Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 113 (1995)
Heft: 46

Artikel: Polyurethan-Injektionen zur Gebirgsverfestigung
Autor: Lichtsteiner, Felix
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-78809

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Felix Lichtsteiner, Zürich

Polyurethan-Injektionen zur Gebirgsverfestigung

1926 passierte die erste Dampflokomotive den 260 Meter langen Rufenen-Tunnel, welcher oberhalb Andermatt an der Strecke der Furka-Oberalp-Bahn liegt. Heute, nach 70 Jahren Betrieb, muss der stark benutzte Tunnel saniert werden. Dank dem Einsatz von Polyurethanen wurde die Tunnelerweiterung und Sanierung planmässig vorangetrieben, und die Gefahr von Niederbrüchen konnte minimiert werden.

Der 260 Meter lange Rufenen-Tunnel liegt oberhalb Andermatt auf 1750 m ü.M. an der Bahnstrecke der Furka-Oberalp-Bahn über den Oberalppass. Gründe für die Tunnelerneuerung, welche im vergangenen Jahr begann und nach dem Winterunterbruch im April wieder aufgenommen wurde, sind die Erhaltung der Bausubstanz sowie die Anpassung des Bauwerkes an die stark geänderte Nutzung. 1926 fuhren täglich vier Dampflokomitiv-Züge mit Achslasten von 14 Tonnen durch den Tunnel, heute sind es rund 35 Züge täglich mit Achslasten von bis zu 64 Tonnen. Im Zug der Sanierung des durch die hohe Belastung baufällig gewordenen Tunnels wird das Lichtraumprofil erweitert, damit neues Rollmaterial den Tunnel passieren kann. Die Bahnbetriebssicherheit muss während der Erneuerung gewährleistet sein. Ein auf Tunnelbau spezialisiertes Ingenieurbüro wurde mit der Projektierung und Bauleitung dieser anspruchsvollen Erneuerungsarbeiten am Rufenen-Tunnel beauftragt.

Geologisch schwieriges Gebirge

Die Urserenzone, welche der Rufenen-Tunnel in einer Kehre durchquert, besteht von der Geologie her aus mesozoischen Sedimenten und Chlorit-Sericit-Schiefer aus dem Permokarbon, welche zwischen Aar- und Tavetscher-Zwischenmassiv liegen und mit dem Tavetscher Zwischenmassiv stark verfaltet und verschuppt sind. Sie sind in die engen, steilstehenden Strukturen, die bei der Bildung der Alpen entstanden sind, eingefaltet. In der Urserenzone finden sich viele junge, zum Teil heute noch aktive Bruchsysteme. Die Konstellation hat, wie an vielen anderen Orten in den Alpen, zur Folge, dass im Bereich des Rufenen-Tunnels Sedimentgesteine und Schiefer sich abwechseln und in einem unterschiedlichen Zustand befinden. Dort, wo aktive Bruchsysteme arbeiten, ist das Gestein stark zermalmt und aufgelockert. In diesen sogenannt mylonitisierten Zonen muss die Standfestigkeit des Gebirges, zum Beispiel durch Injektion von Polyurethan, verbessert werden.

Bild 1.
Altes und neues Tunnelgewölbe im Rufenen-Tunnel: Vorne ist die einschalig aufgetragene Spritzbetonschicht zu sehen, in der Bildmitte das ursprüngliche Tunnelgewölbe mit dem Natursteinmauerwerk und der Holzverkleidung. Die hellen Stellen sind Polyurethan-Verfüllungen und Verklebungen

Bild 2.
Altes und neues Tunnelgewölbe im Rufenen-Tunnel: Gut sichtbar sind die Hinterfüllungen

Bild 3.
Das alte Tunnelgewölbe wurde in Breiten von 30 bis 50 Zentimetern aufgeschlitzt und ausgebrochen. Das alte Tunnelgewölbe und der gebräche Fels dahinter wurden mit Polyurethan verfestigt.

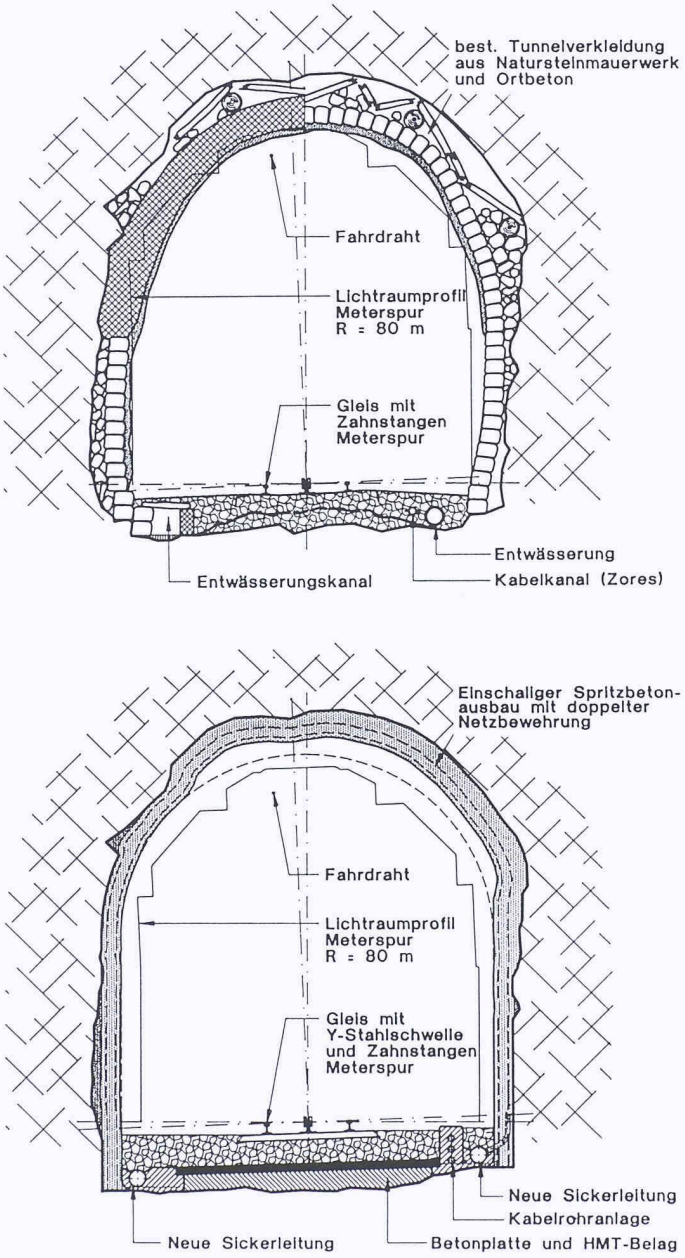

Bild 4.
Aufbau der Tunnelquerschnitte alt und neu

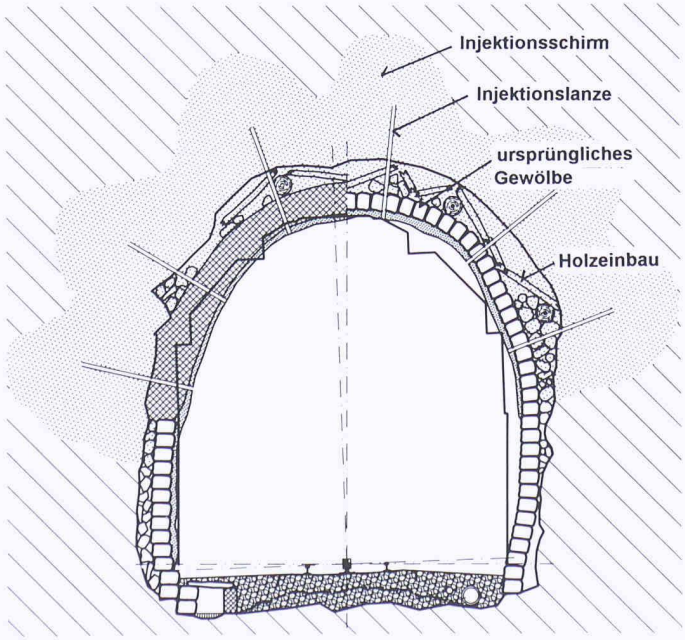

Bild 5.
Injektionsschema: Über Injektionslanzen wird Polyurethan in die Hohlräume injiziert. Der punktierte Raster zeigt den erzielten Injektionsschirm zur Gebirgsverfestigung

Holzeinbau hinter der Tunnelverkleidung

Beim Abbruch der alten Tunnelverkleidung wurde bei den ersten Schlitzen im Juni 1994 bald klar, dass das freigelegte Gebirge keine oder nur eine sehr geringe Standfestigkeit aufweist. Alter Holzeinbau hinter der Tunnelverkleidung und die schwierigen geologischen Verhältnisse erschwerten die Bauarbeiten (kleinere, geologisch bedingte Niederbrüche). Die Bauleitung entschied aufgrund dieser Situation, auf der ganzen Tunnellänge systematisch Polyurethan zu injizieren (Bilder 1, 2 und 3). Mit dieser Massnahme konnten die stark mylonitisierten Zonen des Urseren-Permokarbons mit vorwiegend isoklinal verfalteten Chlorit-Sericit-Schiefern verfestigt und damit die Arbeits- und Betriebssicherheit erhöht werden. Zudem wurde der Bereich zwischen der alten Tunnelverkleidung und dem Gebirge (Holzeinbau und Steinpackungen) verfüllt und verklebt, und das unkontrollierte Herausbrechen des Materials konnte verhindert werden.

Die Wahl des Injektionsgutes

Im Sanierungskonzept der (Bild 4) für die Profilerweiterung und Erneuerung der Tunnelverkleidung war der Einsatz von Polyurethaninjektionen für die Verfestigung der Lockergesteinsmaterial-Strecke in den Portalbereichen vorgesehen.

Für die Wahl des Injektionsgutes wurden verschiedene Parameter betrachtet: Einerseits die Erhöhung der Sicherheit

Charakteristische Eigenschaften des verwendeten Polyurethan-Injektionsharzes

Polyurethane sind 2-Komponenten-Kunstharze. Sie werden gebildet durch die Reaktion von Polyol und Isocyanat. Nimmt Wasser, das entweder der einen Komponente zugegeben wird oder als Bergwasser auftritt, als Reaktionspartner teil, dann reagiert die Isocyanat-Komponente zu Polyharnstoff unter Bildung von CO_2.

1. Reaktion: Polyol + Isocyanat ⇒ Polyurethan
2. Reaktion: Isocyanat + H_2O ⇒ Polyharnstoff + CO_2

Die Entwicklung eines Gases führt zur Aufschäumung des Kunstharzes, je nach Formulierung der Polyurethan-Komponenten und je nach Wasserangebot. Durch die Aufschäumung entsteht ein gegenüber dem von der Injektionspumpe her angelegten Verpressdruck verzögerter Expansionsdruck, welcher auch kleinste Risse, zum Beispiel bei tektonisch stark beanspruchten (mylonitisierten) Gesteinszonen, zu verfüllen und verkleben vermag. Nebst der schnellen Reaktions- und Aushärtzeit und dadurch kurzen Wartezeit bei Verfestigungsarbeiten ist die hohe Verfüllbarkeit und Verklebbarkeit von Rissen und Spalten in geologischen Störzonen einer der grössten Vorteile von Polyurethan-Injektionen gegenüber herkömmlichen Injektionsverfahren.

Injektionsmittel	Bodenarten/Kornfraktion					
	Ton	Silt	Sand			Kies
			Feinsand	Mittelsand	Grobsand	
Zement-Ton						
Zement-Betonit						
Feinstzement						
Polyurethane						
Acrylate						
Korngrösse (in mm)	0.001	0.01	0.1	1	1.5	10
Durchlässigkeit k(m/s)	10^{-7}		10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}

Tabelle 1.
Einbringbarkeit verschiedener Injektionsmittel in Abhängigkeit der Kornverteilungskurve eines Bodens. Bemerkenswert ist die grosse Differenz der Einbringbarkeit von zementösen Systemen gegenüber Kunstharzen

Die Vorteile der verwendeten Polyurethan-Kunstharzinjektionen

- Optimale, dichte Verklebung und Verfüllung von Hohlräumen, Rissen und Spalten bei Gesteinsauflockerungen im Fels und Lockergestein
- Schnelle Reaktions- und Aushärtzeit (30 Sekunden bis 3 Minuten, vollständige Erhärtung nach 4 Stunden) und dadurch kurze Wartezeiten im Bauablauf bei Injektionen
- Bei Wasserangebot Aufschäumung bis zum 12fachen Volumen. Der Expansionsdruck führt zur Verfüllung und Verklebung von kleinen Rissen und Spalten (<0,3 mm), weil die Druckentlastung über diese Systeme führt.
- Durch die hohe Aufschäumung wird eine hohe Wirtschaftlichkeit erreicht: Mit 1 Liter Gemisch entstehen bis 12 Liter Polyurethan-Schaum mit guten mechanischen Eigenschaften.
- Viskositäten nach Mischen der Komponenten rund 300 mPa·s. Eine gute Einbringbarkeit ist garantiert.
- Hohes Arbeitsvermögen: Trotz guten Eindringtiefen und respektablen mechanischen Eigenschaften im erhärteten Zustand sind Polyurethane ohne Flankenablösung stark verformbar. Das ist wichtig, wenn der verklebte Gesteinskörper Bewegungen mitmachen muss.

Am Bau Beteiligte:

Bauherr:
Furka-Oberalpbahn, Brig
Planung und Bauleitung:
Amberg Ingenieurbüro AG, Regensdorf
Arge Rufenen-Tunnel:
Murer AG (Technische Leitung), Bonetti AG, Bau AG, Laich AG

während der Abbruchphasen, die Arbeitshygiene und die Umwelverträglichkeit der oberflächennah durchgeführten Injektionen, andererseits die materialtechnischen Eigenschaften des Injektionsgutes wie Viskosität, Eindringbarkeit in das zu verfestigende Locker- und Felsgestein, Festigkeitsentwicklung und Wirkung als gebirgsverfestigendes System. Gegenüber Injektionsmaterialien wie Zement oder Mikrozement ist die Eindringbarkeit von Polyurethan auch in Rissweiten und Hohlraumgrössen, die geringer als 0,3 mm sind, gewährleistet (Tabelle 1). Die geringe Viskosität der Polyurethane von 300 mPa·s und der hohe Expansionsdruck, der bei der Aufschäumung (vgl. charakteristische Eigenschaften des Polyurethans) entsteht, ermöglichen ein tiefes Eindringen in das Gestein und deshalb eine gute Verfestigung und Verklebung auch von Lockergesteinsböden. Die Reaktionszeit nach dem Mischen im Statikmischer beträgt bei den 2-Komponenten-Polyurethan-Injektionsharzen (wie z.B. SikaFix T10RX) rund eine Minute bei einer Aufschäumung um das 6- bis 12fache Volumen.

Das Injektionssystem

In einer ersten Phase (Teilstrecke) wurde mit einem Lanzenraster (Bild 5) für das Einbringen des Injektionsgutes von 1,5 × 1,5 Meter (2,25 Quadratmeter Tunneloberfläche) durchschnittlich 15 kg Polyurethan des obengenannten Typs pro Lanze injiziert. Anhand der Erfahrungen beim Abbruch in den injizierten Strecken wurden der Injektionsraster und die Injektionsmenge optimiert und bei den nächsten Phasen angepasst. Im ersten Baujahr 1994 wurden pro Tunnelmeter durchschnittlich 300 kg 2-Komponenten-Polyurethan-Injektionsharze injiziert.

Adresse des Verfassers:
Felix Lichtsteiner, dipl. Geologe ETH/SIA, Sika AG, Tüffenwies 16-22, 8048 Zürich

Literatur:

Ackermann, A.: Ingenieurbüro Amberg, Regensdorf, Erneuerung Rufenen-Tunnel, Pressemappe, 2. 1995

Cornely, W., Richter, A.: Grundlagen zu Anwendung und Nutzen von Zement- und Polyurethan-Injektionen im Berg- und Tunnelbau, Injizieren in Fels und Beton (R. Widmann), 1993

Wyss, R.: Die Urserenzone - Lithostratigraphie und Tektonik, Eclogae geol. Helvetica, Vol. 79, 1986