering – Überprüfungen des gebrochenen Rohmaterials ergaben Graphitanteile zwischen 0,4% und 0,5% - aber verringerte die Bereitschaft des Luftporenbildners, im Frischbeton Feinluft auszubilden. Die Feinluft wurde für eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit, Reduktion der Klebrigkeit und Erhöhung der Betonstabilität gezielt eingesetzt.

Bei Spritzversuchen zeigte sich das aus früheren Zeiten bekannte Phänomen deutlich, dass bei EB-Dosierungen, die ein Erreichen der J2 Kurve im sehr jungen Alter (ca. 3 bis 6 Stunden) sicher stellten, im weiteren Verlauf ein Festigkeitsdefizit gegenüber Produkten mit geringer Frühfestigkeitsleistung hervorriefen. Dieses Phänomen ließ sich mit unterschiedlichen Produkten und unterschiedlichen Dosierungen in gewisser Weise steuern, konnte aber nicht gänzlich eliminiert werden. Es zeigte sich auch, dass bei der eingesetzten Bindemittelkombination unterschiedliche EB-Produkte unterschiedlich sensibel bei EB-Dosierungsänderungen reagierten; d.h. bei manchen Produkten zeigte eine geringe Änderung der Dosierung eine deutliche Wirkung – hauptsächlich bei EB Produkte mit starker Festigkeitsentwicklung im jüngsten Alter – manche Produkte verhielten sich eher gutmütig.

Diese Beobachtungen und die Ergebnisse der Bindemittelleim- und Mörtelversuche führten zu einer optimierten Betonrezeptur, die den Anforderungen des Vortriebs und der Baustelle weitgehend entsprach:

Tab. 1: Betonrezeptur des ausgeführten Spritzbetons (gemäß [5])

Bindemittel	
CEM I 52,5 R	210 kg/m ³
CEM II/A-M (S-L) 42,5 N	210 kg/m ³
Zusatzstoff Typ II (AHWZ)	50 kg/m ³
Gesteinskörnung aus 100% aufbereitetem Tunnelausbruch	
Fraktion 0/4 (70%)	1119 kg/m ³
Fraktion 4/8 (30%)	488 kg/m ³
Wasser	
Wasser (anrechenbar)	220 kg/m ³
Zusatzmittel	
Prement H 100 U	1,0 % v.Z.
Prement H 1000	0,11 % v.Z.
Premair LP K 800	0,47 % v.Z.

5. Vortriebsbegleitende Versuche

Zur Ausführung kam im Zeitraum Dezember 2014 bis April 2016 der Spritzbeton SpC25/30(120)/II/J2/XC4/GK8 mit einer verdichteten Überprüfung zur Sicherstellung der Gleichmäßigkeit der Einbauqualität. Die Rezeptur des ausgeführten Spritzbetons ist in Tabelle 1 aufgelistet (s.a. [5]). Die Bewertung der eingebauten Spritzbetonqualität wurde unter Verwendung der vorliegenden Prüfunterlagen durchgeführt:

- Rezepturprüfung vom 18.12.2014
- Konformitätsprüfungen im Zeitraum zwischen Dezember 2014 und April 2016
- Identitätsprüfungen im Zeitraum zwischen Dezember 2014 und April 2016
- Bauteilprüfungen (Bohrkernentnahmen)
- Zusätzliche Prüfungen (E-Modulprüfung, Frostwiderstandsprüfung XF3)

5.1 Konformitätsprüfungen

Die Rezeptur zeigte einen erhöhten Wasseranspruch durch die aufbereitete Sandfraktion 0/4 mm. Die Auswertung von knapp 200 Konformitätsprüfungen ergab bei der Spritzbetonqualität ein zufriedenstellendes, sehr homogenes Ergebnis mit leichten Schwankungen im Luftgehalt und einem deutlichen Abfallen der Druckfestigkeit auf 76% im Mittel vom Spritzbeton zum Nullbeton. Die Frühfestigkeitskurve J2 zeigte bei einzelnen Proben eine geringfügige Unterschreitung im Alter von ca. 3-9 h. Eine höhere EB-Dosierung führt hierbei zu einer Reduzierung der Festigkeitsentwicklung im Alter >28 d.

Die Auswertung der Spritzbetonversuch nach ÖVBB Richtlinie Spritzbeton [4] und ÖNORM EN 13791 entsprechend Tabelle 2 führte zu einer Bestätigung der geforderten Druckfestigkeit:

Tab. 2: Auswertung der Versuche gemäß ÖNORM EN 13791 (gemäß [5])

	gefordert	erreicht
SpC25/30 Mindeste charakteristische Bohrkerndruckfestigkeit ($L/D=1/1$) $f_{ck, is}$	26 MPa	-
Aus dem Mittelwertkriterium Geschätzte charakteristische Druckfestigkeit $f_{ck, is}$	-	26,8 MPa
Aus dem Einzelwertkriterium Geschätzte charakteristische Druckfestigkeit $f_{ck, is}$ (ermittelt)	-	29,5 MPa

5.2 Identitätsprüfungen mit Integration der Bauteilprüfung

Die Auswertung der ID Prüfung bestätigte ebenfalls die Anforderungen mit einer geringfügig höheren Druckfestigkeit. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden in Summe 35 Bohrkern aus dem Bauwerk entnommen und zusätzlich beprobt. Hiervon wurden 4 Bohrkern, die nicht intakt waren, von der Prüfung ausgeschlossen. Die Ergebnisse der Messung der Gefügedichte in Tabelle 3, der Druckfestigkeit in Tabelle 4 und der Auswertung nach ÖNORM EN 13791 in Tabelle 5 bestätigten wiederum die geforderte Spritzbetonqualität.

Tab. 3: Ergebnisse der Messungen der Gefügedichte

Anzahl der Einzelprüfergebnisse	22
Mittelwert	29,0 mm
Standardabweichung	6,9 mm

Tab. 4: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung an Bohrkernen

Anzahl der Einzelprüfergebnisse	31
Mittelwert	29,7 MPa
Standardabweichung	2,4 MPa

Tab. 5: Auswertung der Bauwerksprüfung gemäß ÖNORM EN 13791

	gefordert	erreicht
SpC25/30 Mindeste charakteristische Bohrkerndruckfestigkeit ($L/D=1/1$) $f_{ck, is}$	26 MPa	-
Aus dem Mittelwertkriterium Geschätzte charakteristische Druckfestigkeit $f_{ck, is}$	-	26,2 MPa
Aus dem Einzelwertkriterium Geschätzte charakteristische Druckfestigkeit $f_{ck, is}$ (ermittelt)	-	30,0 MPa

Zusätzlich wurde die Entwicklung der Druckfestigkeit und des E-Moduls im Rahmen der ID-Prüfungen ermittelt. Das Ergebnis in Bild 6 zeigt eine Entwicklung eines verhältnismäßig niedrigen E-Moduls nach 28 Tagen. Zum Vergleich sind die zeitlichen Verläufe laut Model Code 2010 dargestellt. Diese Eigenschaft kann jedoch für die Anwendung im Tunnelbau aufgrund einer daraus resultierenden nachgiebigeren Schale grundsätzlich als vorteilhaft eingestuft werden. Die Reduktion des E-Moduls resultiert aus der Verwendung der aufbereiteten Gesteinskörnung.

In der Ausführung wurden zusätzlich am Gestein Wasserlagerungsversuche gemäß EN 14689-1 [9] und für den Spritzbeton Frost-Tauwechselfersuche (XF3) gemäß ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton für eine zusätzliche Beurteilung der Dauerhaftigkeit durchgeführt. Beide Ergebnisse führten zu positiven Prüfergebnissen, zeigten keine Auffälligkeiten oder ließen keine Rückschlüsse auf Unverträglichkeiten zu.

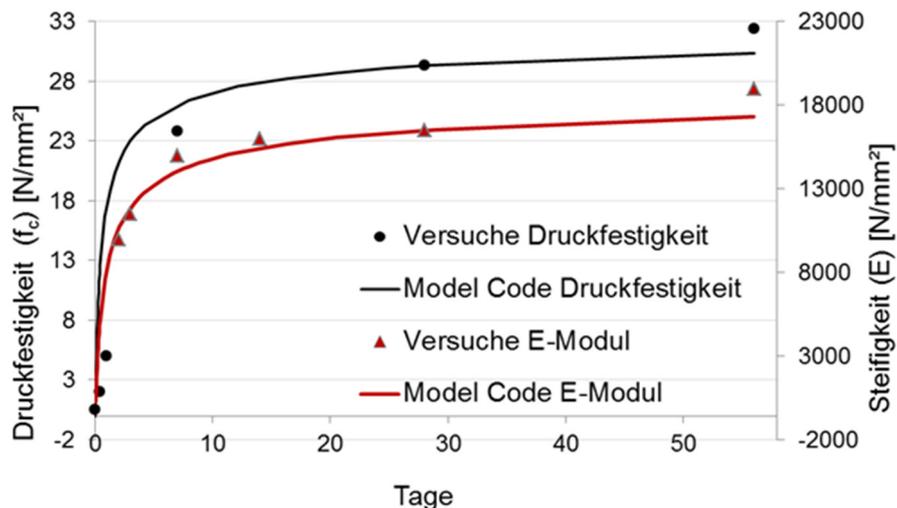


Bild 6: Entwicklung des E-Moduls und der Druckfestigkeit

6. Rezeptoptimierung

Für zukünftige Anwendungen wurde versucht, die Betonrezeptur weiter zu optimieren. Da in der Ausführung festgestellt werden musste, dass der Wasseranspruch des aufbereiteten Gesteinskörnungsmaterials trotz Anpassung der Sieblinie und optimierter Betonzusatzmittel sehr hoch war, wurde die Möglichkeit der Reduktion des Wasseranspruchs durch einen teilweisen bis gänzlichen Ersatz der aufbereiteten Gesteinskörnungsfraction 0/4 untersucht. In den Untersuchungen wurden schrittweise Anteile des Tunnelausbruch-Sandes 0/4 durch einen kalzitischen Sand 0/4 ersetzt. Bei einem Ersatz des Sandes wird verstärkt eine Anpassung der Zusatzmitteldosierungen oder Produkte für die einzelnen Mischungen (so z.B. auch der Luftporenbildner) erforderlich. Folgende Mischungen wurden verglichen:

1. Nullmischung NM: Gesteinskörnung 100% Tunnelausbruch
2. Mischung M20: Ersatz von 20 % Tunnelausbruch 0/4
3. Mischung M35: Ersatz von 35 % Tunnelausbruch 0/4
4. Mischung M50: Ersatz von 50 % Tunnelausbruch 0/4

In der folgenden Tabelle sind die Betonrezepturen der Mischungen zusammengestellt.

Tab. 6: Betonrezepturen

		NM	M20	M35	M50
Bindemittel					
Zement 1	CEM II/A-M (S-L) 42,5 R	210 kg/m ³			
Zement 2	CEM I 52,5 R	210 kg/m ³			
AHWZ	Fluasit	50 kg/m ³			
Gesteinskörnung					
Massen-% von gesamt 1562,9 kg/m ³					
Kalzitischer Sand	0/4	0%	20%	35%	50%
Tunnelausbruch	0/4	70%	50%	35%	20%
Tunnelausbruch	4/8	30%	30%	30%	30%
Wasser gesamt					
	kg/m ³	224	214	210	189
Zusatzmittel					
Massen-% von CEM					
Fließmittel	FM H100 U	1,17%			
Fließmittel	FM H1000	0,11%			
Luftporenbildner	LP K 400	0,47%	0,20%		

6.1 Frischbetonprüfungen

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Frischbetonprüfung der unterschiedlichen Mischungen zusammengestellt.

Tab. 7: Ergebnisse Frischbetonprüfung

		NM	M20	M35	M50
Wassergehalt	%	10,68%	9,25%	8,75%	8,70%
W/B		0,49	0,45	0,44	0,40
Frischbetondichte	kg/m ³	2110	2234	2288	2132
Ausbreitmaß					
10min	mm	613	565	580	555
60min	mm	495	440	420	475
Luftgehalt	Frischbeton-%	9,5%	6,4%	4,6%	10,9%

6.2 Druckfestigkeit

Es ist bekannt, dass die Druckfestigkeit mit abnehmendem Luftgehalt bzw. abnehmender Porosität zunimmt (siehe z.B. [6]). Da die untersuchten Mischungen einen stark unterschiedlichen Luftgehalt aufwiesen, wurden zur Vergleichbarkeit der einzelnen Druckfestigkeiten die Prüfergebnisse auf einen einheitlichen fiktiven Luftgehalt von 5,0% umgerechnet. Als einfache Annäherung wurde in diesem Beitrag der empirische Ansatz gewählt, dass bei einer Zunahme des Luftgehalts von 1% die Druckfestigkeit um 5% abnimmt.

Folgende Tabelle 8 zeigt unter dieser Annahme die Druckfestigkeit für den vorhandenen Luftgehalt der Versuchskörper und die Druckfestigkeit bezogen auf den rechnerischen Luftgehalt von 5,0%.

Tab. 8: Ergebnisse Druckfestigkeit

		NM	M20	M35	M50
vorhandener Luftgehalt (s.o.)					
Druckfestigkeit in MPa	7d	20,6	35,7	39,1	33,4
	28d	25,3	45,7	48,6	43,3
	56d	28,0	49,2	54,2	47,3
rechnerischer Luftgehalt 5,0%					
Druckfestigkeit in MPa	7d	25,2	38,2	38,3	43,3
	28d	31,0	48,9	47,6	56,1
	56d	34,3	52,6	53,1	61,3

Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Ersatz von Tunnelausbruch 0/4 durch kalzitischen Sand 0/4 die Druckfestigkeit des Betons ebenfalls zunimmt und dass dies sich hauptsächlich in der Möglichkeit der Wassereinsparung ausdrückt. Nachfolgendes Bild 7 verdeutlicht diesen Zusammenhang:

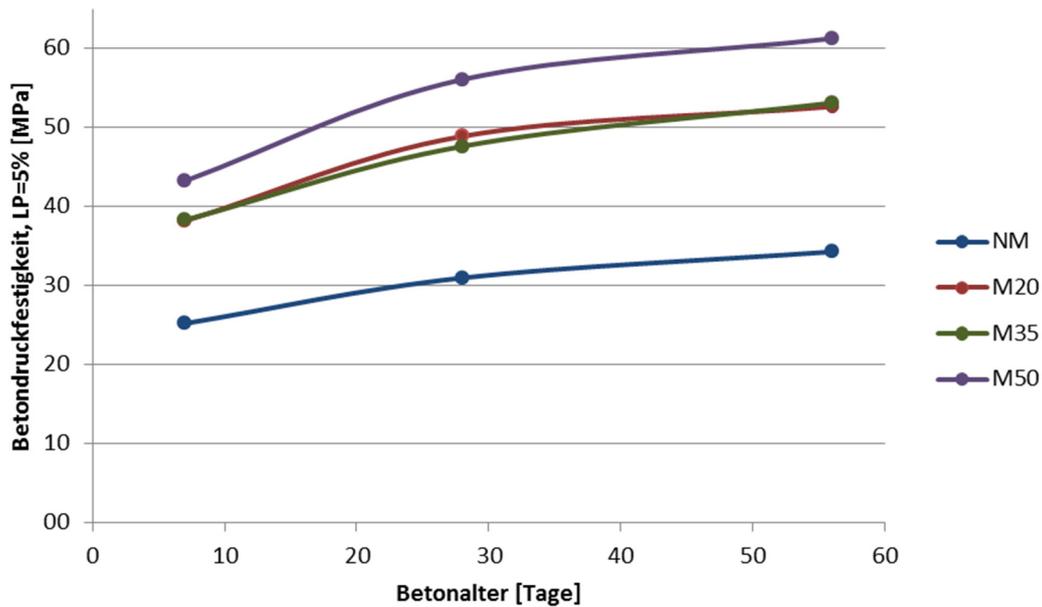


Bild 7: Verlauf der Betonfestigkeit für die Mischungen NM, M20, M35 und M50

7. Auswirkung der Materialaufbereitung auf das Deponievolumen

7.1 Anteil Spritzbeton am Deponievolumen

Eine zuverlässige Prognose des erforderlichen Deponievolumens ist bei einem Projekt wie dem Brenner Basistunnel von entscheidender Bedeutung, weil die Planung und Genehmigung von Deponien aufgrund von Auflagen und Verfahren lange Zeit in Anspruch nehmen. In Summe beträgt das erforderliche Deponievolumen auf österreichischem Projektgebiet ca. 12 Mio. m³. Veränderungen im Prozentbereich führen zu großen absoluten Mehr- oder Mindermengen.

Auf den ersten Blick scheint die Berechnung des Deponievolumens als Produkt des Ausbruchquerschnitts mit der Tunnellänge trivial zu sein. Eine genaue Betrachtung der Massenbilanzen ergibt jedoch ein anderes Bild. Das deponierte Material besteht nicht nur aus dem ausgebrochenen Gebirge, sondern auch aus Spritzbeton (aus Rückprall und temporären Sicherungen z.B. an der Ortsbrust). Zusätzlich ändert sich im Allgemeinen der Wassergehalt. Diese Effekte sind relevant und daher in der Massenbilanz zu berücksichtigen. Das Massenverhältnis Spritzbeton zu Gebirge in der Deponie kann anhand eines fiktiven kreisrunden Tunnels unter Annahme der Dichte Gebirge von 2,7 to/m³ und des Spritzbetons von 2,2 to/m³ folgendermaßen abgeschätzt werden:

Tab. 9: Abschätzung Anteil Spritzbeton in der Deponie

Radius	Ausbruchsfläche	Dicke Spritzbeton		Rückprall	Abschlagslänge
m	m ²	Laibung	Ortsbrust	%	m
4	50,3	0,15	0,05	10%	1,4

Volumen / Abschlag			Masse / Abschlag		Verhältnis
Gebirge	Laibung	Ortsbrust	Gebirge	Spritzbeton	
m ³	m ³	m ³	to	to	-
70,4	5,4	2,5	190,0	7,0	4%

Aus dieser einfachen Abschätzung ergibt sich ein Massenverhältnis Spritzbeton zu Gebirge in der Deponie von ca. 4%. Ein ähnlicher Wert ergab sich bei einer Rückrechnung der tatsächlichen Massen für das Los H33 Tulfes-Pfons. Der Anteil des Rückpralls ist verhältnismäßig gering (ca. 1%), wesentlicher ist der Spritzbeton der Ortsbrustsicherung.

7.2 Reduktion des Deponievolumens durch Materialaufbereitung

Es wird angenommen, dass die Reduktion des Deponievolumens gleich dem Massenverhältnis des aufbereiteten zum ausgebrochenen Gestein ist (bei genauerer Betrachtung ergibt sich ein leicht nichtlinearer Zusammenhang).

Die ausgebrochen und aufbereiteten Mengen im Los Wolf II sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 10: Verhältnis ausgebrochenes zu aufbereitetem Gesteinsmengen für Los Wolf II

Jahr	Menge ausgebrochen	Menge aufbereitet	Massenanteil
	to	to	%
2013	20.500	0	0 %
2014	764.000	0	0 %
2015	600.000	140.000	23 %
2016	341.250	100.000	29 %
2017	20.500	0	0 %
Summe	1.746.250	240.000	14 %

Daraus folgt, dass ohne Materialaufbereitung das Deponievolumen im Jahr 2016 um ca. 30% und im gesamten Los um ca. 15% größer gewesen wäre.

8. Zusammenfassung

Dieser Beitrag ergänzt die Beschreibung der in [7] vorgestellten aktuellen spritzbetontechnologischen Entwicklungen beim Bau des Brenner Basistunnels mit den Erfahrungen der Materialaufbereitung des Bündner Schiefers als Gesteinskörnung. In dem erfolgreich durchgeführten Pilotprojekt Baulos Wolf II konnte gezeigt werden, dass sich der aufbereitete Bündner Schiefer als Gesteinskörnung für die Herstellung von Spritzbeton und konstruktiven Beton gut eignet. Durch das aufbereitete Tunnelausbruchmaterial wurde eine komplette Gesteinskörnungseigenversorgung für 144.000 m³ Beton erfolgreich umgesetzt. Ferner wurde in weiterführenden Betonversuchen festgestellt, dass bei einem Ersatz von Tunnelausbruch 0/4 mit kalzitischem Sand 0/4 eine effektive Möglichkeit zur Erhöhung der Betonfestigkeit geschaffen werden kann. Diese Erkenntnisse dienen als Basis für die im nächsten Baulos geplante systematische Materialaufbereitung.

9. Literatur

- [1] Voit, K.: Einsatz und Optimierung von Tunnelausbruchmaterial des Brenner Basistunnels. Dissertation Universität für Bodenkultur, Wien, 2013.
- [2] BBT: E52 Ökobilanzstudie, Variantenuntersuchung Spritzbeton. BBT-intern, 2015.
- [3] Bergmeister, K.; Kogler, H.; Murr, R.; Cordes, T., Arnold R.: Brenner Basistunnel Innovationen zur Aufbereitung des Tunnelausbruchmaterials und Optimierung der Betonzusammensetzung. Zement+Beton 1, Seite 48-57, 2016.
- [4] ÖVBB: Richtlinie Spritzbeton. Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik, 2009.

- [5] BBT:
Qualitätsbewertung Spritzbetonversuche Wolf. BBT-intern, 2016.
- [6] Wesche, K.:
Baustoffe für tragende Bauteile. Band 2, Beton und Mauerwerk, Bauverlag GmbH. Wiesbaden und Berlin, 1993.
- [7] Cordes, T., Hofmann, M., Murr, R., Bergmeister, K.:
Aktuelle Entwicklungen der Spritzbetontechnologie und Spritzbetonbauweise am Brenner Basistunnel. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton – Tagung 2018, Alpbach, 11.+12.1.2018, Eigenverlag, 2018.
- [8] Bundesgesetz über nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 - AWG 2002), BGBl. I Nr. 102.
- [9] ÖNORM EN ISO 14689-1:2004:
Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels – Teil 1: Benennung und Beschreibung, Normentwurf.

Zu den Autoren

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr. Konrad Bergmeister

Neun Jahre war er als technischer Direktor und Chefingenieur der Brennerautobahn. Seit 20 Jahren Professor für konstruktiven Ingenieurbau an der Universität für Bodenkultur Wien. Seit 2010 ist er Präsident der Freien Universität Bozen. Ordentliches Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Berlin, sowie der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle. Vorstand Brenner Basistunnel BBT SE
Konrad.Bergmeister@bbt-se.com

Dipl.-Ing. Dr. techn. Tobias Cordes

Nach dem konstruktiven Bauingenieurstudium an der TU Darmstadt arbeitet er als Projektingenieur bei der ILF Innsbruck. Im Anschluss verfasste er seine Dissertation an der Universität Innsbruck über das mechanische und bruchmechanische Verhalten von Grenzsichten zwischen zementgebundenen Materialien und schloss dies mit Auszeichnung 2013 ab. Seit knapp 4 Jahren ist er beim Brenner Basistunnel BBT SE für Studien, konstruktive Planung und Ausführung zuständig.
Tobias.Cordes@bbt-se.com

Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthias Hofmann

Nach dem Studium und dem Verfassen der Dissertation an der Universität Innsbruck arbeitete er ca. 4 Jahre bei der Beton- und Monierbau im Technischen Büro in Innsbruck. U.a. führte er dort statische Berechnungen für das Crossrail Projekt in London durch. Seit knapp 4 Jahren arbeitet er bei der Brenner Basistunnel BBT SE in der Planungsabteilung. Neben der Bearbeitung von Ausschreibungs- und Ausführungsplanung ist er für die Gebäudebeweissicherung, den Aufbau eines BIM-Systems und als Leiter der Abteilung *Ingenieurservice tätig*.
Matthias.Hofmann@bbt-se.com

Dipl.-Ing. Roland Murr

Nach dem Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Innsbruck arbeitet er 2 Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe und Baustoffprüfung UNI Innsbruck, bevor er als Projektingenieur, Laborleiter, später Gesamtleiter der staatlich akkreditierten Materialversuchsanstalt Strass 15 Jahre tätig war. In dieser Zeit betreute er etliche Infrastrukturprojekte aus dem Bereich Kraftwerksbau, Infrastruktur- und Tunnelbau prüftechnisch und beratend. Seit 2 Jahren ist er beim Brenner Basistunnel für beton- und materialtechnische Fragestellungen im Bereich der Qualitätsüberwachung und Planung zuständig.
Roland.Murr@bbt-se.com