

Complex Support System

Komprimierbarer Ringspaltmörtel zur Bewältigung druckhafter Gebirgsbereiche bei TBM-Vortrieben mit starrem Tübbingausbau

Von Eckart Schneider, Klaus Rotter, Andreas Saxer und Rudolf Röck

Im Gegensatz zu konventionellen Vortrieben, die (fast) immer erfolgreich zu Ende geführt werden können, gab es bei TBM-Vortrieben eine Reihe von spektakulären Fehlschlägen. Zum Teil sind sie darauf zurückzuführen, dass recht blauäugig Projekte unter schwierigsten geologischen Verhältnissen mit ungeeigneten Vortriebsmaschinen und inadäquaten Ausbaukonzepten angegangen wurden. Beispiele dafür sind der 26 km lange Druckstollen des Wasserkraftwerks Chixoy in Guatemala, der ebenfalls 26 km lange Wasserüberleitungsstollen Yacambu in Venezuela, der 15,3 km lange Pilotstollen Severomuisk der Baikal-Amur-Magistrale in Russland und der 12,9 km lange Ping-Lin-Autobahntunnel in Taiwan. Zum Teil sind die Fehlschläge aber auch darauf zurückzuführen, dass die geologischen Verhältnisse erheblich von der Prognose abweichen. Von derart spektakulären Misserfolgen ist Europa wohl nicht zuletzt aufgrund der überlegteren Vorgehensweise von Auftraggebern, Planern und Unternehmern weitgehend verschont geblieben. Die Misserfolge sind aber lehrreich, weil sie die Grenzen des maschinellen Vortriebs deutlich machen.

Diese Grenzen liegen einerseits in der Nachbrüchigkeit des Gebirges (Auflockerungsdruck), andererseits in der Druckhaftigkeit (duktiler Gebirge) und Bergschlagerscheinungen (sprödes Gebirge) sowie in Störzonen. Mit der Schwerpunktverlagerung von Wasserstollen zu Verkehrstunneln haben die Schwierigkeiten proportional zum Ausbruchdurchmesser zugenommen.

Die Baufirmen und Maschinenhersteller haben darauf reagiert, indem sie auch für Vortriebe im Festgestein zunehmend Schildmaschinen zum Einsatz bringen. Nachbrüchiges Gebirge kann mit diesem Maschinentyp gut beherrscht werden. Bei Einsatz von Doppelschildmaschinen können in Verbindung mit einem geeigneten Tübbingausbau in nachbrüchigem Gebirge wesentlich höhere Leistungen erreicht werden als mit offenen Maschinen in Verbindung mit konventioneller Sicherung durch Anker, Bögen und Spritzbeton.

Die Vorteile von Schildmaschinen gegenüber offenen Maschinen werden zum Nachteil, sobald druckhaftes Gebirge angefahren wird. Mit offenen Maschinen kann druckhaftes Gebirge unter Einsatz konventioneller Stützmittel und Zusatzmaßnahmen durch eine erfahrene Mannschaft

noch einigermaßen bewältigt werden. Vortriebe mit Schildmaschinen und starrem Tübbingausbau stoßen an ihre Grenzen, wenn der Schild eingeklemmt wird oder der Tübbingausbau durch den Gebirgsdruck zerstört wird.

Um für kommende Großprojekte im alpinen und außereuropäischen Tunnelbau gerüstet zu sein, arbeitet die Tunnelbauindustrie seit längerem an neuen Vortriebssystemen. Den TBM-Herstellern ist es allerdings bisher nicht gelungen, Vortriebsmaschinen mit nachgiebigem Schild zur Anwendungsreife zu entwickeln. Vorerst bieten kurz gebaute TBM mit konischem Einzelschild die beste Lösung. Die viel gepriesenen Überschneideinrichtungen lassen in der Praxis noch viel zu wünschen übrig.

Viel versprechende Ansätze gibt es hingegen bei den Ausbausystemen. Mit konventionellen Stützmitteln kann zwar hinter offenen TBM ein nachgiebiger Ausbau hergestellt werden, jedoch ist diese Lösung mit vielen Schwierigkeiten und

Complex-Support – A New Method for Driving Tunnels Through Zones of Squeezing Rock with Shielded TBMs and Subsequent Segment-Lining

The Complex Support System shall facilitate tunnel driving through zones of squeezing rock with shielded TBM and subsequent segment-lining. For this purpose the annular gap between rock and segments, which could be increased by overcutting, will be filled with a compressible mortar. Under load this mortar will remain ductile over a period of 1 to 7 d. It can be compressed up to 50 % of its volume. During the compression phase the uniaxial compression strength increases from zero to the final value of 5 to 7 N/mm². Radial stresses at the rock surface will be reduced considerably. The load on the lining is significantly lower than by using any other method, for example filling the annular gap with pea gravel.

Das Complex-Verfahren soll das Durchdringen druckhafter Zonen mit Schildmaschinen und deren Ausbau mit einer starren Tübbingauskleidung erleichtern. Dazu wird der Ringspalt, der entsprechend den erwarteten Verformungen durch Überschneidung vergrößert wird, mit einem komprimierbaren Mörtel verfüllt. Der komprimierbare Mörtel lässt sich unter Belastung über einen längeren Zeitraum (wählbar zwischen 1 und 7 d) auf mindestens 50 % des Volumens zusammendrücken. Dabei steigt die einachsiale Druckfestigkeit kontinuierlich an, bis die Endfestigkeit von 5 bis 7 N/mm² erreicht ist. Infolge des verformungsbedingten Abbaus der Spannungen am Holraumrand – ablesbar von der Gebirgskennlinie – sind die auf den Tübbingausbau einwirkenden Kräfte deutlich geringer als bei einer Verfüllung des Ringspalts mit einem nicht komprimierbaren Material (zum Beispiel mit Perlkies oder Mörtel).

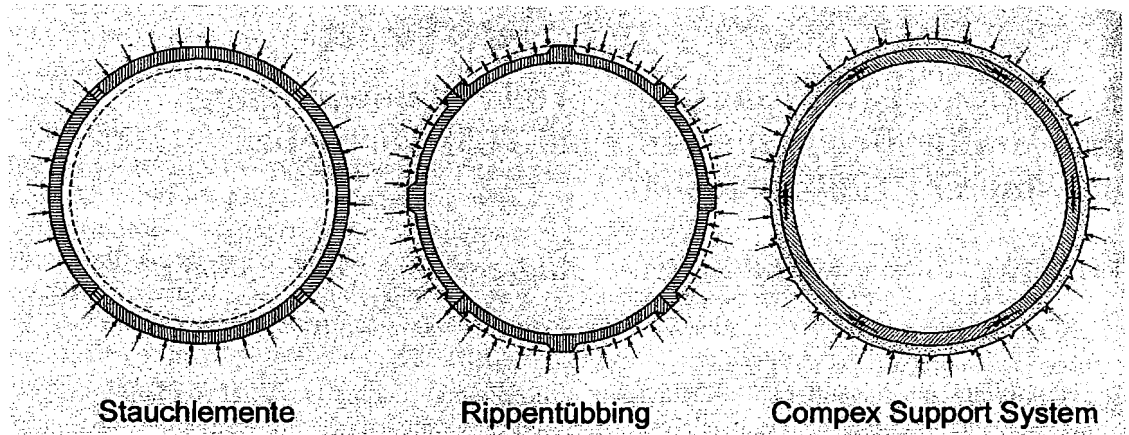


Bild 1 Systematische Darstellung der drei Systeme.

Fig. 1 Comparison of the three systems

großen Leistungseinbußen verbunden. Deshalb wird von den meisten Tunnelbauern die Entwicklung eines nachgiebigen Ausbausystems mit Tübbingungen favorisiert. Dafür gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten (Bild 1):

- ◇ Einbau von Stauchelementen in den Längsfugen,
- ◇ Starrer Tübbingring mit nachgiebiger Außenschale,
- ◇ Ringspaltverfüllung mit komprimierbarem Mörtel.

Die Ringspaltverfüllung mit komprimierbarem Mörtel, die unter dem Markennamen Complex Support System zur Anwendungsreife entwickelt wurde, wird im Folgenden vorgestellt.

Complex support system

Die Idee, den Ringspalt zwischen Tübbing und Gebirge mit einem komprimierbaren Mörtel zu verfüllen, um dem Gebirge die Möglichkeit zur Entspannung zu geben und dadurch die auf den Ausbau einwirkenden Kräfte zu verringern, ist nicht neu. 1979 wurde von der englischen Firma John Mowlem & Cie ein entsprechendes Patent angemeldet (1). Die Anmeldung bezog sich auf Tunnel, die mit Schildmaschinen vorgetrieben und mit Tübbingungen ausgekleidet werden sollten und beinhaltet „a deformable intermediate layer

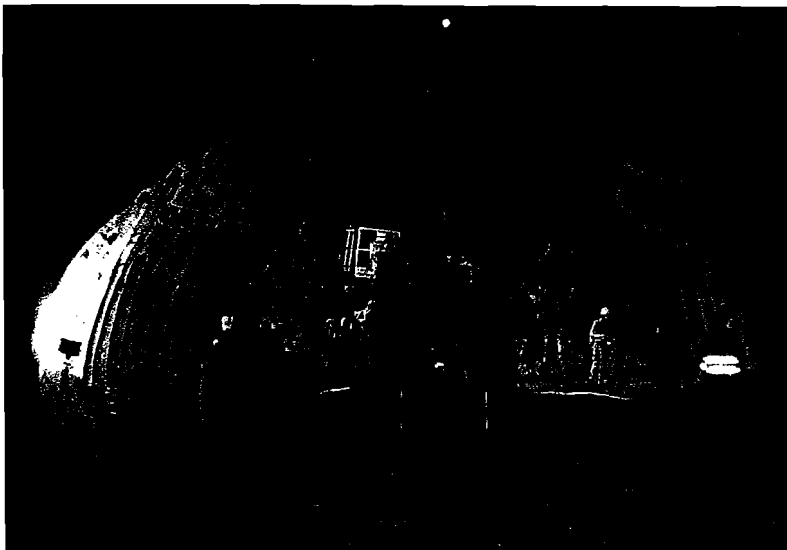
of a compressible material between the tunnel lining and the surrounding ground, the intermediate layer completely surrounding the lining.“ Dieses zum Patent angemeldete Verfahren sollte einerseits die Bettung der Tübbingungen verbessern, andererseits sollte es dem Gebirge soviel Verformung erlauben, dass ein Gleichgewicht hergestellt und die Last auf den Ausbau verringert wird.

In den 1990er-Jahren wurde im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts (2) ein Anlauf unternommen, um für die in den Alpen anstehenden Basistunnelprojekte neue Lösungen zu entwickeln. Ziel dieses von D2Consult geleiteten Projekts war „die Entwicklung eines voll mechanisierten Tunnelvortriebs mit einem einschaligen Ausbau aus Stahlbetontübbingungen für einen Einsatz im Tunnelbau bei hohen Gebirgsüberlagerungen“. Im Zuge dieses Forschungsprojekts wurden Quetsch- und Stauchelemente für die Längsfugen zwischen den Tübbingungen, Pressfugenbänder, Dichtungsfolien, Verbindungsmittel, Entspannungsventile, verformbare Anker und anderes entwickelt. Daneben wurden auch verformbare Materialien zur Ringspaltverpressung untersucht.

Unabhängig davon, das heißt ohne von den Vorgängern und Parallelentwicklungen Kenntnis zu haben, wurde von Klaus Rotter, einem in der Tunnelplanung tätigen Zivilingenieur aus Innsbruck, die Entwicklung eines Verfahrens zur Bewältigung druckhafter Strecken mit TBM in Angriff genommen. Dabei befasste sich Rotter neben Überlegungen zur Konstruktion eines neuen Vortriebsmaschinentyps intensiv mit der Entwicklung eines komprimierbaren Mörtels zur Ringspaltverfüllung. Nach einer Reihe von Vorversuchen, die er auf eigene Rechnung durchführen ließ, fand er Ende der 1990er-Jahre mit den Firmen Zementwerk Schretter und Cie, Vils, und Thermo Zell, Glanegg, industrielle Partner, die bereit waren, ihn bei der Weiterentwicklung des Verfahrens zu unterstützen. Die notwendigen Versuche wurden im Labor des Instituts für Baustofflehre der Bau fakultät Innsbruck durchgeführt. Die verfahrenstechnische und wirtschaftliche Seite wurde und wird vom Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement derselben Fakultät betreut.

Bild 2 Spritzbetonschale mit Stauchelementen im Strenger Tunnel.

Fig. 2 Shotcrete lining with yielding elements at Strenger Tunnel, Austria.



Die Entwicklung wurde ausschließlich auf die Ringspaltverfüllung beschränkt. Die Entwicklung eines neuen Vortriebsmaschinentyps, der für die Bewältigung druckhafter Verhältnisse besser geeignet ist als die zur Zeit verwendeten Einfach- und Doppelschildmaschinen mit starrem Schildmantel, wurde in ein gesondertes Forschungsprojekt ausgelagert (3).

Vergleich mit anderen Systemen

Bei konventionellen Vortrieben in druckhaftem Gebirge hat sich der achsparallele Einbau von Stauchelementen in der Spritzbetonschale als vorteilhaft erwiesen (Bild 2). Gegenüber der früher praktizierten Variante des Offenlassens der Schlitzte können die Stauchelemente Normalkräfte (Ringdruckkräfte) übertragen. Ein Nachteil ist, dass Querkräfte nur in sehr geringem Maß übertragen werden, was zu den in Bild 3 dargestellten Schäden führen kann.

Ähnliche Probleme sind bei asymmetrischer Belastung einer Tübbingauskleidung mit in den Längsfugen angeordneten Stauchelementen zu erwarten. Wenn die Anordnung der Tübbing-Längsfugen versetzt erfolgt, kann dieser Nachteil weitgehend vermieden werden. Unvermeidlich ist allerdings, dass es im Zuge der radialen Deformationen zu einer Translationsbewegung an der Außenseite der Tübbinge kommt, die das zur Ringspaltverfüllung verwendete Material und das anschließende Gebirge negativ beeinflusst.

Diese Nachteile werden vermieden, wenn ein starrer Tübbingausbau verwendet wird, bei dem die Längsfugen so ausgebildet werden, dass sie Querkräfte übertragen können. Die Verformungsmöglichkeit in radialer Richtung muss in diesem Fall entweder durch eine auf der Außenseite des Tübbings angebrachte verformbare Schicht oder durch einen komprimierbaren Mörtel bereitgestellt werden (Bild 4).

Die Vorteile einer Ringspaltverfüllung mit komprimierbarem Mörtel liegen auf der Hand:

- ◊ Schnelle und – falls gewünscht – aktive Stützung des Hohlraumrands,
- ◊ Gleichmäßige Bettung des Tübbingrings über dem gesamten Umfang,
- ◊ Vermeidung von punktförmigen Belastungen auf den Tübbingring,
- ◊ Wahl der Ringspaltstärke entsprechend dem notwendigen Verformungsweg des Gebirges,
- ◊ Geringere Belastung der Tübbinge infolge der Entspannung des Gebirges.

Der zuletzt genannte Vorteil lässt sich am besten anhand der Fenner-Pacher-Kurve zeigen. Ein mit Gebirgsparametern vom Brenner Basis-Tunnel gerechnetes Beispiel zeigt, dass bei Anwendung des Compex Support Systems der erforderliche Ausbauwiderstand um rund 30 % niedriger ist als bei einer Ringspaltverfüllung mit einem weitgehend steifen Material wie beispielsweise Perlkies (Bild 5).

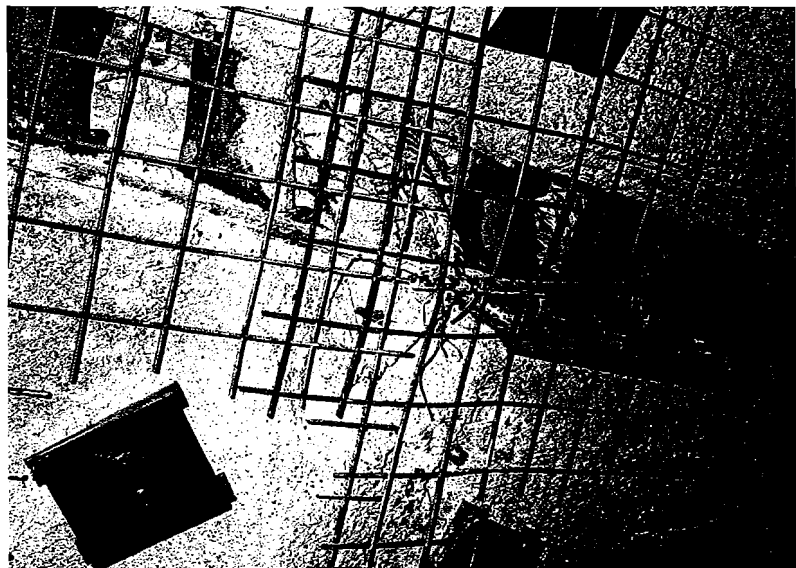


Bild 3 Schäden an einer Spritzbetonschale mit Stauchelementen (Foto Strenger Tunnel).

Fig. 3 Damaged shotcrete lining with yielding elements (Photograph of Strenger Tunnel).

Die positiven Aspekte einer Ringspaltverfüllung mit komprimierbarem Mörtel sind so groß, dass sich die Arbeitsgruppe entschloss, vorrangig diesen Weg weiter zu verfolgen. Parallel dazu wird von einer anderen Gruppe im Rahmen des Forschungsvorhabens TISROCK an der Entwicklung eines Tübbings gearbeitet, der eine radiale Deformation des Gebirges in begrenztem Umfang erlaubt. Dieses vom Erfinder Alois Vigl CO-CO (Convergence Compatible) getaufte Auskleidungssystem sieht Aussparungen auf der Außenseite des Tübbings vor, die zwischen Rippen liegen. In diese Aussparungen, die auch mit

Bild 4 Vergleich NÖT-Complex.

Fig. 4 Comparison NATM Complex.

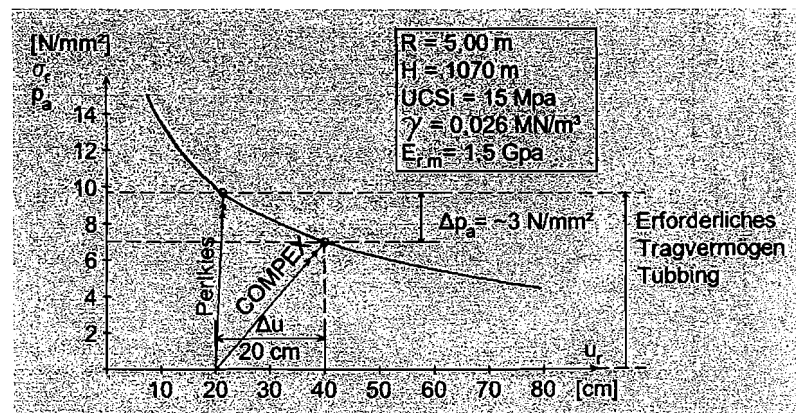
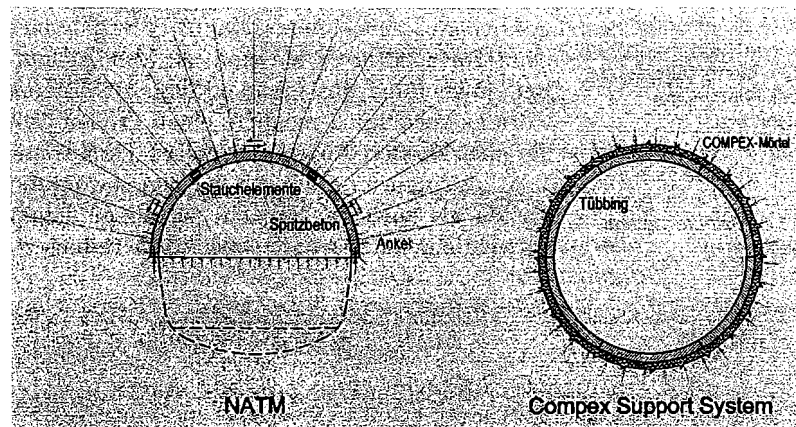


Bild 5 Interaktion Gebirge-Ausbau.

Fig. 5 Interaction rock mass-support.

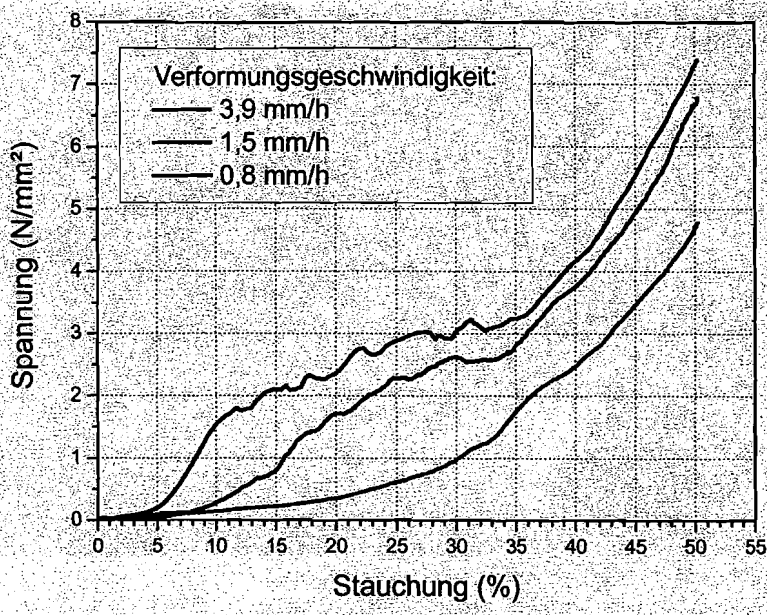


Bild 6 Last-Verformungskurven für jungen Compex-Mörtel (Alter 1 bis 7 d, behinderte Querdehnung).

Fig. 6 Load deformation curve for young Compex-mortar (age 1 to 7 d, restricted lateral expansion).

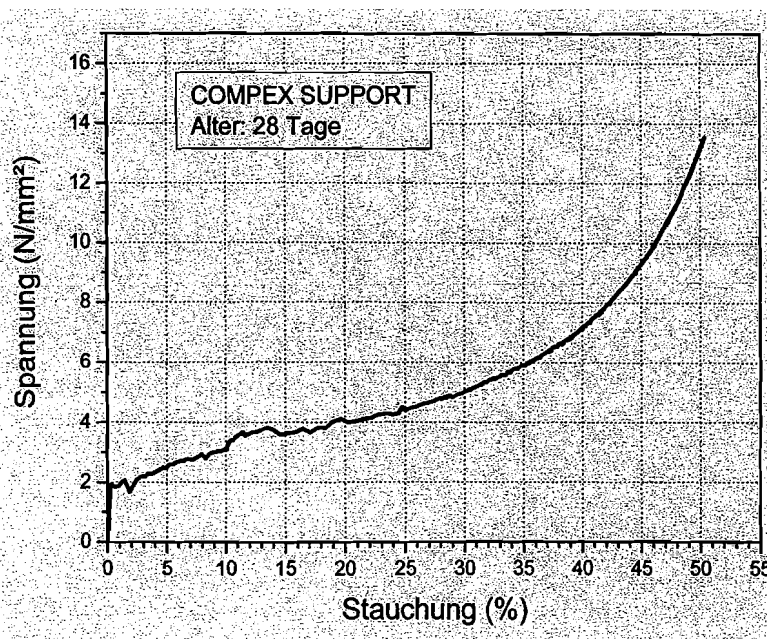
einem nachgiebigen Material gefüllt sein können, kann sich das Gebirge entspannen (4). In besonderen Fällen ist eine Kombination dieser beiden Lösungen oder ein Zusammenwirken von Compex und Stauchelementen denkbar.

Anwendungsbereich

Primäres Ziel der Entwicklung nachgiebiger Ausbausysteme mit Tübbingem ist es, die Durchörterung druckhafter Strecken im alpinen Tunnelbau, wie sie zum Beispiel im Nordabschnitt des Brenner Basistunnels oder beim Basistunnel Lyon-Turin zu erwarten sind, zu ermöglichen. Bei Anwendung des Compex Support Systems wäre es vermutlich möglich, einen großen Teil der druckhaften Abschnitte dieser Tunnel mit TBM aufzufahren. Dadurch würden sowohl die Kosten als auch die Bauzeit gegenüber einem konventionellen Vortrieb wesentlich reduziert.

Bild 7 Verformungskurven für alten Compex-Mörtel (Alter 28 d, behinderte Querdehnung).

Fig. 7 Load deformation curve for old Compex mortar (age 28 d, restricted lateral expansion).



In die 2002 fertig gestellte Machbarkeitsstudie für den Brenner Basistunnel, die den aktuellen Planungen zu Grunde liegt, sind derartige Überlegungen bereits eingeflossen (5).

Ein weiteres Anwendungsgebiet könnte sich bei Tunnelbauten im quellfähigen Gebirge ergeben. Für den von der Ontario Power Generation Company geplanten neuen Triebwasserstollen für die Sir Adam Beck Power Station an den Niagarafällen wurde vom Planer für die Auskleidung des über 10 km langen Druckstollens mit Innendurchmesser 12,5 m eine Variante mit „precast concrete lining and compressible mortar bedding“ ausgeschrieben.

Materialeigenschaften

Basierend auf der Grundidee „komprimierbarer Mörtel“ wurden hinsichtlich der Materialeigenschaften folgende Ziele definiert:

- ◊ Die Komprimierbarkeit des Mörtels im jungen Zustand soll mindestens 50 % betragen.
- ◊ Der Mörtel soll mit baustellenüblichen Förderpumpen (Schneckenpumpen, Schlauchpumpen, eventuell Kolbenpumpen) ausreichend lange (etwa 3 h) verarbeitbar und gut pumpfähig sein.
- ◊ Die Festigkeitsentwicklung des Mörtels soll nach einer anfänglichen schnellen Erhärtung im weiteren Verlauf sehr moderat vonstatten gehen, damit die durch Stauchung verursachten Mikrogefügeschäden wieder ausheilen können und ein homogen festes Gefüge entsteht.
- ◊ Nach drei Wochen Hydratation soll der Mörtel nur maximal 50 % seines Festigkeitspotenzials ausschöpfen, sodass auch bei länger anhaltenden Konvergenzen das Gefüge intakt bleibt.
- ◊ Der Verlauf der Festigkeitsentwicklung und die Höhe der Endfestigkeit sollen innerhalb gewisser Grenzen variabel sein, um eine bestmögliche Anpassung an die Gegebenheiten eines Projekts zu ermöglichen.

Die ersten drei Eigenschaften ließen sich durch entsprechende Konzeption des Bindemittels und des Zuschlagstoffs erreichen, während die vierte Eigenschaft (Modifikation der Festigkeitsentwicklung vor Ort) durch geeignete Wahl der Zuschlagkorndichte ermöglicht wurde.

Um die gewünschten Materialeigenschaften zu erreichen, wurden für das Bindemittel folgende Parameter angestrebt:

- ◊ Hohe Mahlfineinheit (Blaine-Wert $\approx 5\ 000\ \text{cm}^3/\text{g}$), um die nötige Viskosität zu gewährleisten, die für einen stabilen und trotzdem fließfähigen Polystyrolmörtel erforderlich ist. Der sehr leichte Zuschlagstoff Polystyrol, der eine spezifische Dichte von 28 bis 60 kg/m^3 aufweisen kann, darf nicht aufschwimmen.
- ◊ Geringer Wasserbedarf, damit bei einem W/B-Wert von 0,4 sowohl die Dauerhaftigkeit als auch die Endfestigkeit von mindestens 5 MPa erreicht wird.

- ◇ Ausreichend lange Abbindezeit, um die gewünschte Offenzeit von mindestens 3 h erreichen zu können.
- ◇ Schnelle Anfangserhärtung nach dem Erstarren und moderate weitere Festigkeitsentwicklung. Dies konnte nur mit einer Kombination von schnell und langsam erhärtenden Komponenten erzielt werden.

Trotz der teilweise widersprüchlichen Anforderungen ist es mithilfe eines Spezialzements in Abstimmung mit Zusätzen möglich, die vorgegebenen Eigenschaften zielsicher zu erreichen.

Laborversuche

Die Laborversuche konzentrierten sich zunächst auf die Herstellung und Verarbeitung des Compe-Mörtels. Durch Verwendung eines speziell zusammengesetzten zementösen Bindemittels konnte eine gut verarbeitbare beziehungsweise pumpbare Konsistenz des Mischguts erzielt werden. Die Mischungen selbst wurden mit einem Handmischer mit Quirlsinsatz hergestellt, wobei zuerst eine trockene Vermischung des Bindemittels und der Polystyrolkugeln und anschließend die Wasserzugabe erfolgte. Der W/B Wert lag im Bereich 0,4.

Die Laborversuche zum Verformungsverhalten bei Querdehnungsbehinderung wurden am frischen Mischgut und an ausgehärteten Prüfkörpern durchgeführt. Dabei werden das Mischgut beziehungsweise die Probekörper in eine Kunststoffschalung (Höhe 200 mm, Durchmesser 100 mm) eingebaut, die wiederum in eine Stahlschalung gebracht wird. Mittels Druckplatte wird die zur Verformung notwendige Kraft eingeleitet. Speziell beim frischen Mischgut wurde durch Einlegen von Gummidichtungen in die Stahlschalung eine Abdichtung erzielt, um das Auspressen von Wasser aus der frischen Mischung zu verhindern. Bei den Verformungsversuchen wurde eine Stauchung auf 50 % der ursprünglichen Prüfkörperhöhe (von 200 mm auf 100 mm) durchgeführt.

In Bild 6 sind die Last-Verformungskurven bei unterschiedlicher Verformungsgeschwindigkeit für eine Lasteinwirkung auf die frische Mischung dargestellt. Die Dichte der Styroporkugeln beträgt 28 kg/m³. In Abhängigkeit der Verformungsgeschwindigkeit ist zunächst ein Versatz des Lastanstiegs festzustellen. Je langsamer die Verformung vor sich geht, desto geringer ist die Stauchung, bei der ein Lastanstieg auftritt, was im Wesentlichen auf das Abbinden des Compe-Mörtels zurückzuführen ist. In der Folge ergeben sich mit abnehmender Verformungsgeschwindigkeit deutlich geringere Unterschiede in den Lasten für entsprechende Stauchungen. Auch hier spielt der Erhärtungsvorgang eine entscheidende Rolle, wobei bei längerer Reaktionszeit des Mörtels die Lasten für die Stauchungen „ähnlicher“ werden beziehungsweise die Abhängigkeit der Lasten von der Verformungs-

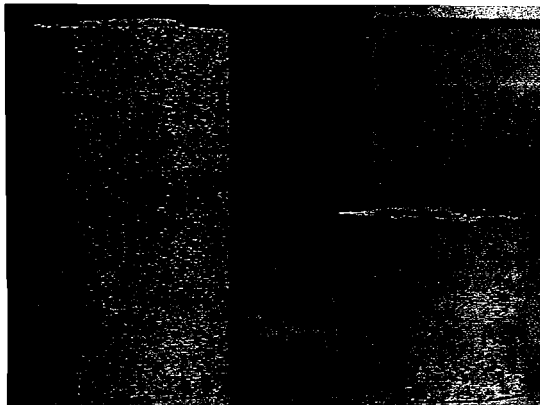


Bild 8 Compe-Prüfkörper vor und nach querdehnungsbehinderter Stauchung.

Fig. 8 Compe specimen before and after compression with restricted lateral expansion.

geschwindigkeit weniger stark ausgeprägt ist. Weiters ist zu erkennen, dass nach einer Stauchung von 30 bis 35 % ein deutlicher Anstieg der Lasten für die weitere Verformung auftritt.

Auch an 28 d alten Prüfkörpern wurden Druckversuche unter Querdehnungsbehinderung durchgeführt, ohne jedoch unterschiedliche Verformungsgeschwindigkeiten anzuwenden. Die resultierende Last-Verformungskurve ist in Bild 7 dargestellt.

In Bild 8 ist ein Prüfkörper aus Compe-Mörtel vor und nach querdehnungsbehinderter Stauchung auf 50 % der Ausgangslänge abgebildet. Wie ersichtlich, weist der Prüfkörper nach der Stauchung keinerlei Schädigung auf.

SSP BauConsult GmbH

UNIV. PROF. DI SCHNEIDER, DI DR. SPIEGL & PARTNER
INGENIEURBÜRO FÜR BAUBETRIEB & BAUWIRTSCHAFT

Schwerpunkte unserer Tätigkeit im Tunnelbau

Beratung und Gutachten für Auftraggeber

- Machbarkeitsstudie Brenner-Basistunnel
- Überprüfung Kostenschätzung Koralmtunnel
- Risikoanalyse Unterinntalstrecke
- Überprofil Strenger Tunnel

Nachtragerstellung u. Nachtragsunterstützung für Baufirmen

- Lötschberg-Basistunnel
- Gotthard-Basistunnel
- U-Bahn München
- Erkundungsarbeiten Koralmtunnel

Schlichtungs-, Schieds- u. Gerichtsgutachten

- 2. Röhre Plabutschunnel
- Gotthard-Basistunnel
- Brezno-Tunnel (Tschechien)
- Unterinntalstrecke

SSP BauConsult GmbH®

Technikerstr. 32
6020 Innsbruck
AUSTRIA

(t) +43/512/29 47 43
(f) +43/512/29 47 43 / 22
(@) office@sspbaconsult.at
(w) www.sspbaconsult.at

Tabelle 1 Materialtechnologische Eigenschaften (unbehinderte Querdehnung) von Compex-Mörtel.

Table 1 Technological properties of Compex mortar (unrestricted lateral expansion).

Druckfestigkeit 7 Tage	1,8 N/mm ²
Druckfestigkeit 28 Tage	2,0 N/mm ²
Dichte	600 kg/m ³
E-Modul 7 Tage	630 N/mm ²
E-Modul 28 Tage	1010 N/mm ²
Druckfestigkeit nach Stauchung auf 50 %; 33 Tage	3,0 N/mm ²

Neben den Untersuchungen zum Verformungsverhalten wurden auch die einachsiale Druckfestigkeit, Dichte und der E-Modul an zylindrischen Prüfkörpern (Höhe 200 mm, Durchmesser 100 mm) aus Compex-Mörtel bestimmt. Die Druckfestigkeit wurde auch an um 50 % gestauchten Prüfkörpern (nach querdehnungsbehindertem Druckversuch) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Besonders ist auf die Druckfestigkeit des auf 50 % gestauchten Prüfkörpers hinzuweisen, die

höher ist als für die ungestauchte Probe. Dies verdeutlicht eindrucksvoll, dass trotz der großen Stauchung keine Schädigung des Gefüges aufgetreten ist.

Verfahrenstechnik

Verfahrenstechnisch sind im Wesentlichen drei Probleme zu lösen:

- ◊ Mischen,
- ◊ Pumpen,
- ◊ Druck halten.

Das Mischen ist deshalb ein Problem, weil der bei Compex verwendete extrem leichte Zuschlagsstoff (Polystyrolkugeln mit einer Rohdichte von etwa 28 kg/m³) leicht aufschwimmt. Beim Pumpen können die elastischen Eigenschaften des Zuschlagsstoffs Schwierigkeiten bereiten. Dasselbe gilt bezüglich des Aufbaus und Haltens eines Überdrucks im Ringspalt, der für die satte Verfüllung und für das Aufbringen eines aktiven Ausbauwiderstands notwendig ist. Die Probleme beim Mischen konnten durch die Verwendung geeignet konzipierter Mischer und durch ein speziell entwickeltes Bindemittel gelöst werden. Für das Pumpen hat sich der Einsatz von Schneckenpumpen bewährt, es wäre aber auch die Verwendung von Schlauchpumpen denkbar.

Die bei der Verwendung eines Mörtels zur Ringspaltverfüllung zu lösenden Dichtungsaufgaben am TBM-Schild konnten leider noch nicht zur Gänze gelöst werden. Für die Abdichtung der Fuge zwischen Tübbing und Schild – der bekannten Schildschwanzfuge – gibt es bewährte Lösungen. Schwieriger ist die Abdichtung des Spalts zwischen Schild und Gebirge. Die bei der Verfüllung mit Perlkies für diesen Zweck verwendeten Federbleche sind für Mörtel unzureichend. Die Wirksamkeit anderer Mörtelsperren ist abhängig von der Qualität der gebohrten Tunnelwand. Überprofile im klüftigen Gebirge oder Ausbrüche sind nicht ohne weiteres zu beherrschen. Insbesondere wenn Überschnitte im dm-Bereich erforderlich sind, stoßen diese Systeme an ihre Grenzen. Zurzeit werden verlorene Mörtelsperren erprobt, ihr Einsatz scheint für die Zukunft durchaus Erfolg versprechend.

Großversuch

Ein weiteres Ziel der Entwicklung war der Nachweis, dass mit dem Compex-Mörtel ein aktiver Ausbauwiderstand aufgebracht werden kann. Dazu sollte der Mörtel mit einem Überdruck, der bis zur Erhärtung zu halten war, eingepresst werden. Aus felsmechanischer Sicht wäre es von Vorteil, wenn die Ringspaltverfüllung nicht erst am Schildschwanz, sondern im vorderen Bereich des Schilds ansetzen würde. Diese Lösung ist allerdings nur dann realisierbar, wenn es gelingt, die dabei auftretenden Abdichtungsprobleme zu lösen.

Bild 9 Ringraumkonstruktion aus Stahl.
Fig. 9 Testing device.



Bild 10 Konsistenz von Compex-Mörtel.
Fig. 10 Consistency of Compex mortar.



Die Frage, ob der Compex-Mörtel auch unter Druck in den Ringspalt zwischen Tübbing und Fels eingebracht und gehalten werden kann, konnte nur durch einen entsprechenden Simulationsversuch beantwortet werden. Zu diesem Zweck wurde ein künstlicher Ringspalt in Stahlausführung konstruiert (Bild 9).

Der Innendurchmesser dieses „Kleintunnels“ betrug 1,2 m, die Dicke des Ringspalts 15 cm. In diese Konstruktion wurde der Compex-Mörtel mittels Schneckenpumpe über 40 m Förderleitung bis zu einem Maximaldruck von 6 bar problemlos eingepresst. Der Druck fiel zwar in der Folge auf etwa 3,5 bar ab, konnte jedoch bis zur Erhärtung des Mörtels gehalten werden. Die bei diesem Versuch verwendete Mörtelkonsistenz bei einem W/B-Wert von 0,4 (fließfähig bis selbstnivellierend und trotzdem stabil) ist aus Bild 10 ersichtlich.

Zusammenfassung

Das Compex Support System hat die Erweiterung des Einsatzbereichs von Tunnelbohrmaschinen mit einfachem und teleskopierbarem Schild und nachfolgendem starrem Tübbingausbau zum Ziel. Bisher sind diese Systeme nur für standfestes und nachbrüchiges Gebirge (Gebirgsverhaltenstypen 1, 2 und 3 gemäß geomechanischer Planungsrichtlinie) unbeschränkt einsetzbar. Für den Vortrieb in druckhaftem Gebirge müssen sowohl die Vortriebsmaschinen als auch die Ausbausysteme weiterentwickelt werden. Das Compex Support System bietet eine nachgiebige und aktive Stützung des Hohlraumrands durch Verfüllung des Ringspalts zwischen Tübbing und Gebirge mit einem komprimierbaren Mörtel.

Die nach vielen Vorversuchen gefundene und in Labortests und Großversuchen zur Anwendungsreife entwickelte Lösung ist ein Polystyrolmörtel mit einem speziellen Bindemittel. Dieser Mörtel ist bei Querdehnungsbehinderung auf über 50 % seines Volumens zusammenpressbar, ohne dass eine Schädigung des Materials eintritt. Die Dauer der Verformung kann sich über 1 bis 7 d erstrecken, wobei die einachsige Druckfestigkeit des Materials nach einer ersten raschen Zunahme nur langsam ansteigt und erst am Ende des Abbindeprozesses stärker zunimmt. Die 7-d-Festigkeit liegt zwischen 5 und 7 N/mm² und kann durch die Wahl des Zuschlagsstoffs gesteuert werden.

Der für das Compex Support System entwickelte Mörtel ist materialtechnologisch voll durchgetestet. Die Verfahrenstechnik wurde in Großversuchen grund-

sätzlich abgeklärt. Noch nicht definitiv gelöst ist die Abdichtung des Ringraums zwischen Schildaußenseite und Gebirge.

Andere Fragen wie nach der Beständigkeit des Mörtels gegen aggressive Wässer, der Dauerfestigkeit bei Schwingungsbeanspruchung und ähnliche müssen noch durch Versuche geklärt werden.

Entscheidende Voraussetzung für eine Anwendung in großem Maßstab ist die vorgängige Herstellung einer Probestrecke. Sie soll dazu dienen, das erwartete Systemverhalten zu verifizieren und die Verfahrenstechnik zu vervollkommen. Es wäre schön, wenn ein solcher Großversuch bei einem der in Österreich angelaufenen Projekte wie Wienerwaldtunnel oder Tunnelkette Perschlingtal durchgeführt werden könnte.

Quellennachweis

1. UK Patent application GB 2013 757 A.
2. EUREKA, EU 1079 CONTUN.
3. TISROCK: *TBM-Tunnelling in squeezing Rock*. EUREKA E1 3160 TISROCK.
4. Vigl, A.: *TBM Support in Squeezing Rock – A Convergence-Compatible Segmental Lining System*. Felsbau 21 (2003), Nr. 6, S. 14-18.
5. Fellner, D. et al.: *Brenner Basistunnel – Geotechnische Prognose und Konzept für den TBM-Einsatz*. Felsbau 21 (2003) Nr. 5, S. 138-146.

Autoren

Univ.-Professor Dipl.-Ing. Eckart Schneider, i3b Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, Fakultät für Bauingenieurwesen Leopold-Franzens Universität Innsbruck, Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck, Österreich, E-Mail eckart.schneider@uibk.ac.at; Dipl.-Ing. Klaus Rotter, Innsbruck, Österreich, E-Mail klaus.rotter@tirol.com; Dr. Andreas Saxer, Institut für Baustofflehre und Bauphysik Fakultät für Bauingenieurwesen Leopold-Franzens Universität Innsbruck, E-Mail andreas.saxer@uibk.ac.at; Dr. Rudolf Röck, Laborleiter, Zementwerk Schretter & Cie, Vils, Österreich, E-Mail rudolf.roeck@schretter-vils.co.at

 **SCHRETTER & CIE**

Zement · Kalk · Gips · Spezialbaustoffe · Anwendungstechnik



mineralisch kreativ

Schretter & Cie

A-6682 Vils · Tirol

Tel.: +43 (0)5677/8401-0

Fax: +43 (0)5677/8401-222

office@schretter-vils.co.at · www.schretter-vils.co.at