

Brenner Basistunnel

Innovationen zur Aufbereitung des Tunnelausbruchmaterials und Optimierung der Betonzusammensetzung

Das größte Tunnelbauprojekt Europas

TEXT | Konrad Bergmeister, Harald Kogler, Roland Murr, Tobias Cordes, Roland Arnold
 BILDER | © BBT-SE, Kogler, Swietelsky
 GRAFIKEN | © BBT-SE

Der Brenner Basistunnel ist ein prioritäres europäisches Infrastrukturprojekt, welches im neuen TEN-Strategieplan (2014–2020) als Teil des Nord-Süd-Korridors Nr. 5 Helsinki-La Valletta (Malta) enthalten ist. Die maximale Längsneigung des Brenner Basistunnels beträgt in den Hauptabschnitten 6,7 ‰. Mittig unterhalb der beiden Haupttunnel wird abschnittsweise vorausgehend ein durchgehender Erkundungsstollen gebaut. Dieser dient hauptsächlich dazu, das Gebirge zu erkunden, das Baurisiko zu vermindern und sowohl Baukosten als auch Bauzeiten zu optimieren. In enger Zusammenarbeit mit Universitäten und unterstützt von Erfahrungen bei ähnlichen Projekten als auch Erkenntnissen aus dem Bau des Erkundungsstollens werden Optimierungen vorangetrieben. So erfolgte die Bemessung und konstruktive Durchbildung der Tunnelstruktur für eine angenommene Nutzungsdauer von 200 Jahren.

Abbildung 1: Geologischer Längsschnitt

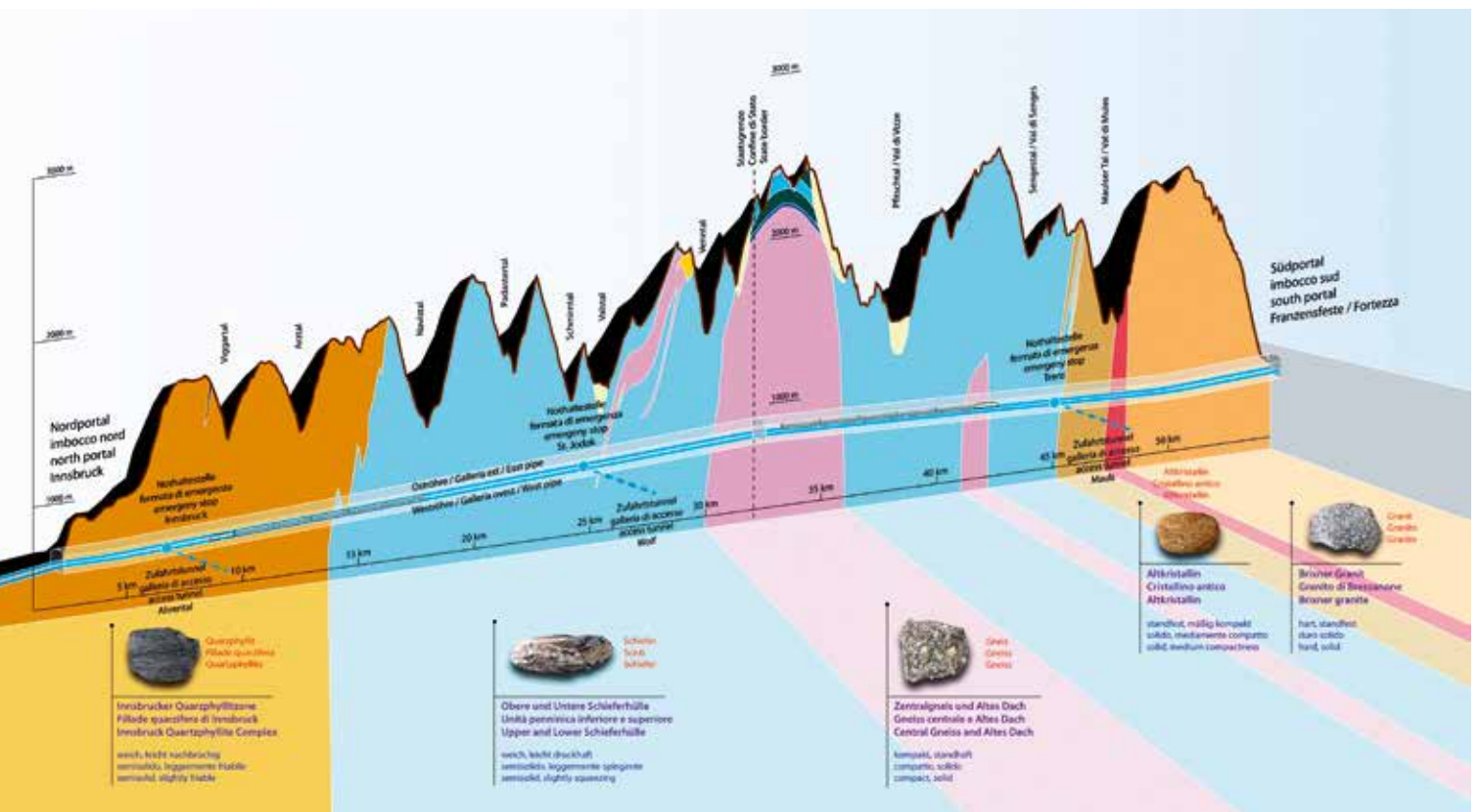
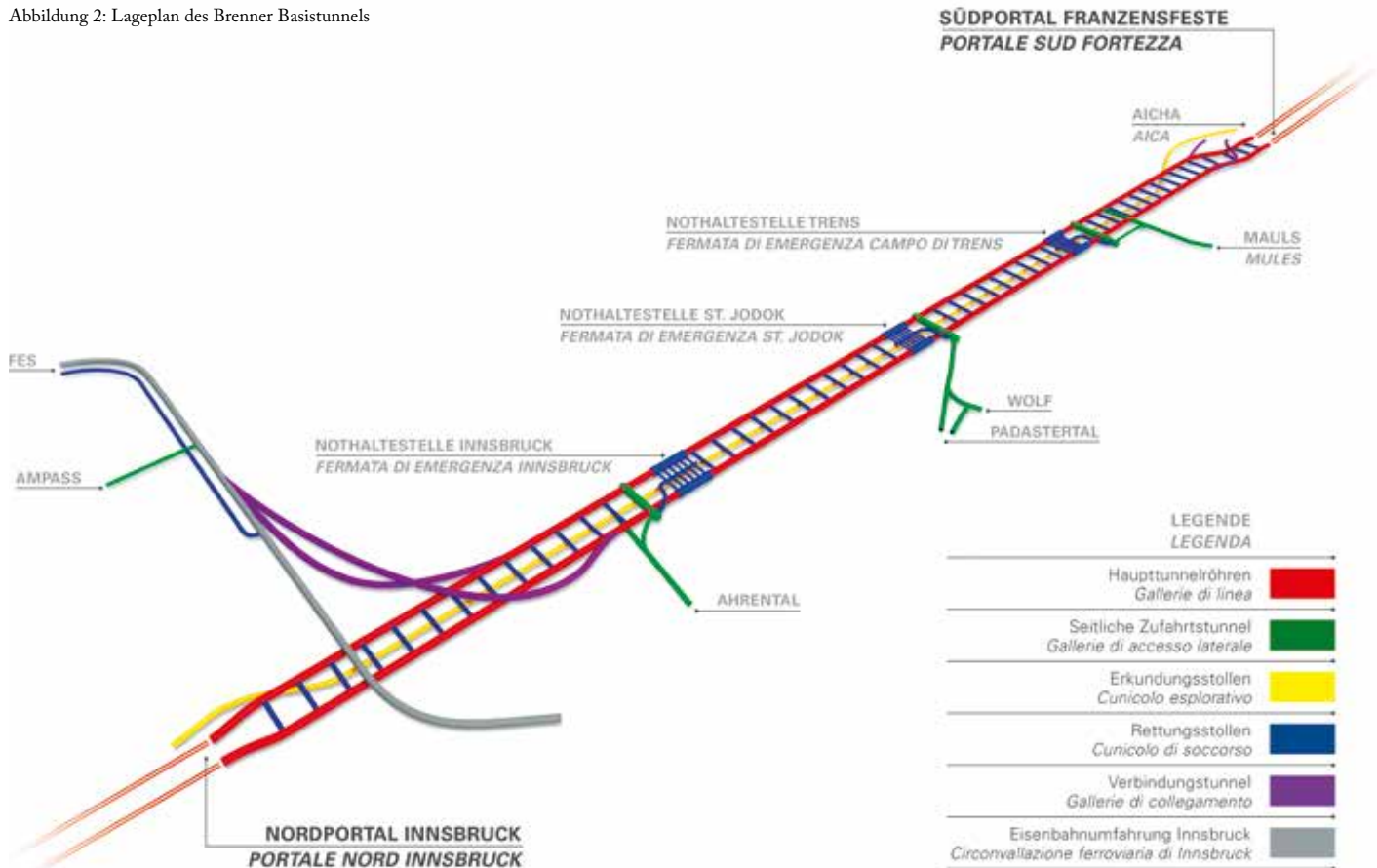


Abbildung 2: Lageplan des Brenner Basistunnels



1. Gestein

Beim Bau des Brenner Basistunnels fallen primär vier Hauptlithologien an:

- Innsbrucker Quarzphyllit
- Bündnerschiefer
- Zentralgneis
- Brixner Granit

Diese zählen – mit Ausnahme des im Süden anstehenden Brixner Granits (Intrusionskomplex des Südalpins) – zu den metamorphen Gesteinen. Mengenmäßig fällt der Hauptanteil dabei auf Bündnerschiefer, gefolgt von Innsbrucker Quarzphyllit, Zentralgneis und Brixner Granit.

Die Gesteine der Bündnerschiefer-Serie setzen sich hauptsächlich aus verschiedenen Schieferarten, wie Glimmer-, Kalkglimmer- und Tonglimmerschiefer zusammen, daneben finden sich auch Kalk- und Dolomitmarmor, Gips- und Anhydritstein sowie Prasiniten wieder. Der Innsbrucker Quarzphyllit besteht vorwiegend aus Quarzphyllit, Phyllit und Glimmerschiefer. Die Einheit des Zentralgneises wird aus Gneis, Glimmerschiefer, Amphibolit sowie Amphibolitgneis aufgebaut, während der Brixner Granit aus Granit, Biotitgranit, Granodiorit und Tonalit besteht.

Bis Ende Jänner 2016 wurden 44 km der Gesamtlänge von 230 km (alle Längen aufsummiert) ausgebrochen. Nach Fertigstellung der bahntechnischen Ausrüstung im Jahr 2025 ist die Inbetriebnahme für Dezember 2026 geplant.

2. Verwendung von Tunnelausbruch als Zuschlag für Beton

Etwa fünf Mio. Kubikmeter Beton werden beim Brenner Basistunnel verbaut. In verschiedensten Variationen und Festigkeits- sowie Expositionsclassen, vom Spritzbeton zur Erstsicherung über den Sohlbeton hin zu konstruktiven Anwendungen bei der Innenschale, bei Tübbing, bei der Festen Fahrbahn und im Portalbereich werden Betone angewandt.

Als Gesteinskörnungen soll – soweit als möglich – gebrochenes Korn aus den Tunnelausbrüchen verwendet werden. Die Gesteinskörnungen sind in Österreich gemäß der ÖNORM EN 12620 (2011-04) geregelt. Im Allgemeinen müssen Gesteinskörnungen eine ausreichende Kornfestigkeit besitzen und einen ausreichenden Haftverbund mit dem Zementstein eingehen. Bei der Hydratation des Zements dürfen die Zuschläge die chemischen Verbindungen mit dem Zement nicht behindern. Auch die Dauerhaftigkeit des Betons darf nicht negativ beeinflusst und der Korrosionsschutz der Bewehrung nicht beeinträchtigt werden.

Die ÖNORM EN 12620 (2011-04) stellt folgende Anforderungen:

- geometrische Anforderungen (Kornzusammensetzung, Kornform)
- physikalische Anforderungen (Festigkeiten und physikalische Eigenschaften)
- chemische Anforderungen (Chlorid- und Schwefelgehalt)

Werden diese Anforderungen erfüllt, so kann das Gestein als Gesteinskörnung für Beton gemäß ÖNORM EN 206-1 (2005-11) verwendet werden. Für die Innenschale eines Hohlraumbauwerkes

wurde in Österreich eine eigene Richtlinie „Innenschalenbeton – ÖBV, 2012“ erstellt. Beim Brenner Basistunnel wurden umfangreiche Untersuchungen zur Eignung der verschiedenen Ausbruchgesteine als Zuschlag für die Betonherstellung durchgeführt. Der Brixner Granit und der Brenner Gneis können unter gewissen Bedingungen problemlos als Zuschlag für die Betonherstellung verwendet werden. Das Tunnelausbruchmaterial aus Innsbrucker Quarzphyllit und Bündnerschiefer erfüllt die Anforderungen der ÖNORM EN 206-1 (2005-11) a priori nicht. Diesbezüglich wären in Bezug auf die geometrischen Anforderungen, wie Kornform oder Kornoberfläche, sowie bei Scherbeanspruchungen spezielle Aufbereitungsmaßnahmen notwendig.

2.1 Betonversuche

Zum Zweck der Feststellung der Eignung des Tunnelausbruchmaterials für Innenschalenbeton (vgl. Tabelle 1) wurden unterschiedliche Versuchsmischungen gemäß der Richtlinie Innenschalenbeton hergestellt und deren Frisch- und Festbetoneigenschaften bestimmt. Dabei wurden unbewehrte und faserbewehrte (Stahlfasern, PP-Fasern) Betonmischungen erstellt und geprüft. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Untersuchung des Bruchverhaltens bei der Ermittlung der Bruchenergie gelegt. Letztere wurde mittels Keilsplattversuch nach ÖNORM B 3592 (2011-09) ermittelt.

Aufgrund der Anreicherung von Schichtsilikaten (Glimmer- und Chlorit-Mineralen) innerhalb der kleineren Korngrößen wurde zur Verbesserung der Frisch- und Festbetoneigenschaften (Verringerung des Wasseranspruchs, Erhöhung der Betonfestigkeit) der Kornanteil < 4 mm durch Quarzsand ersetzt.

Im Zuge der Untersuchungen – neben den Frischbetoneigenschaften wurden die Betondruckfestigkeit f_c , die 4-Punkt-Biegezugfestigkeit f_{ct} , die Kerb-Splattzugfestigkeit f_{KZ} sowie die spezifische Bruchenergie G_f bestimmt – konnte gezeigt werden, dass die Festigkeitsanforderungen aus Tabelle 1 bei guter Verarbeitbarkeit bereits nach 28 Tagen sowohl für Gesteinskörnung aus Innsbrucker Quarzphyllit als auch aus Bündnerschiefer problemlos zu erreichen sind.

Auch bei der Zugabe von Stahl- oder Polypropylenfasern konnte durch den Einsatz von Fließmittel eine brauchbare Verarbeitbarkeit erzielt werden. Als Stahlfasern wurden Stahldrahtfasern mit Endverankerung (kurze Fasern: 30 mm; lange Fasern: 50 mm) gewählt; die Polypropylenfasern hatten eine Länge von 12 mm. Eine Gegenüberstellung der wichtigsten Festbetonkennwerte ist in Tabelle 1 gegeben.

Aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass die Betondruckfestigkeiten für die Versuchsmischungen mit der Gesteinskörnung aus Bündnerschiefer (mit Ausnahme der Mischung mit PP-Fasern) deutlich höher sind als jene aus Innsbrucker Quarzphyllit. Bezüglich der Bruchenergie und der Kerb-Splattzugfestigkeit erreichen jedoch die Versuchsmischungen mit Innsbrucker Quarzphyllit (mit Ausnahme der Versuchsmischungen mit den kurzen Stahlfasern) höhere Festigkeiten.

Durch Zugabe der Stahlfasern konnten sowohl die Zugfestigkeitsparameter als auch die Betondruckfestigkeit deutlich gesteigert werden, die Bruchenergie wurde annähernd verzehnfacht. Eine detaillierte Auswertung für die mittels Keilsplattversuch zur Ermittlung der spezifischen Bruchenergie G_f und der Kerb-Splattzugfestigkeit σ_{KZ} geprüften Versuchskörper der Versuchsmischungen aus Tabelle 1 ist in der Abbildung 3 dargestellt.

Zur Festlegung des Widerstandes des Betons gegen Korrosion durch Karbonatisierung erfolgte der Nachweis der Wassereindringtiefe an den PP-faserbewehrten Versuchsmischungen durch Prüfung am Festbeton nach ONR 23303 (2010-09). Dabei wurde jeweils die Expositionsklasse XC4 erreicht.

2.2 Beton-Anforderungsklassen beim Brenner Basistunnel

Für den Innenausbau des Brenner Basistunnels werden – je nach Lage und Art des Bauwerksteils – bestimmte Anforderungsklassen in einem sogenannten Betonsortenverzeichnis vorgeschrieben. Grundsätzlich werden dabei ein Portalbereich (1.000 m ab dem Portal) sowie eine Tunnelinnenstrecke (1.000 m ab dem Portal) unterschieden.

Tabelle 1: Frisch- und Festbetoneigenschaften der Innenschalen-Versuchsmischungen

GESTEINSKÖRNERUNG AUS TUNNELAUSBRUCH FASERZUGABE	f_c	f_{ct}	σ_{KZ}	G_f	f_{ct}/f_c
	(N/mm ²)			(N/m)	(%)
Innsbrucker Quarzphyllit 4–20 mm, unbewehrt	42,45	3,44	3,02	238,39	8,1
Bündnerschiefer 4–20 mm, unbewehrt	47,65	3,55	2,88	167,67	7,4
Innsbrucker Quarzphyllit 4–20 mm, mit kurzen Fasern	45,55	5,19	3,93	1794,96	11,4
Bündnerschiefer 4–20 mm, mit kurzen Fasern	47,79	4,60	3,93	1934,59	9,6
Innsbrucker Quarzphyllit 4–20 mm, mit langen Fasern	46,71	5,18	4,45	2123,72	11,1
Bündnerschiefer 4–20 mm, mit langen Fasern	57,94	4,72	3,96	2048,51	8,1
Innsbrucker Quarzphyllit 4–20 mm, PP-Fasern	27,03	3,08	2,57	291,83	11,4
Bündnerschiefer 4–20 mm, PP-Fasern	25,42	3,23	2,42	273,27	12,7

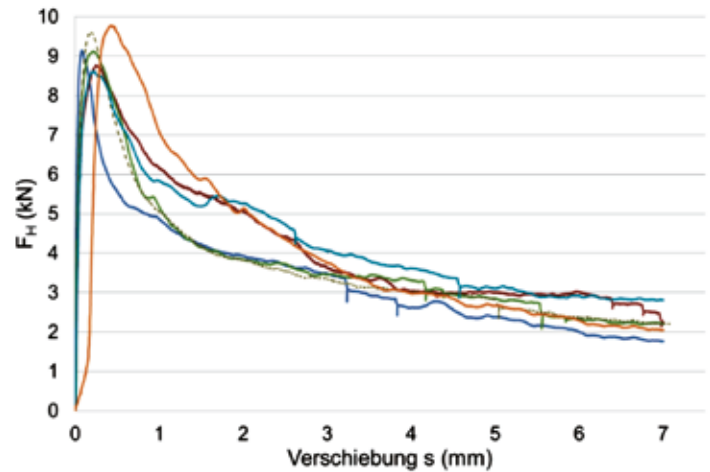
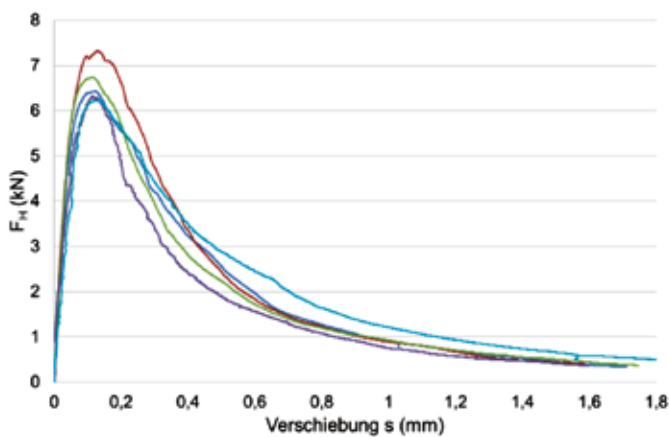


Abbildung 3: Kraft-Verschiebungsdiagramm Bündnerschiefer; unbewehrt (links) und lange Stahlfasern (rechts)

Für den Portalbereich gilt zusätzlich die Expositionsklasse XF3. Die in Österreich für die Innenschale zu verwendenden Betonarten sind in Tabelle 2 (Gewölbebeton für Eingangsbereich und Tunnelinnenstrecke) angeführt. Für die Druckfestigkeitsklassen – die angeführten Druckfestigkeiten verstehen sich als Mindestdruckfestigkeiten – wird jeweils ein Betonalter von 56 Tagen herangezogen (vgl. Tabelle 2). Um einen problemlosen Einbau des Frischbetons zu garantieren, sind auch Anforderungen an die Konsistenzklasse (F-Klassen nach ÖNORM EN 206-1; 2005-11) gestellt. Das zu verwendende Größtkorn ist mit D_{max} gekennzeichnet.

2.3 Sicht-Stein-Beton aus Bündnerschiefer – *Opus caementicium pyrium*

Die römische Bauweise „Opus caementicium“ war richtungweisend bei der ressourcenschonenden Entwicklung der Sicht-Stein-Beton-Bauweise. Durch mehrere wissenschaftliche Untersuchungen gelang es, den Aufbereitungsprozess so zu optimieren und einzustellen, dass der Bündnerschiefer als Zuschlagmaterial verwendet werden kann. Als „Opus caementicium montium magistrale“ wurde eine neue Bauweise bezeichnet, wo gebrochenes Korn in eine Schalung gefüllt und mit einem selbstverdichtenden Beton vergossen wird.

Für den Bau einer Kapelle wurde der ausgebrochene und speziell verarbeitete Bündnerschiefer in eine vertikale Schalung lagenweise eingefüllt. Dadurch dass der Tunnelausbruch aus dem Brennermassiv kommt, wird dies als „Opus caementicium pyrium“ bezeichnet. Nach dem Verfüllen bis auf eine abgestimmte Höhe wurden die Hohlräume mit einem selbstverdichtenden Beton vergossen. Durch eine spezielle Materialaufbereitung mit einem mehrfachen Brechen des durch Sprengung gewonnenen Ausbruchmaterials wurde ein Kies-Sand-Gemisch mit einem Größtkorn von 32 mm gewonnen. Die Zuschläge wurden lagenweise in eine geschaltete Wandscheibe eingebracht. Nach einer Füllhöhe von etwa 3 m wurde ein selbstverdichtender Beton eingebracht. Nach

Tabelle 2: Technische Spezifikationen beim Brenner Basistunnel

TUNNELEINGANGSBEREICH (bis 1.000 m ab PORTAL)	
C25/30 XC3/XF3/GK- D_{max} 32/F4	unbewehrt
C25/30 XC3/XF3/GK- D_{max} 22/F5	bewehrt
Tunnelinnenstrecke	
C25/30 XC3/GK- D_{max} 32/F4	unbewehrt
C25/30 XC3/GK- D_{max} 22/F5	bewehrt
Feste Fahrbahn (bis 1.000 m ab Portal) – Vorschlag	
C45/55 XC3/XD2/XF3/XA1/S2A/ D_{max} 16	bewehrt
Feste Fahrbahn Tunnelinnenstrecke – Vorschlag	
C45/55 XC3/XD2/XA1/S2A/ D_{max} 16	bewehrt

Abbildung 4: Bauwerk aus Opus caementicium magistrale



Tabelle 3: Materialkennwerte des Opus caementicium pyrium (Bündnerschiefer)

MATERIALKENNWERTE	WERTE
Mittlere Betondruckfestigkeit (Würfel)	44,6 MPa
Mittlere Zugfestigkeit	3,0 MPa
Mittlerer E-Modul	35.450 MPa
Bruchenergie (Dreipunktbiegeversuch)	371 Nm/m

einer Erhärtungsphase von etwa sieben Tagen (Druckfestigkeit von über 70 % erreicht) wurde ausgeschalt und die oberflächennahen schwach anhaftenden Betonteile mittels Wasserdruckstrahlen (150 Bar) entfernt. Die sichtbaren Teile der Wandscheiben wurden anschließend mit einem farblosen Hydrophobierungsmittel geschichtet.

Die wesentlichen experimentell ermittelten Materialkennwerte, welche auch als Mittelwerte bei der FE-Modellierung verwendet wurden, sind in Tabelle 3 erfasst.

3. Erkundungslos Wolf II – Materialaufbereitung und deren Auswirkungen auf den Baubetrieb

3.1 Einleitung

Das Erkundungslos Wolf II ist Teil des Brenner Basistunnels und umfasst einen ca. 3,2 km langen Zufahrts- und Erkundungsstollen sowie verschiedene Bauwerke im Padastertal.

Bei der Realisierung von Tunnelbauwerken fallen große Mengen an Ausbruchmaterial an, welches in der Regel auf Bodenaushubdeponien gelagert wird. Dem gegenüber steht jedoch ein erheblicher Bedarf an Schüttmaterial bzw. Gesteinskörnungen für die Herstellung von Tragschichten, Flächenfiltern oder Betonen.

Die Wiederverwendung des ausgebrochenen Gesteins erscheint somit auf den ersten Blick als selbstverständlich und ökonomisch sinnvoll. Bei genauerer Betrachtung haben jedoch Faktoren wie Kosten der Materialaufbereitung, lithologische Eigenschaften des anstehenden Gebirges sowie Platzverhältnisse im Baufeld einen wesentlichen Einfluss auf die Realisierbarkeit einer wirtschaftlich sinnvollen und technisch möglichen Materialwiederverwertung. Des Weiteren bestehen umfangreiche und restriktive gesetzliche sowie normative Vorgaben, welche beachtet, erfüllt, kontrolliert und dokumentiert werden müssen.

Abbildung 5: Übersichtsplan der Baustelle Erkundungslos Wolf II

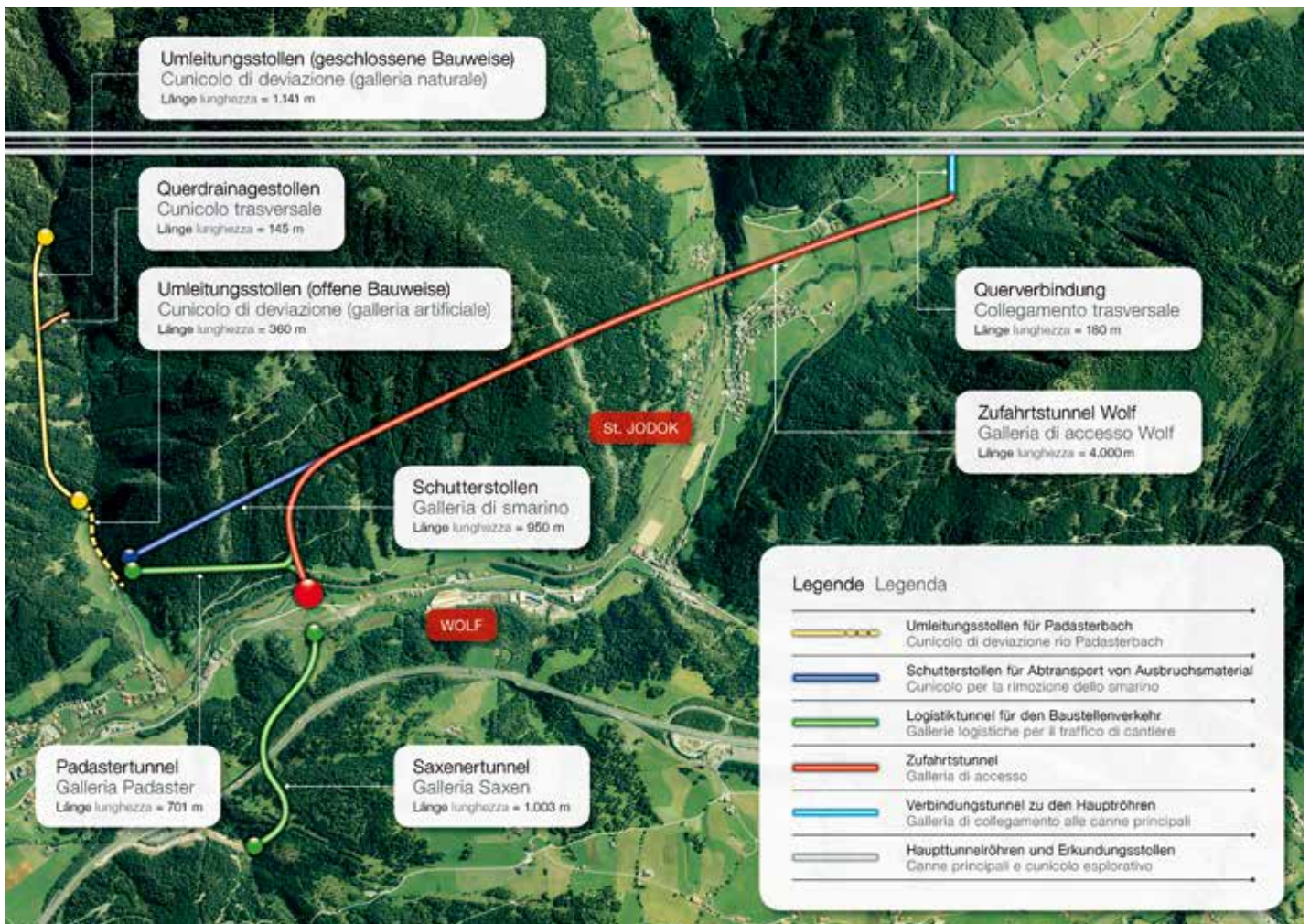




Abbildung 6: Bündnerschiefer, Handstück



Abbildung 7: Schlammmentwässerung und Verfuhr von Ausbruch

3.2 Materialaufbereitung am Baulos Erkundungslos Wolf II – Zeitplan

Nach intensiven vom Auftraggeber durchgeführten Vorversuchen wurde seitens der Baufirma Swietelsky Tunnelbau im Frühling 2014 mit der Anlagenplanung und im Juli 2014 mit dem Anlagenaufbau auf der Baustelleneinrichtungsfläche im Padastertal begonnen. Dabei wurde besondere Rücksicht auf die petrologischen Eigenschaften des anstehenden Gebirges – Bündnerschiefer – genommen. Anfang September 2014 startete die Probephase, in welcher das aufbereitete Tunnelausbruchmaterial erstmalig der Betonherstellung zugeführt wurde. Aufgrund der in dieser Phase gewonnenen Erkenntnisse wurde die Anlage Ende September 2014 in den Vollbetrieb genommen.

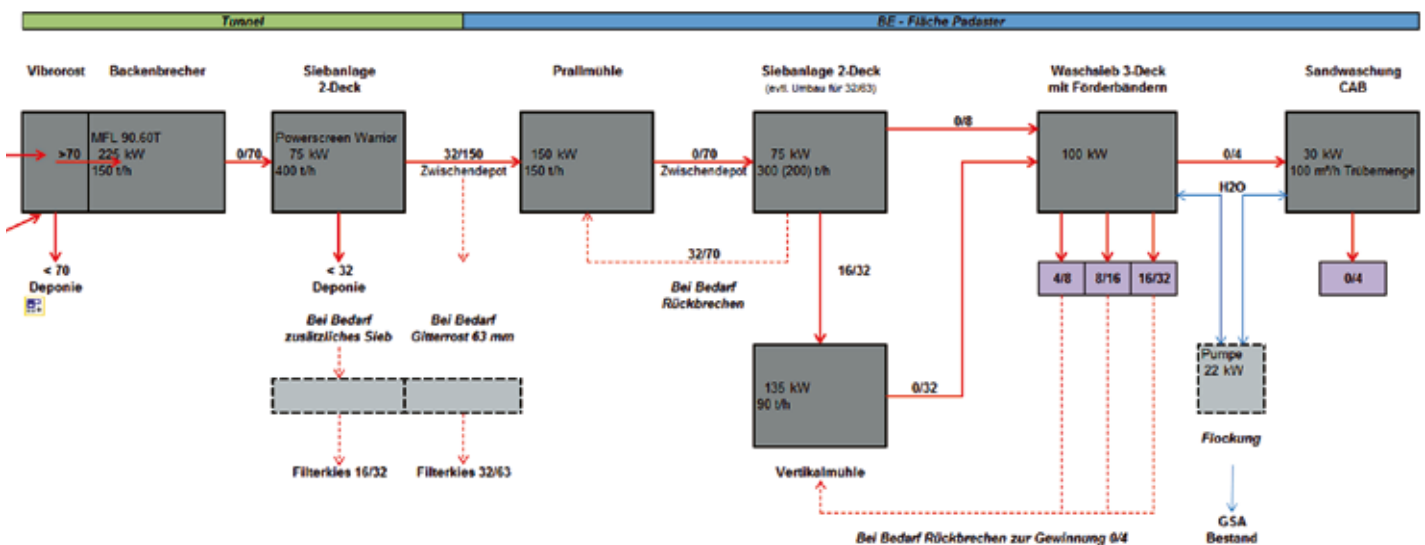
Ab diesem Zeitpunkt konnte sich die Baustelle Erkundungslos Wolf II zur Gänze autark mit Schüttgütern, Korngemischen und Beton-Zuschlagstoffen versorgen und aus Tunnelausbruch (siehe Abbildung 6) erwuchs eine Materiallogistik, welche das Baustellenpersonal noch vor enorme Herausforderungen stellen würde (siehe Abbildung 7).

3.3 Anlagenbeschreibung

Die Anlage besteht aus einem mehrstufigen Materialaufbereitungsprozess, welcher sich in eine erste Stufe im Tunnel (Lüfterkaverne) und in eine zweite Stufe, auf der Baustelleneinrichtungsfläche im Padastertal, gliedert. Im Tunnel erfolgt die Vorsortierung des Ausbruchmaterials mittels einer Siebanlage, die Zerkleinerung auf Korngröße < 150 mm mittels Backenbrecher und eine zweite Aussortierung auf eine Korngröße von 30/150 mm.

Auf der BE-Fläche Padastertal wird das im Tunnel gewonnene „Wertkorn“ (30/150) zwischengelagert und anschließend der weiteren Aufbereitung zugeführt. In der Prallmühle erfolgt die Kornzerkleinerung und die Vertikalmühle sorgt für eine optimale, gedrungene Kornform. Über eine Siebanlage gelangt das Korn zur Nassaufbereitung, welche aus einem Schrägwaschsieb sowie einem Schöpfrad zur Sandaufbereitung besteht.

Abbildung 8: Aufbereitungsschema – Materialaufbereitung Wolf II



3.4 Auswirkungen auf den Baubetrieb

- *Thema „Just-in-time-Produktion“*

Im Regelbetrieb werden im Baulos Wolf II täglich in etwa 500 t Zuschlag für Spritz- und Konstruktionsbetone benötigt. Die tägliche Produktionsmenge der Anlage beträgt in etwa 600 t – jedoch ausschließlich im Wochenbetrieb. Daraus entsteht ein theoretischer Mehrbedarf von 500 t pro Woche, welcher nicht durch die Eigenproduktion gedeckt wäre. Zur Gewährleistung eines optimierten und reibungslos funktionierenden Gesamtbaubetriebs ist der Materialbedarf der Baustelle laufend mit den Produktionszeiten, aber auch den Wartungszeiten der Anlage zu koordinieren bzw. anzupassen.

- *Winterlager*

Um Materialengpässen in den Wintermonaten vorzubeugen, ist der Aufbau von Reserven von großer Bedeutung. Da jedoch die Bedarfsmenge in der Regel größer als die Produktionsmenge ist, sind Arbeitsstillstände wie Oster- oder Sommerabgang für die Produktion von Zuschlagstoffen zu nutzen.

- *Deponiebetrieb*

Aufgrund der Tatsache, dass der überwiegende Teil des Tunnelausbruchs dem Materialaufbereitungsprozess im Tunnel (Backenbrecher) zugeführt wird, gelangt lediglich minderer Tunnelausbruch bzw. gesiebtes Material < 30 mm auf die Bodenaushubdeponie. Dies führt insbesondere aufgrund der Schlamment-sorgung auf der Deponie zu erheblichen Erschwernissen bei der Deponiebewirtschaftung bzw. der Einbaulogistik.

- *Schlammensorgung*

Der für Materialaufbereitungsanlagen ungewöhnlich hohe Anfall an Feinteilen < 0,063 mm (rund 200 t pro Produktionstag) erfordert ein entsprechendes Einbaukonzept auf der Bodenaushubdeponie. Der mittels Filtersäcken „entwässerte“ Schlamm ist mit Ausbruchmaterial bzw. dem für die Aufbereitung nicht geeigneten Tunnelausbruch zu vermengen und lagenweise einzubauen.

- *Feuchtegrad Zuschlagstoffe*

Aufgrund der Nassaufbereitung der Zuschlagstoffe und der bereits erwähnten Just-in-time-Produktion unterliegt der Feuchtegrad der jeweiligen Fraktionen – insbesondere der des Sandes – hohen Schwankungen. Entsprechend sind kleine Zwischenlagerflächen zum Trocknen der Zuschlagstoffe beizustellen bzw. ist beim Mischen des Betons umso mehr auf den Wassergehalt zu achten.

MATERIALBILANZ

Nach einer Produktionsdauer von **16 MONATEN**

AUFGEBEBENE MENGE AN AUSBRUCH IM TUNNEL: 376.000 t
DABEI GEWONNENES WERTKORN 30/150: 188.000 t (rund 50 %)
AUSGESIEBTES „MINDERES“ GESTEIN 0/30: 188.000 t (rund 50 %)
WERTKORN AUS TUNNELAUFBEREITUNG 30/150: 188.000 t (100 %)
DARAUS PRODUZIERTER SAND 0/4: 78.000 t (rund 41 %)
KIES 4/8: 35.500 t (rund 19 %)
KIES 8/22: 21.400 t (rund 11 %)
KIES 16/32: 7.000 t (rund 4 %)
SCHLAMM: 47.000 t (rund 25 %)

Abbildung 9: Hintere Geschiebesperre mit Zuschlagstoff aus der Materialaufbereitungsanlage



4. Betonzusammensetzung – Besonderheiten

4.1 Betontechnologische Entwicklung

Für den Einsatz des Materials als Gesteinskörnung für Beton wurden im Vorfeld Eignungstests, bezüglich des Graphitgehalts und des vereinzelt vorkommenden Pyrits durchgeführt. Der Graphit ist eine natürliche Form des chemischen Elements Kohlenstoff und somit grundsätzlich in der Betonherstellung nicht schädlich. Jedoch wurde aufgrund der geringen Festigkeit und der Beeinflussung der Wirkungsweise der Betonzusatzmittel eine Kontrolle des Graphitgehalts im Ausgangsmaterial und in der aufbereiteten Gesteinskörnung durchgeführt. Der Graphit trat jedoch durch mehrere Untersuchungen bestätigt in (überraschend) geringen Mengen von nur 0,4 bis 0,5 % auf, obwohl optisch ein wesentlich höherer Gehalt erwartet wurde. Bei den nicht aufbereiteten Handstücken konnte deutlich festgestellt werden, dass der Graphit immer nur in sehr dünnen Lagen zwischen den Karbonaten eingeschaltet ist und dadurch in der Gesamtverteilung nur gering auftritt. Es muss auch angemerkt werden, dass durch die Vorabsiebung, die Aufbereitung und den Waschvorgang der Gesamtgehalt des Graphits in der Gesteinskörnung gegenüber dem Rohmaterial nochmals verringert ist.

Vereinzelt optisch und anhand der Röntgen-Diffraktometrischen-Analyse (RDA) wurde an mehreren Proben des Rohmaterials und der aufbereiteten Gesteinskörnung das Vorkommen von Pyritkristallen festgestellt. Der Pyrit ist als Eisen-Schwefel-Verbindung den Regelungen hinsichtlich Sulfatgehalt unterzogen. Normativ sind für Gesteinskörnungen für die Betonherstellung sowohl der Gesamtschwefelgehalt als auch der säurelösliche Schwefelgehalt begrenzt, um den schädigenden Einfluss einer möglichen chemischen Reaktion, die in Form von internem Sulfatreiben nach erfolgter Oxidation der Schwefelverbindung stattfinden kann, entgegenzuwirken. In nasschemischen Analysen wurden sowohl säurelösliche als auch Gesamt-Schwefelgehalte unter 0,8 % festgestellt. In an mehreren Proben durchgeführten RDA-Untersuchungen wurden Pyritgehalte zwischen 0,1 und 0,5 % festgestellt. Eine Untersuchung hinsichtlich der Löslichkeit des Pyrits führte zu keiner Bestätigung, sodass die beprobte Gesteinskörnung die Vorgaben der EN 1260 hinsichtlich des Sulfatgehalts erfüllen konnte.

Im Baulos Wolf II wurde ab Juni 2014 die Aufbereitung von Tunnelausbruchmaterial, das im Zuge des konventionellen zyklischen Vortriebs angefallen ist, nach dem Vorbrechen und erfolgter Vorabsiebung bei 30 mm aufbereitet, klassiert und als Gesteinskörnung für die Betonproduktion vor Ort verwendet. Aufgrund der beengten Platzverhältnissen wurde entschieden, die Betonproduktion durch die Erzeugung von drei Fraktionen zu versorgen. Die Nass-Klassifizierung erfolgte in die Fraktionen Sand 0/4, Kies 4/8 und Kies 8/22, die für die Herstellung der Betonsorten Spritzbeton (Fraktionen 0/4 und 4/8), Innenschalenbetone mit Widerlager und Gewölbe unterschiedlicher Beanspruchungsklassen und Walzbeton eingesetzt wurden.

Bei der Verwendung von aufbereiteter Gesteinskörnung aus dem Kristallin ist zufolge der Schichtsilikate mit einem erhöhten Wasseranspruch in der Betonherstellung zu rechnen. Dieser Teil



Abbildung 10: Spritzbetonsicherung Abzweigekaverne

des Wassers steht jedoch nicht dem Anmachprozess zur Verfügung, sondern wird im Korn als Kernfeuchte eingelagert. Eine prüftechnische Bestimmung der aufbereiteten Gesteinskörnung ergab eine Kernfeuchte von größer 10 bis 20 l je m³ Beton, die dem Gesamtwassergehalt rechnerisch abgezogen werden kann. Im Baulos Wolf II fielen als Hauptbetonsorten Spritzbeton und Innenschalenbeton sowie Ortbeton für die Bauwerke im Padastertal an.

4.2 Außenschale – Spritzbeton

Im Zuge der Spritzbetonherstellung mussten mehrere Bindemittelvarianten untersucht werden. Es zeigte sich, dass bei einem für die Sicherheit des Vortriebs erforderlichen guten Frühfestigkeitsverlauf die Nacherhärtung um bis zu 30 % geringer als der unbeschleunigte Nullbeton ausfiel. Erstarrungsbeschleunigerprodukte, die eine erhöhte Endfestigkeit ergaben, wiesen eine schwache Festigkeitsentwicklung im jungen Alter auf.

Für das Bauwerk konnte eine gleichmäßige Qualität des Spritzbetons anhand von mehreren Bohrkernentnahmen aus dem Bauwerk (Außenschale) nachgewiesen werden. So konnte die Spritzbetonfestigkeitsklassen SPC 20/25 und SPC 25/30 und der für die Dauerhaftigkeit wesentliche Nachweis der Gefügedichte XC4 positiv erbracht werden.

4.3 Innenschale – Saxener Tunnel

Als Innenschalenbeton kam überwiegend ein Beton der Sorte C25/30(90) WDI/IXAL-B/G/GK22 zur Anwendung, im Portalbereich wurde durch einen erhöhten Mikro-Luftporengehalt der Frostwiderstand den Erfordernissen angepasst. Entsprechend der ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton wurde der Nachweis des chemischen Widerstandes IXA am Festbeton über die Prüfung der Gefügedichte/Wassereindringtiefe geführt. Der zufolge der Verwendung von aufbereitetem Tunnelausbruchmaterial gegenüber den Empfehlungen der Richtlinie erhöhte Wasseranspruch wird durch einen günstigen, tiefen E-Modul kompensiert. Um den notwendigen Kompromiss zwischen Frühfestigkeitsentwicklung/Ausschalfestigkeit, Wärmeentwicklung und Endfestigkeit zu finden, wurde eine Bindemittelkombination aus Portland-Kompositzement und AHWZ eingesetzt.

Tabelle 4: Rezeptur Innenschale Saxener Tunnel bei chemischem Angriff IXAT-B

BINDEMITTEL	
Zement CEM I 42,5 R SR0 WT33 C ₃ A-frei	310 kg/m ³
AHWZ, Fluasit	90 kg/m ³
Gesteinskörnung GK22	
Aufbereitetes Ausbruchmaterial	
Sand 0/4, Werk Wolf II	48 %
Kies 4/8, Werk Wolf II	12 %
Kies 8/22, Werk Wolf II	40 %
Zusatzmittel	
Fließmittel Prement H 100 U	2,40 kg/m ³
Luftporenbildner LP N 5	2,00 kg/m ³
Konsistenzhalter H 1000	0,68 kg/m ³
Wasser	
Gesamtwasser	180 kg/m ³
Kernfeuchte lt. Untersuchung Wasseraufnahme Gesteinskörnung: 10 l/m ³	

5. Betonuntersuchungen zur Optimierung des Zements hinsichtlich Nachhaltigkeit, Frühfestigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit

Eine Betonrezeptur mit geringerem Klinkergehalt und kompaktem Gefüge ist nachhaltiger, dauerhafter und versinterungsärmer. Um diese Vorteile am BBT nutzen zu können, wurden für Innenschalenbetone Rezepturen an der Universität Innsbruck optimiert. Durch Heranziehen unterschiedlicher Bindemittelkombinationen wurde hier einerseits die Substitution der Klinkerphase durch

hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (bis zu 30 % nach [ÖNORM B3309]) und andererseits der Einsatz unterschiedlicher Gesteinskörnungen mit unterschiedlicher Kornzusammensetzung und unterschiedlichem Mehlkorngesamtgehalt untersucht.

Aufbauend auf einer Standardrezeptur für Tunnelinnenschalen (WT1) wurden die vier Bindemittelkombinationen entsprechend Tabelle 6 mit je zwei unterschiedlichen Gesteinskörnungen untersucht. Zum einen die Gesteinskörnung aus aufbereitetem Tunnelausbruchmaterial des Bündnerschiefers aus Wolf (WT_x) und zum anderen eine externe kalzitische Gesteinskörnung (WN_x) im Vergleich dazu.

Aus dem Aufbereitungsprozess ergab sich eine gut geeignete Korngrößenverteilung des Tunnelausbruchmaterials WT, jedoch mit einem gegenüber dem kalzitischen Material erhöhten Mehlkorngesamtgehalt und folglich einem erhöhten Wasseranspruch. Im Vergleich zur Standardrezeptur wurden jeweils drei Bindemittelkombinationen mit reduzierter Klinkerphase erstellt und getestet (WT2/N2, WT3/N3 und WT4/N4), wovon die zweite (WT3/N3) für den Einsatz bei treibendem Sulfatangriff (XA1T) geeignet ist.

Für die acht Rezepturen wurden anhand von Betonversuchen die Frischbetoneigenschaften und die Temperaturverläufe ermittelt und jeweils die Entwicklung der Frühfestigkeit, der Druckfestigkeit, der Spaltzugfestigkeit, des E-Moduls und der Karbonisierungstiefe experimentell bestimmt. Die für die Betonzusammensetzungen gewählten Bindemittelgehalte basierten einerseits auf Erfahrungen mit dem Tunnelausbruchmaterial, andererseits wurde versucht, bei entsprechenden Frischbetonkennwerten eine Minimierung des Klinkergehalts umzusetzen.

Die Betone mit aufbereiteter Gesteinskörnung erfüllten die Anforderungen an die Festigkeitsklassen eines C30/37 nach 28 d, mit Ausnahme der Rezepturen WT1 und WN3; die Festigkeitsklasse C30/37 wurde nach 56 d von allen Rezepturen erfüllt bzw. teilweise überschritten. Die tägliche Betonierabfolge der Tunnel-

Tabelle 5: Festbetonkennwerte Innenschalenbeton Saxener Tunnel

ALTER (d)	DF-MW (N/mm ²)
7	28,3
28	39,7
56	43,0
90	46,2
Wassereindringtiefe (56 d)	15 mm
Frostbeständigkeit mit E-Modul nach 28 d	bestanden 96 %
mit E-Modul nach 56 d	98 %
L300	2,1 % – bestanden
Abstandsfaktor	0,13 mm – keine Anf.
Kernfeuchte 0/4, 4/8, 8/22	0,6 %/0,6 %/0,5 %

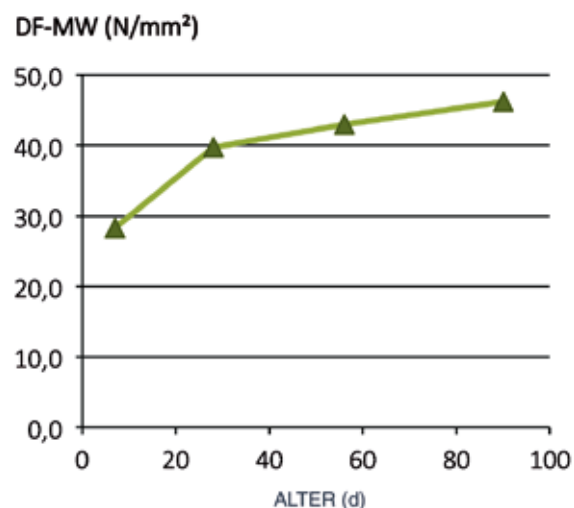


Tabelle 6: Untersuchte Bindemittelkombinationen

BETONREZEPTUREN	WT1	WN1	WT2	WN2	WT3	WN3	WT4	WN4
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
CEM II/A-M (S-L) 42,5 R AHWZ	300 40	260 60						
CEM III/A 42,5 R			380	320				
CEM III/B 32,5 N CEM I 42,5 R SR0					290 90	245 75		
CEM I 52,5 R AHWZ							260 110	225 95

Tabelle 7: Versuchsergebnisse der acht Betonversuchsserien (Temperaturerhöhung, Festigkeitsklassen 28 d/56 d, Frühfestigkeit 12 h)

REZEPTUR	ZUSCHLAG	ΔT_{MAX}	FESTIGKEITSKLASSE		FESTIGKEIT 12 h
			28 Tage	56 Tage	
		°C			> 2 N/mm ²
WT1	aufbereitet	10,4	C25/30	C30/37 (56)	ja
WN1	normal	9,5	C30/37	C30/37 (56)	nein
WT2	aufbereitet	9,2	C30/37	C35/45 (56)	ja
WN2	normal	7,4	C30/37	C30/37 (56)	ja
WT3	aufbereitet	7,1	C30/37	C30/37 (56)	ja
WN3	normal	5,4	C25/30	C30/37 (56)	nein
WT4	aufbereitet	12,3	C30/37	C35/45 (56)	ja
WN4	normal	10,7	C30/37	C35/45 (56)	ja

innenschale erforderte eine Ausschulfrist von 12 h mit einer Mindestfestigkeit von 2 N/mm², die von allen untersuchten Betonrezepturen bis auf WN1 und WN3 eingehalten wurde. Der Temperaturverlauf war zufriedenstellend; die Rezeptur WN3 – durch eine zusätzliche Versuchsserie bestätigt – zeigte eine geringe Temperatur- und damit verbunden auch ungenügende Festigkeitsentwicklung.

Resultierend aus diesen Versuchen konnten den Betonrezepturen – ohne Berücksichtigung des Vorhaltemaßes der Erstprüfung – die Festigkeitsklassen entsprechend der Tabelle 7 zugeordnet werden.

Von den acht untersuchten Betonrezepturen erfüllten sechs Rezepturen, hiervon alle vier mit aufbereitetem Tunnelausbruchmaterial, die definierten Anforderungen (Verarbeitbarkeit, Festigkeit, Temperaturentwicklung). Zwei Rezepturen mit kalzitischer Gesteinskörnung erreichten nicht die notwendigen Frühfestigkeiten und müssten weiterverbessert werden. Durch die Optimierung der Betonrezepturen ergab sich ein verbesserter ökologischer Fußabdruck, der einer Reduzierung von ca. 25 % (WT3/N3) bzw. 13 % (WT2/N2) CO₂-Äquivalent entsprach. Die verringerten Emissionen summieren sich zu einer Einsparung von ca. 500 kg CO₂ pro lfm Tunnel.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der Brenner Basistunnel befindet sich im Bau. Begleitet war die bisherige Entwicklung von laufenden Optimierungen bei der konstruktiven Durchbildung, der innovativen Umsetzung der Aufbereitung von Tunnelausbruchmaterial aus dem zyklischen Vortrieb unter beengten Platzverhältnissen mit einem hohen Maß an Flexibilität sowie der Bewältigung von betontechnologischen Herausforderungen im Umgang mit dem Tunnelausbruchmaterial und den Anforderungen an das Bauwerk.

Der Artikel mit Literaturliste kann bei BBT-SE angefragt werden.

AUTOREN

Prof. Dr. Konrad Bergmeister, konrad.bergmeister@bbt-se.com

DI Roland Arnold, roland.arnold@bbt-se.com

DI Dr. Tobias Cordes, tobias.cordes@bbt-se.com

DI Roland Murr, roland.murr@bbt-se.com

www.bbt-se.com

DI (FH) Harald Kogler, Swietelsky Tunnelbau,

harald.kogler@swietelsky.at

www.swietelsky.com