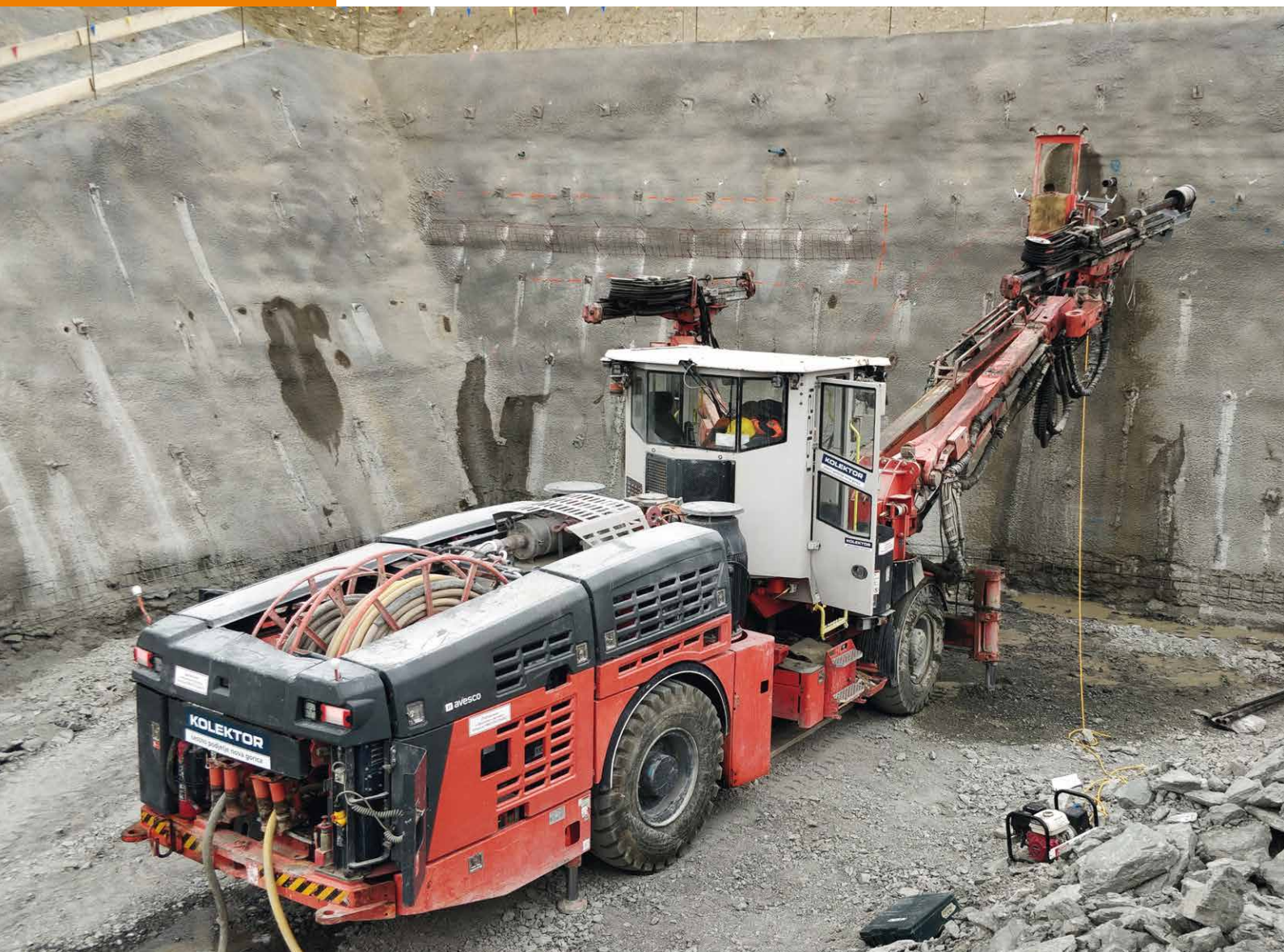


Geomechanics and Tunnelling

Geomechanik
und Tunnelbau



Use of a yielding zone to repair the Gotschna Tunnel

Einsatz einer Knautschzone bei der Sanierung des
Gotschnatunnels, Klosters (CH)

Marco Tschötschel, Hansgeorg Balhaus, Patrick Beeler, Markus Schwalt, Oliver Seith

Use of a yielding zone to repair the Gotschna Tunnel

Einsatz einer Knautschzone bei der Sanierung des Gotschnatunnels, Klosters (CH)

During the renovation of the Gotschna Tunnel from 2019 to 2020, prefabricated elements made of Compex were used for the first time as a deformable yielding zone in the invert zone. The client, construction management, construction company and supplier of the compressible elements worked closely together to implement the design specifications. Consequently, the expectations of the special building material in terms of the production quality of the prefabricated elements and handling on the construction site were more than met. The parties involved in the construction thus see potential for further applications and further developments of Compex.

Keywords COMPEX; deformation zone; compressible materials; swelling pressure; prefabricated elements

1 Initial situation

The Gotschna Tunnel opened in 2005 as part of the A28 Klosters bypass. Invert heave and cracks in the tunnel side walls due to anhydrite swelling were subsequently observed in two deformation zones. A remediation plan was devised which envisaged installing a new, reinforced invert arch and reinforcements to the tunnel lining in the affected zones. In addition, a deformable yielding zone was to be installed beneath the invert arch to absorb local peak swelling pressures and to delay the time taken for full swelling pressure to develop [1–3].

A study was undertaken to analyse and compare different reinforcement solutions based on the resistance and yielding principle. In the end, a combined solution was chosen (see Figure 2). The reinforcement the existing inner shell in accordance with the resistance principle lay at the heart of this strategy. The reinforcement measures included installing a robust invert arch along a length of 230 m (incl. replacing the carriageway, hard shoulder and utility lines) as well as partially increasing the thickness (200 m of tunnel lining) and replacing of six sections of tunnel lining that were too thin (60 m of tunnel lining). The consolidation measures are designed to ensure that the invert fails before the tunnel linings if the ultimate load is reached and that swelling processes do not cause any structural damage to the carriageway (tunnel arch, intermediate slab). The reinforcement of the standard profile was designed to be robust and to eliminate the weak point in the foundation area. The chosen shape of the invert arch with a 'pitch' 3.1 m below the carriageway axis achieves an optimum balance between an appropriate circular profile for the ideal flow of force and the flattest degree of curvature to

Bei der Sanierung des Gotschnatunnels im Zeitraum 2019 bis 2020 wurden erstmals Fertigteile aus Compex als deformierbare Knautschzone im Sohlgewölbe eingesetzt. Bei der konkreten Umsetzung der Vorgaben aus der Planung arbeiteten Bauherr, Bauleitung, Bauunternehmen und Knautschkörperlieferant eng und vertrauensvoll zusammen. So wurden die Erwartungen an den Sonderbaustoff in Bezug auf die Qualität bei der Herstellung der Fertigteile und dem Handling auf der Baustelle mehr als erfüllt. Die am Bau Beteiligten sehen daher Potential für weitere Anwendungen und Weiterentwicklungen von Compex.

Stichworte COMPEX; Deformationszone; Stauchmaterialien; Quelldruck; Fertigteile

1 Ausgangslage

Der 2005 eingeweihte Gotschnatunnel im Zuge der Schweizer Nationalstraße A28 bei Klosters wies infolge von Anhydritquellen Sohlhebungen und Rissbildungen im Parament in zwei Deformationszonen auf. Daher wurde ein Instandsetzungskonzept entwickelt, das in den betroffenen Zonen ein neues, bewehrtes Sohlgewölbe sowie Verstärkungen im Paramentbereich vorsah. Unterhalb des Sohlgewölbes sollte zusätzlich eine deformierbare Knautschzone angeordnet werden, die zum einen lokale Spitzenquelldrücke aufnehmen und zum anderen den Zeitpunkt der Einwirkung des vollen Quelldrucks hinauszögern kann [1–3].

Im Rahmen eines Variantenstudiums wurden Verstärkungslösungen auf Basis des Widerstands- und des Ausweichprinzips analysiert und einander gegenübergestellt. Der Entscheid wurde letztlich zugunsten einer sogenannten Kombilösung getroffen (siehe Bild 2). Den Kern dieses Konzepts bildet die Verstärkung der bestehenden Innenschale, dimensioniert nach dem Widerstandsprinzip. Die Verstärkung beinhaltet den Einbau eines robusten Sohlgewölbes auf insgesamt 230 m (inkl. Ersatz von Fahrbahn, Banketten und Werkleitungen) sowie das teilweise Vorbetonieren (200 m Paramentseite) bzw. den Ersatz von sechs Tunnelparamenten (60 m Paramentseite) mit ungenügender Stärke. Die Ertüchtigungsmaßnahmen sind so konzipiert, dass das Sohlgewölbe im Traglastfall vor den Paramenten versagt und es infolge der Quellprozesse nicht zu einem Tragsicherheitsproblem im Bereich des Fahrtraums (Tunnelgewölbe, Zwischendecke) kommen kann. Die Verstärkung des Normalprofils wurde auf Robustheit und auf die Elimination des Schwachpunkts im Fundamentbereich ausgelegt. Die gewählte Form des Sohlgewölbes mit

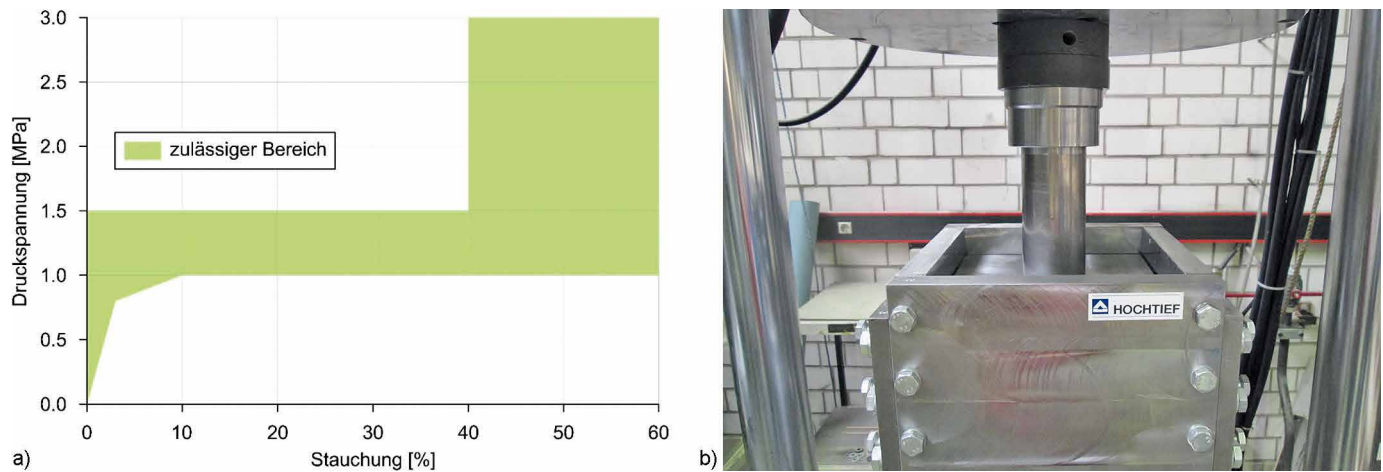


Fig. 1 Stress-strain behaviour of the compressible material: a) specification; b) test rig

Bild 1 Spannungs-Stauchungsverhalten des Knautschmaterials: a) Vorgaben; b) Prüfstand

improve executability. In addition to the reinforcement measures, a full yielding zone was to be inserted below the invert arch which permits swelling-induced heave by applying comparatively high, virtually constant counter-pressure and, at the same time, is highly compressible. The aim of combining reinforcement measures with a yielding zone was to delay the time taken for full swelling pressure to develop and offset local peak swelling pressures [3].

2 Compressible material for the yielding zone

Studies were undertaken to compare the quality of different materials on the basis of existing documentation. As well as materials developed specifically for tunnel construction, products from other sectors of the construction industry were also considered. The key requirements for these materials are outlined below:

- Load-deformation behaviour: The material should ideally exhibit elastic to ideal-plastic behaviour combined with high initial stiffness (Figure 1a). The minimum compression value for cost-effective use was deemed to be 30 %. A pressure of 1.6 MPa acting at the centre of the invert was specified as the design swelling pressure. During compression of the material, the design pressure must not be exceeded before the minimum compression value is reached (peak strength). The high initial stiffness minimises the loosening of rock and subsequent triggering of further swelling processes. Furthermore, the invert arch is rigidly embedded to optimise the load-bearing capacity of the tunnel lining in the event of horizontal swelling pressure.
- Load transfer: To ensure that the yielding zone effectively absorbs and offsets localised swelling pressure peaks, the required material behaviour must be fully guaranteed.
- Durability: The Gotschna Tunnel contains aggressive, strongly sulphate-bearing groundwater with a high concentration of SO_4^{2-} (3000 to 5000 mg/l). These ambient conditions should not result in any significant

einem Stichmaß von 3,1 m unter der Fahrbahnachse stellt ein Optimum zwischen dem für den idealen Kräftefluss geeigneten Kreisprofil und der möglichst flachen Ausrundung im Hinblick auf eine bessere Ausführbarkeit dar. Zusätzlich zu den Verstärkungsmaßnahmen ist unterhalb des Sohlgewölbes eine vollflächige Knautschzone vorgesehen, welche die Quellhebungen bei vergleichsweise hohem, quasi konstantem Gegendruck zulässt und gleichzeitig ein großes Stauchungsvermögen aufweist. Durch Kombination der Verstärkung mit einer Knautschzone wird der Zeitpunkt der Einwirkung des vollen Quelldrucks zeitlich hinausgezögert und lokal auftretende Spitzenquelldrücke ausgeglichen [3].

2 Knautschzonenmaterial

Im Rahmen einer Variantenuntersuchung wurden verschiedene Materialien auf Basis bereits vorhandener Dokumentationen qualitativ einander gegenübergestellt. Neben explizit für den Tunnelbau entwickelten Materialien wurden dabei auch Produkte anderer Baubereiche berücksichtigt. Die wichtigsten Anforderungen an die Materialien sind nachfolgend erläutert:

- Last-Verformungs-Verhalten: Das Materialverhalten soll möglichst elastisch bis ideal-plastisch sein, in Verbindung mit einer hohen Anfangssteifigkeit (Bild 1a). Als minimales Stauchmaß für einen wirtschaftlichen Einsatz wurde ein Wert von 30 % festgelegt. Als Dimensionierungsquelldruck wurde ein im mittigen Bereich der Sohle wirkender Druck von 1,6 MPa angesetzt. Dieser darf während der Stauchung des Knautschmaterials vor dem Erreichen des minimalen Knautschmaßes nicht überschritten werden (Spitzenfestigkeit). Die hohe Anfangssteifigkeit minimiert Gebirgsauflockerungen und infolgedessen neu induzierte Quellprozesse. Zudem ist das Sohlgewölbe steif gebettet, was die Tragfähigkeit der Paramente bei horizontaler Quelldruckbelastung optimiert.
- Lastabtragung: Um die lokal auftretenden Quelldruckspitzen effektiv mit einer Knautschzone abzufangen

impairment of the yielding zone. The functional integrity of the material must be guaranteed throughout its residual life.

- Construction workflow: It is envisaged that the construction work will be carried out in stages during three construction windows of between ten and 13 weeks in a continuous operation. The very tight schedule and complex construction process in an extremely confined space require prefabricated parts to be used for the assembly and installation of the yielding zone.

The studies showed that three materials satisfy the requirements and are thus potentially suitable for use as the compressible medium [3]:

- Material 1: cement matrix with porous foam glass aggregates
- Material 2: cement matrix with porous polystyrene aggregates
- Material 3: foam mortar.

The client – the Bellinzona division of the Swiss Federal Roads Office (Astra) – commissioned the Swiss materials testing laboratory EMPA Dübendorf to conduct preliminary trials to reassess the suitability of these three materials from different manufacturers and to verify compliance with the above-mentioned requirements stipulated by the design engineer (IG GOST, comprising Aegerter & Bosshardt AG, Basel and Lombardi AG, Lucerne).

All three materials complied with the required load-deformation behaviour. All test series showed a pronounced stress plateau in the range from 0.8 to 1.4 MPa, whereby Material 1 had the lowest compression capacity at around 30 %, compared with Materials 2 and 3 at over 50 %. Ultimately, sulphate resistance was the main criterion for suitability or exclusion. Material 3 did not meet the requirements for sulphate-resistance. In contrast, storage in sulphate was found to have no significant effect on Materials 1 and 2. Microscopic investigations identified low concentrations of calcite in the overall material composition of Material 2, indicating that it was less susceptible to thaumasite formation and damage than Material 1. Due to its high compression capacity (even when saturated with water), high sulphate resistance and low risk of thaumasite damage, Material 2 (Compex, previously called DeCo Grout) was chosen as the compressive media for repairing the Gotschna Tunnel [3].

This hydraulically bound construction material has a defined and adjustable compression behaviour. It was developed jointly by Schretter & Cie GmbH & Co KG and Hochtief Engineering GmbH [4, 5]. The material was initially used as a deformable annular gap grout to counter squeezing rock deformations in mechanised tunnelling. It was first used in the Jenbach Tunnel on the approach to the Brenner Base Tunnel [6] and in the test gallery of the French radioactive waste management agency ANDRA in Bure [7].

und auszugleichen, muss das geforderte Materialverhalten vollflächig sichergestellt werden können.

- Dauerhaftigkeit: Im Gotschnatunnel ist aggressives, stark sulfathaltiges Bergwasser mit hoher Konzentration von SO_4^{2-} (3000 bis 5000 mg/l) vorhanden. Die vorliegenden Umweltbedingungen dürfen zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung der Knautschzone führen. Die Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit muss während der Restnutzungsdauer gegeben sein.
- Bauablauf: Die Realisierung ist etappenweise in drei Bauzeitfenstern von zehn bis 13 Wochen im Durchlaufbetrieb vorgesehen. Die sehr enge Zeitvorgabe und die komplexen Bauabläufe auf engstem Raum bedingen den Ein- und Aufbau der Knautschzone aus Fertigteilen.

In Variantenuntersuchungen hat sich gezeigt, dass drei Materialien die erwähnten Anforderungen erfüllen können und somit potenziell als Knautschmaterial geeignet sind [3] und zwar:

- Material 1: Zementmatrix mit porösen Zuschlägen aus Glasschaum,
- Material 2: Zementmatrix mit porösen Zuschlägen aus Polystyrol,
- Material 3: Schaummörtel.

Auf Veranlassung des Bauherrn Bundesamt für Strassen (Astra), Filiale Bellinzona, wurden diese Materialvarianten verschiedener Hersteller an der EMPA Dübendorf gemäß den oben genannten spezifischen Anforderungen der Planer (IG GOST, bestehend aus Aegerter & Bosshardt AG, Basel, und Lombardi AG, Luzern) hinsichtlich ihrer Eigenschaften in Vorversuchen untersucht und anschließend erneut auf ihre Eignung bewertet.

Das geforderte Last-Verformungs-Verhalten konnte von allen drei Materialien eingehalten werden. Sämtliche Versuchsreihen wiesen ein ausgeprägtes Spannungsplateau im Bereich zwischen 0,8 bis 1,4 MPa auf, wobei Material 1 mit rund 30 %, verglichen mit den Materialien 2 und 3 mit > 50 %, das geringste Stauchungsvermögen besaß. Letztlich war die Sulfatbeständigkeit das zentrale Eignungs- bzw. Ausschlusskriterium. Material 3 konnte als nicht sulfatbeständig beurteilt werden. Bei den Materialien 1 und 2 stellte man hingegen keinen wesentlichen Einfluss bei der Sulfatlagerung fest. Aufgrund des mit der Mikroskopie festgestellten geringen Anteils von Calcit an der Gesamtmaterialzusammensetzung konnte Material 2 im Vergleich zu Material 1 zudem als weniger gefährdet bezüglich Thaumasitbildung bzw. -schädigung beurteilt werden. Aufgrund des hohen Stauchungsvermögens (auch unter Wassersättigung), der hohen Sulfatbeständigkeit und der geringen Gefährdung bezüglich Thaumasitschädigung entschied man sich für Material 2 als Knautschmaterial für die Instandsetzung des Gotschnatunnels [3], d.h. Compex (früher auch mit DeCo Grout bezeichnet).

Compex comprises a binder premix (with additives), polystyrene beads of a defined quality, and water. The desired stress level and compression behaviour can be modified by adjusting the composition of the binder, the type and quantity of polystyrene beads, and the water-cement ratio [8].

The design engineers' tender specifications were based on the results of the above-mentioned suitability tests. Figure 1 shows the required compressive stress-strain behaviour and the test setup to determine this characteristic. The test was conducted on cubes with an edge length of 200 mm which were installed in steel formwork using positive-locking connecting elements. Deformation-controlled compressive strain was induced by applying a pressure plate with an edge length of 197 mm at a constant deformation rate until the compression value was at least 50 % or the compressive stress reached 3 MPa.

3 Remediation work

Work to repair the Gotschna Tunnel was scheduled to be carried out in three stages at low season when traffic is lighter: Spring 2019 (end of March to mid-June), Autumn 2019 (beginning of October to beginning of December) and Spring 2020 (end of March to end of June) [9]. On completion of the final stage of work, the tunnel was reopened on 15 July 2020.

The Swiss Federal Roads Office (ASTRA) awarded the contract to carry out the repairs to Swiss construction company Implenia Schweiz AG. This contract did not include the production and supply of the compressible elements. A separate contract for this service was awarded to Hochtief Engineering GmbH.

This contract, which will be examined in more detail below, included the manufacture and supply of chamfered, rectangular compressible elements with dimensions $L \times W \times H = 58.8 \text{ cm} \times 38(39) \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ weighing approx. 25 kg each and suitable for manual handling. These were installed in a continuous layer underneath the new invert arch in the chosen deformation zones (Figure 2).

Initial concerns on the part of those involved in the construction about the special treatment given to this supplier were soon allayed after the first experiences of using the construction material (Figure 3). The quality of the compressible elements and the ease of handling on the construction site justified the leap of faith taken by the client and the design engineer.

4 Manufacturing the compressible elements

As stipulated in the contract, the formulation was adjusted during preliminary trials conducted before production.

Dieser hydraulisch gebundene Baustoff weist ein definiertes und justierbares Kompressionsverhalten auf. Er wurde gemeinsam von der Schretter & Cie GmbH & Co KG und der Hochtief Engineering GmbH entwickelt [4, 5]. Zuvorderst wurde das Material als verformbarer Ringspaltmörtel beim maschinellen Tunnelbau eingesetzt, wenn druckhafte Gebirgsverformungen zu erwarten waren. Erste Anwendungen dazu erfolgten beim Tunnel Jenbach des Brennerzulaufs [6] oder im Versuchsstollen für ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs) in Bure [7].

Compex besteht aus einem Binder-Premix (mit Zusatzstoffen und Zusatzmitteln), Polystyrolkugeln einer definierten Qualität und Wasser. Über die Zusammensetzung des Binders, die Art und Menge der Polystyrolkugeln sowie den Wasser-Zement-Wert lässt sich das gewünschte Spannungsniveau und das Kompressionsverhalten einstellen [8].

Die Vorgaben der Planer im Rahmen der Ausschreibung lehnten sich an die Ergebnisse der oben erwähnten Eignungsprüfungen an. Bild 1 zeigt das geforderte Spannungs-Stauchungsverhalten und den Versuchsaufbau zur Ermittlung dieser Eigenschaft. Die Prüfung wird an Würfeln mit einer Kantenlänge von 200 mm durchgeführt, die in einer Stahlschalung formschlüssig eingebaut werden. Die Stauchung erfolgt verformungsgesteuert mit einer Druckplatte der Kantenlänge von 197 mm bei einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit, bis mindestens 50 % der Stauchung oder eine Druckspannung von 3 MPa erreicht sind.

3 Ausführung der Sanierung

Die Sanierung des Gotschnatunnels wurde auf verkehrsarme Jahreszeiten (Nebensaison) verlegt und in drei Etappen vorgenommen, d.h. im Frühlingsbauzeitfenster 2019 (Ende März – Mitte Juni) und Herbstbauzeitfenster 2019 (Anfang Oktober – Anfang Dezember) sowie im Frühlingsbauzeitfenster 2020 (Ende März – Ende Juni) [9]. Nach Abschluss der Arbeiten im Zuge der letzten Schließung erfolgte die Wiedereröffnung am 15. Juli 2020.

Die Ausführung der Instandsetzung wurde vom Bundesamt für Strassen (ASTRA) an die Implenia Schweiz AG vergeben. Ausgenommen davon war die Herstellung und Lieferung von Knautschelementen. Mit dieser Leistung wurde die Hochtief Engineering GmbH separat beauftragt.

Dieser Auftrag, auf den nachfolgend näher eingegangen werden soll, beinhaltete die Herstellung und Lieferung von ca. 25 kg schweren, händisch verlegbaren, abgeschrägten quaderförmigen Knautschelementen der Abmessungen $L \times B \times H = 58,8 \text{ cm} \times 38(39) \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$. Diese wurden vollflächig unterhalb des neuen Sohlgewölbes in ausgewählten Deformationszonen eingebaut (Bild 2).

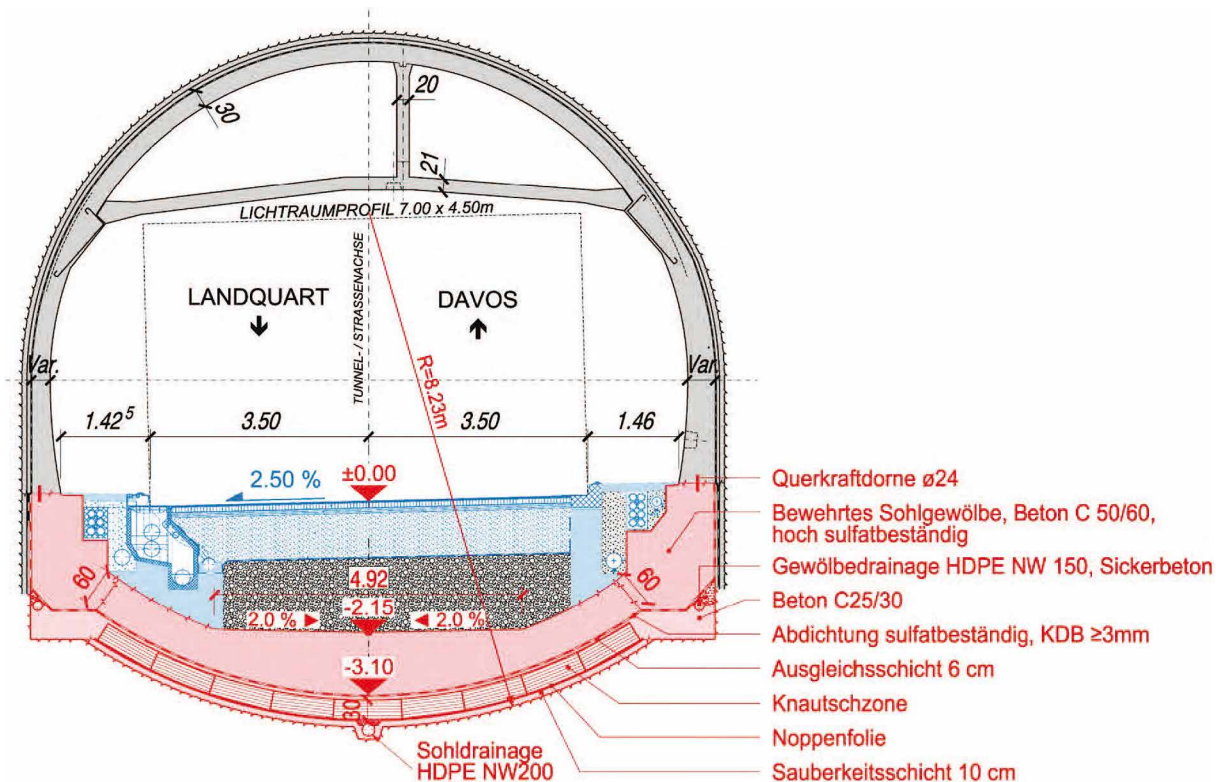


Fig. 2 Repair of the invert arch in a deformation zone [3]

Bild 2 Instandsetzung des Sohlgewölbes in einer Deformationszone [3]



Fig. 3 Invert with yielding elements laid in position (photo from 9 May 2019)

Bild 3 Sohle mit ausgelegten Knautschelementen (Foto vom 9. Mai 2019)

In total, eleven trial mixes were analysed to establish the basic formulation, the upper and lower limit for fresh concrete density (as a factory production control test) and the compression tests to be undertaken. Figure 4 shows the compressive stress-strain behaviour of the chosen basic formulation at 28 days.

The stress-strain tests that form part of the factory production control process were performed and documented in accordance with the client's inspection plan, which stipulated:

Die anfänglichen Bedenken aufgrund dieser Sonderstellung eines Lieferanten bei den am Bau Beteiligten wurden spätestens nach den ersten Erfahrungen mit dem Baustoff zerstreut (Bild 3). Die Qualität der Knautschelemente und das Handling unter Baustellenbedingungen erwiesen sich als unproblematisch, sodass sich der Vertrauensvorschuss seitens Bauherren und Planer als gerechtfertigt erwies.

4 Herstellung der Knautschelemente

Vertragsgemäß wurden im Vorlauf zur Produktion Vorversuche zur Anpassung der Rezeptur durchgeführt. Die Auswertung von insgesamt elf Eignungsmischungen führte zur Festlegung der Basisrezeptur, des oberen und unteren Grenzwerts für die Frischbetonrohddichte (als Kontrollprüfung bei der Herstellung) sowie der durchzuführenden Stauchversuche. Bild 4 zeigt das Spannungs-Stauchungsverhalten der gewählten Basisrezeptur im Alter von 28 Tagen.

Die im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle durchzuführenden Spannungs-Stauchungsversuche und deren Dokumentation erfolgte in Abstimmung mit dem Kontrollplan des Bauherren, der als Vorgaben enthielt:

- Maßtoleranzen am fertigen Knautschelement: Toleranz Länge und Breite je ± 5 mm; Höhe in Elementmitte = Stich mit max. ± 10 mm,
- Last-Verformungsverhalten: Spannungs-Stauchungsversuch an Würfeln $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ mit

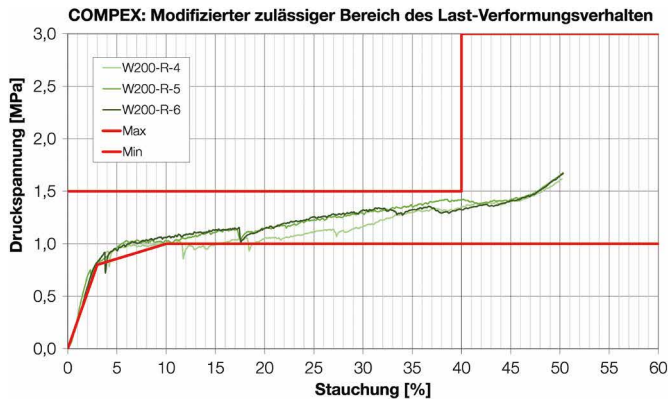


Fig. 4 Compressive behaviour of selected basic formulation compared with permitted range

Bild 4 Stauchverhalten der gewählten Basisrezeptur im Vergleich zum zulässigen Bereich

- Dimensional tolerances of the finished compressible element: Length and width tolerance ± 5 mm; height at middle of element = pitch max. ± 10 mm,
- Load-deformation behaviour: Stress-strain test on $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ cubes in dry state with restricted lateral expansion (see Figure 1b). The test period is to be determined on the basis of the preliminary tests. Comparability with the requirements must be achieved (see Figure 1a).
- Transport and storage: Integrity of the compressive elements, max. dimensions of chamfered corners $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, max. dimensions of compression points $10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ ($L \times W \times D$).

From the preliminary trials, it was deduced that it would be sufficient to select one cube with an edge length of 200 mm per production day for compression testing, which would be performed after at least 28 days. The basic formulation was also chosen because in the compressive stress-strain test the same stress values at 40% compression were recorded as for the 60-day specimens. The binder specifications for the basic formulation stipulated by Schretter & Cie GmbH & Co KG in Vils (Tirol) were converted so that the binder could be delivered by tanker.

The compressible elements were produced at Hochtief Engineering's Innovation & Testing Center in Moerfelden-Walldorf near Frankfurt am Main (Figure 5). As part of the factory production control process, it was important to ensure that the feedstock batch, mixing ratio, fresh concrete density and results of the compression test were reliably documented for each compressible element for traceability purposes. Each element was stamped with a traceability code. For the compression tests, it was stipulated that one cube with an edge length of 200 mm was to be selected per production day and tested after at least 28 days.

The test results were sent to the client and design engineer each week to notify them of the production status and quality obtained. Figure 6 shows an example of a



Fig. 5 Production of compressible elements

Bild 5 Herstellung der Knautschelemente

- behinderter Seitendehnung im trockenen Zustand (vgl. Bild 1b). Der Zeitpunkt der Prüfung ist aus Vorversuchen zu bestimmen. Sicherstellung der Vergleichbarkeit mit den Anforderungen (vgl. Bild 1a),
- Transport und Lagerung: Integrität der Knautschelemente, max. Dimensionen abgeschlagener Ecken $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, max. Dimensionen von Druckstellen $10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ ($L \times B \times T$).

Aus den Vorversuchen konnte abgeleitet werden, dass es ausreichend ist, je Produktionstag einen Würfel mit 200 mm Kantenlänge herzustellen, der ab einem Mindestalter von 28 Tagen im Stauchversuch zu prüfen ist. Die Basisrezeptur wurde auch deshalb ausgewählt, da hierbei im Spannungs-Stauchungsversuch die gleichen Spannungswerte bei 40%-Stauchung wie bei den Proben im Alter von 60 Tagen ermittelt wurden. Für die Bindemittelherstellung wurden die Vorgaben aus der Basisrezeptur von Schretter & Cie GmbH & Co KG in Vils (Tirol) umgesetzt, sodass das Bindemittel mit Silofahrzeug angeliefert werden konnte.

Die Herstellung der Knautschelemente erfolgte im Innovation & Testing Center der Hochtief Engineering GmbH in Mörfelden-Walldorf bei Frankfurt am Main (Bild 5). Im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle war dafür Sorge zu tragen, dass für jedes Knautschelement die Charge der verwendeten Ausgangsstoffe, die Mischungsvorgaben, die Frischbetonrohddichte und die Ergebnisse des Stauchversuchs nachvollziehbar dokumentiert wurden. Die Rückverfolgbarkeit wurde durch einen Stempelcode auf jedem Element sichergestellt. Für die Stauchversuche wurde festgelegt, je Produktionstag einen Würfel mit einer Kantenlänge von 200 mm herzustellen und in einem Alter von mindestens 28 Tagen zu prüfen.

Bauherr und Planer erhielten diese Daten wöchentlich und waren somit über den Produktionsstand und die erreichte Qualität informiert. Bild 6 zeigt ein Beispiel für einen dokumentierten Stauchversuch. Astra, Projektverfasser sowie Oberbauleitung (ILF Beratende Ingenieure

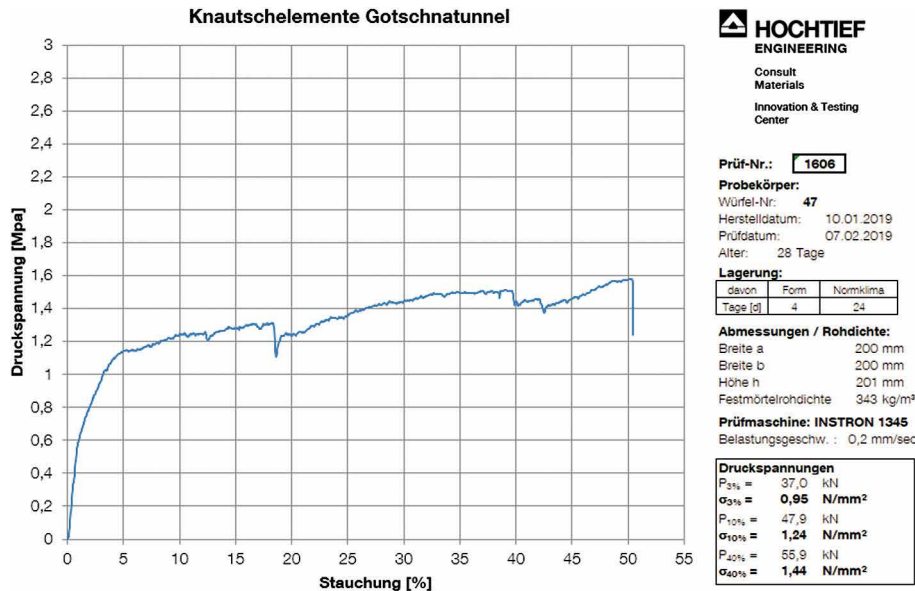


Fig. 6 Example of a documented compression test
Bild 6 Beispiel für einen dokumentierten Stauchversuch

documented compression test. During a factory inspection on 22 February 2019, Astra, the project design engineer and the senior project manager (ILF Beratende Ingenieure AG, Zürich) were reassured that production complied with the requirements of the supply contract. The documented factory production controls and weekly reports meant that the quality of the compressible elements could be demonstrated. As a result, the client did not ask for any further specimens to be sent to Empa Dübendorf for testing during the production period.

5 Supplying the compressible elements

Due to the lack of space on site and the three construction windows, the compressible elements were supplied in three stages on a precisely agreed day. This was done in close consultation with the construction company Implenia Schweiz AG and the project manager (IG Gost). After production, the compressible elements were stored temporarily in a covered storage area.

Each pallet contained 16 stamped compressible elements which were shrink-wrapped at least ten days after production to allow the majority of dry shrinkage to abate. Each pallet was supplied with a delivery note indicating the corresponding number of elements, which was inspected on arrival on site. Depending on the construction window, the day before the agreed delivery date, five to seven trucks were loaded with the required number of compressible elements for transportation to the scheduled unloading area on the construction site the next day.

6 Résumé and outlook

In addition to the reinforcement measures, the repairs to the Gotschna Tunnel also included a full-surface yielding zone made from prefabricated Compex components

AG, Zürich) überzeugten sich bei einer Werkkontrolle am 22. Februar 2019 von der Herstellung und der Einhaltung der Vorgaben aus dem Liefervertrag. Die vereinbarte Werkseigene Produktionskontrolle, deren Dokumentation und wöchentlicher Rapport sowie die dadurch nachgewiesene Qualität führten dazu, dass seitens des Bauherrn über den Herstellzeitraum keine zusätzlichen Prüfkörper zwecks Versand und Prüfung bei der Empa Dübendorf abgefragt worden.

5 Lieferung der Knautschelemente

Wegen der engen Platzverhältnisse auf der Baustelle und der drei Bauzeitfenster erfolgte die Anlieferung ebenfalls in drei Etappen und musste taggenau vereinbart werden. Dies geschah in enger Absprache mit dem Bauunternehmen Implenia Schweiz AG und der Bauleitung (IG Gost). Zur Zwischenlagerung nach der Herstellung waren die Knautschelemente in einer überdachten Lagerhalle untergebracht.

Auf jeder Palette befanden sich 16 der gestempelten Knautschelemente, die frühestens 10 Tage nach Herstellung eingeschweißt wurden, um den größten Teil des Trocknungsschwindens abklingen zu lassen. Für jede Palette gab es einen Lieferschein mit den entsprechenden Nummern der Elemente, der bei der Abnahme auf der Baustelle kontrolliert wurde. Je nach Bauzeitfenster wurden am Vortag des vereinbarten Lieferungstermins 5 bis 7 LKW beladen, die am darauffolgenden Tag die gewünschte Anzahl der Knautschelemente zum vereinbarten Abladeort auf die Baustelle transportierten.

6 Resümee und Ausblick

Die bei der Instandsetzung des Gotschnatunnels zusätzlich zu den Verstärkungsmaßnahmen unterhalb des Sohl-



Fig. 7 Astra project manager stands at a podium made from Compex to give a speech at the topping-out ceremony

Bild 7 Ansprache des Astra-Projektleiters zur Aufrichte mit Rednerpult aus Compex

which was installed beneath the invert arch. The work was successfully accomplished in accordance with the requirements of the client and the design engineers. This was made possible thanks to the close cooperation between all parties involved in the project. The fact that COMPEX prefabricated parts complied with the required material parameters, were verified under the manufacturer's factory production control system and were sufficiently robust to withstand on-site handling demonstrates their suitability for use as a yielding zone in tunnel construction. When suitably engineered, Compex is a versatile construction material, as demonstrated in Figure 7.

Hochtief Engineering GmbH has since manufactured curved segments with dimensions $100 \text{ cm} \times 90(97) \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ ($L \times W \times H$) (Figure 8) for another test gallery as part of the ANDRA project in Bure [7], which were installed by Eiffage Genie Civil.

Acknowledgements

The suppliers Schretter & Cie GmbH & Co KG and Hochtief Engineering GmbH would like to thank Astra, the senior project manager and the design engineer for having the courage to explore uncharted territory in implementing the yielding zone. All parties involved in the project expect the zone to yield effectively in the event of the predicted swelling-induced heave, thereby averting future damage to the tunnel that would otherwise occur.



Fig. 8 Preliminary trials to test handling of Compex segments on the construction site

Bild 8 Vorversuche mit Compex-Segmenten zum Handling auf der Baustelle

gewölbes angeordnete vollflächige Knautschzone aus Compex-Fertigteilen wurde nach den Vorgaben des Bauherrn und der Entwurfsverfasser erfolgreich umgesetzt. Das war nur durch eine enge Abstimmung aller Projektbeteiligten möglich. Durch die Einhaltung der geforderten Materialparameter sowie deren Überprüfung im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle beim Hersteller und die Robustheit der Knautschelemente beim Handling auf der Baustelle konnte unter Beweis gestellt werden, dass der Einsatz von COMPEX als Knautschzone im Tunnelbau auch mit Fertigteilen möglich ist. Mit dem entsprechenden Engineering ist der Baustoff Compex vielseitig einsetzbar, wie Bild 7 unter Beweis stellt.

Für einen weiteren Versuchstollen beim Projekt ANDRA in Bure [7] wurden mittlerweile durch Hochtief Engineering GmbH gekrümmte Segmente mit den Abmessungen $100 \text{ cm} \times 90(97) \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ ($L \times B \times H$) hergestellt (Bild 8) und durch Eiffage Genie Civil vor Ort montiert.

Danksagung

Die Lieferanten Schretter & Cie GmbH & Co KG und Hochtief Engineering GmbH danken dem Astra, der Oberbauleitung und den Entwurfsverfassern für den Mut, mit der Umsetzung der Knautschzone beim Gotschnatunnel Neuland betreten zu haben. Alle Projektbeteiligten gehen davon aus, dass dadurch die Nachgiebigkeit bei auftretenden Quellhebungen in der prognostizierten Art wirksam wird und dadurch künftig sonst daraus resultierende Schäden vom Tunnel abgewendet werden können.

References

- [1] Schwalt, M.; Steiner, W. (2020) *Behaviour of sulphate bearing rock – Lessons from the Gotschna Tunnel and other tunnels*, ISRM International Symposium Eurock 2020 – Hard Rock Engineering, Trondheim
- [2] Steiner, W.; Schwalt, M. (2019) *In-situ swelling pressures in sulphate bearing rocks – Findings from field observations* in: Proceedings Rock mechanics for natural resources and infrastructure development, ISRM 2019
- [3] Beeler, P.; Schädler, B.; Weishaupt, R.; Chiaverio, F. (2017) *Tunnel Gotschna; Instandsetzung von Quellhebungen in einem bestehenden Strassentunnel – Konzept, Massnahmen, Materialanforderungen*, STUVA-Tagung 2017
- [4] Billig, B.; Ebsen, B.; Gipperich, C.; Schaab, A.; Wulff, M. (2007) *DeCo Grout – Innovative grout to cope with rock deformations in TBM tunneling*, ITA-AITES World Tunnel Congress
- [5] Schneider, E.; Rotter, K.; Saxer, A.; Röck, R. (2003) *Complex Support System; Komprimierbarer Ringspaltmörtel zur Bewältigung druckhafter Gebirgsbereiche bei TBM-Vortrieben mit starrem Tübbingausbau* in Felsbau 21, No. 5
- [6] Balthaus, H.; Billig, B. (2016) *Aktuelle Entwicklungen beim Einsatz kompressibler Mörtel in druckhaftem Gebirge*, 14. Tiroler Geotechnik- und Tunnelbautag 2016
- [7] Zghondi, J.; Carraretto, S.; Noiret, A.; Armand, G. (2015) *Monitoring and behavior of an instrumented concrete lining segment of a TBM excavation experiment at the Meuse Haute-Marne Underground Research Laboratory (France)*, CONCREEP-10
- [8] Europäische Patentschrift EP 1 790 624 B1: *Verwendung eines Mörtels zur Verfüllung von Hohlräumen*; Veröffentlichung vom 30.05.2007, Patentblatt 2007/22
- [9] Seith, O.; Suter, E. (2020) *Instandsetzung Gotschnatunnel; Herausforderungen und Erfahrungen*. Swiss Tunnel Congress, Luzern

Authors



Dr.-Ing. Marco Tschötschel
(corresponding author)
marco.tschoetschel@hochtief.de
HOCHTIEF Engineering GmbH
Mörfelden-Walldorf
Germany



Prof. Dr.-Ing Hansgeorg Balthaus
HOCHTIEF Engineering GmbH
Essen
Germany



Dipl.-Ing. ETH Patrick Beeler
Lombardi AG
Luzern
Switzerland



Dr. sc. techn. Markus Schwalt
ILF Beratende Ingenieure AG (bis Juni 2021)
IM Maggia Engineering AG (ab Juli 2021)
Zürich
Switzerland



Dipl. Bau-Ing. ETH Oliver Seith
Bundesamt für Strassen ASTRA
Filiale Bellinzona
Thusis
Switzerland

How to Cite this Paper

Tschötschel, M.; Balthaus, H.; Beeler, P.; Schwalt, M.; Seith, O. (2022) *Use of a yielding zone to repair the Gotschna Tunnel*. Geomechanics and Tunneling 15, No. 1, pp. 132–140.
<https://doi.org/10.1002/geot.202100092>

Zitieren Sie diesen Beitrag

Tschötschel, M.; Balthaus, H.; Beeler, P.; Schwalt, M.; Seith, O. (2022) *Einsatz einer Knautschzone bei der Sanierung des Gotschnatunnels, Klosters (CH)*. Geomechanik und Tunnelbau 15, H. 1, S. 132–140.
<https://doi.org/10.1002/geot.202100092>



©HOCHTIEF (links)/Fraunhofer IEE (rechts)

INNOVATIVE LÖSUNGEN FÜR GEPLANTEN ERFOLG

Wir entwickeln neue Rezepturen für Spezialbetone und -mörtel, produzieren Fertigteile mit designten Eigenschaften, testen Bauteile und Bauprodukte in unserem Prüfinstitut – dem Innovation & Testing Center. Das Innovation & Testing Center – eines der leistungsfähigsten privatwirtschaftlich betriebenen Prüfinstitute im Bereich Bauwesen – ist unter anderem akkreditiert für Prüfungen von Befestigungen, von Fassaden und Natursteinplatten, künstlich hergestellten Steinen sowie Beton. Zerstörungsfreie Prüfungen, Untersuchungen an Bauwerken und Instandsetzungsarbeiten komplettieren die Dienstleistungen von HOCHTIEF Engineering, Consult Materials.

www.hochtief-engineering.de

Better Project Solutions.

