Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 117 (1999)
Heft: 5

Artikel: Injektionen in dichtgelagerten Untergründen
Autor: Wetzig, Volker
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79691

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: 07.08.2025

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

Volker Wetzig, Sargans

Injektionen in dichtgelagerten Untergründen

Mit umfangreichen In-situ-Versuchen und anschliessenden felsmechanischen Berechnungen wurde die Frage nach der Wirksamkeit von Injektionsmassnahmen in dichtgelagerten Untergründen im Tunnelbau untersucht. Dünnflüssige Kunstharze wurden in dichtgelagerte Tonschieferformationen verpresst. Mit Dilatometermessungen wurden der Injektionserfolg als Veränderung des Gebirgs-E-Moduls und in einer Modellrechnung die bautechnische Bedeutung des versuchstechnisch nachgewiesenen Injektionserfolgs ermittelt.

Injektionen werden seit jeher als Bauhilfsmassnahme eingesetzt. Ihre Funktion besteht entweder in der Verfestigung einer nicht standfesten Formation oder der Unterbindung von Wasserzuflüssen. Mit ein und derselben Injektionsmassnahme können auch beide Zielsetzungen verfolgt werden. Für Formationen mit hohen Durchlässigkeiten, wie Kiesen oder grobklüftigem Festgestein, stehen hydraulische Bindemittel bzw. eine breite Palette an Kunstharzen zur Verfügung. Untergründe mit Durchlässigkeiten kleiner 10^{-4} m/s oder Kluftweiten unter 0,1 mm lassen sich praktisch nur mit Kunstharzen verfestigen [1]. In isotropen Untergrundverhältnissen wie Sanden, Schluffen oder Tonen lässt sich der Injektionserfolg in der Regel durch entsprechende Bohrkernentnahmen mit Druckfestigkeitsuntersuchungen nachweisen. Der Injektionskörper wird sich kugelförmig oder zylindrisch um den Injektionspunkt bzw. die Injektionslinie ausbilden. Innerhalb des Injektionsbereichs kann von einer gleichmässigen Qualität ausgegangen werden.

In anisotropen Untergrund, wie z.B. einer geklüfteten Schieferformation ist eine vollständige Injektion aller Hohlräume und Trennflächen praktisch nicht zu erreichen. Ein Bohrkern, der nach einer Injektionskampagne aus einem solchen Injektionskörper entnommen wird, bricht vielfach an den nicht verfestigten Trennflächen auseinander. Der Injektionserfolg lässt sich somit nicht oder nur in Ausnahmefällen im Labor bestimmen.

Die geplanten Alpendurchstiche weisen verschiedene Formationen auf, bei denen eine Untergrundverbesserung durch Injektionen denkbar ist. Für den Ingenieur und schliesslich auch den Bauherrn stellt sich die Frage, welchen Nutzen eine Injektion des Baugrunds in technischer und nicht zuletzt auch in wirtschaftlicher Hinsicht bringt, und wie sich dieser quantitativ erfassen lässt.

Zielsetzung

Mit den ausgeführten Versuchen und Untersuchungen wurde die Wirkungsweise von Injektionsmitteln unter schwierigen Randbedingungen des zu injizierenden Untergrunds sowie der Stand der Injektionstechnik aufgezeigt.

Als messbare Grössen wurden Injektionsdruck, Injektionsmittelverbrauch, Injektionsrate und als felsmechanischer Parameter der Gebirgs-E-Modul erfasst. Die mit dem jeweiligen Injektionsmittel erreichbare kleinste Kluft- oder Rissweite wurde in einer mikroskopischen Beurteilung am Dünnschliff bestimmt. Mit Hilfe von gebirgsmechanischen Simulationsmodellen lässt sich aufgrund der erreichten Verbesserungen der felsmechanischen Parameter die Bedeutung für den Untertagebau nachweisen.

Das Untersuchungsprogramm

Die Untersuchungen gliederten sich in drei Phasen:

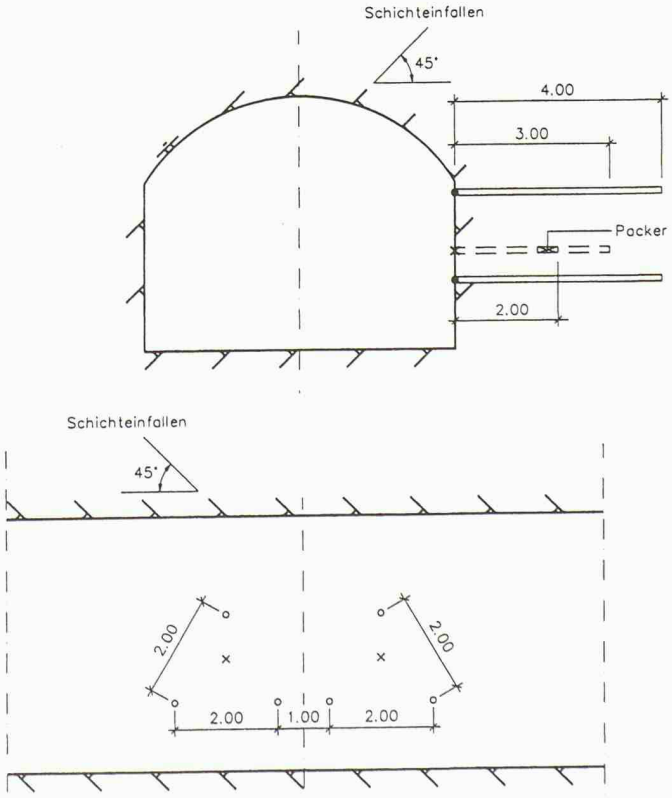
- Voruntersuchung des Untergrunds
- Injektionsarbeiten
- Ermittlung des Injektionserfolgs

Der Injektionsuntergrund

Für die Versuchsarbeiten wurde ein Tonschieferbereich im Versuchsstollen Hagerbach ausgewählt, der stellvertretend für sehr schlecht injizierbare Felsformationen steht. Bei dem Schiefergestein handelt es sich um im mm-Bereich geschichtete und verfestigte Sedimentgesteine. Infolge tektonischer Beanspruchungen finden sich Kluft- und Verschiebungsflächen in praktisch allen Raumrichtungen.

Versuchsanordnung

Im Paramentbereich eines Stollenabschnitts, der im gleichmässig gelagerten Schiefer aufgefahren ist, wurden Injektionsfelder von 3 m Breite eingeteilt. Die



1 Anordnung Injektionsfelder. Querschnitt (oben) und Ansicht (unten)

Höhe der Felder ist durch die Stollenhöhe von rund 5 m begrenzt.

Im Injektionsfeld wurden drei horizontale Bohrungen an den Eckpunkten eines gleichschenkligen Dreiecks von 4 m Tiefe erstellt, die erlaubten, während der Verpressarbeiten die Injektionsreichweite zu beurteilen (Bild 1). Die einen Meter über die Injektionsbohrung hinausreichenden Beobachtungslöcher boten die Gewähr, dass auch Fliesswege in das Gebirge erkannt werden konnten. Die einzelnen Injektionsfelder wurden im Abstand von einem Meter angeordnet. Teilweise wurden die Löcher als Kernbohrung erstellt, um die felsmechanischen Eigenschaften des unverfestigten Gesteins als Bezugsgrössen ermitteln zu können.

Im Zentrum des Injektionsfelds zwischen den Beobachtungsbohrungen liegt die Injektionsbohrung mit einer Tiefe von 3 m. Bei mehrstufigen Injektionen wurde die Lage der weiteren Injektionspunkte später festgelegt.

Das Schichteinfallen beträgt 45°. Der Teststollen liegt im Winkel von 30° zum Streichen der Schichtung. Die Bohrungen für die Injektionen und Untersuchungen wurden im rechten Winkel zur Achse des Erschliessungsstollen erstellt.

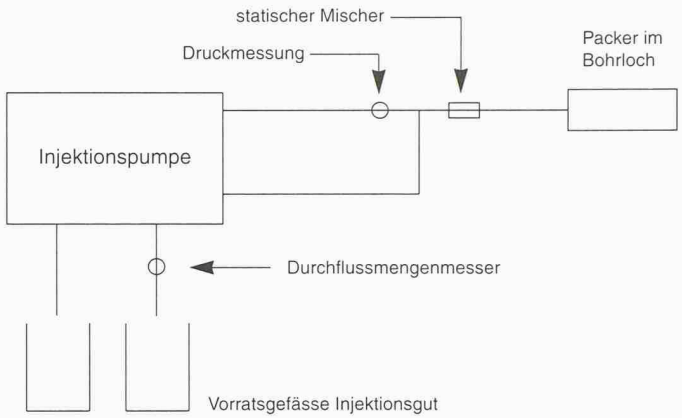
Wasserabpressversuch

Vor den Injektionsarbeiten wurde in den Injektionsbohrungen ein Wasserabpressversuch mit einem Druck von max. 10 bar zur Bestimmung der Durchlässigkeiten und allfälliger Vergleichbarkeit der Injektionsresultate ausgeführt. Die Messungen wurden im gleichen Abschnitt der Bohrung ausgeführt, in dem anschliessend auch das Injektionsgut verpresst wurde.

Die ermittelten Wasseraufnahmewerte liegen im Bereich von weniger als 3 Lugeon und deuten damit auf ein sehr schwer zu injizierendes Gebirge hin [1]. Das Vorhandensein von grossen unerkannten Klüften, in die das Injektionsgut verlaufen würde, konnte nach diesen Messungen für die ausgewählten Felder ausgeschlossen werden. Mögliche Versuchsfelder, die höhere Lugeon-Werte aufwiesen, wurden nicht genutzt.

Dilatometermessung

Vor und nach den Injektionsversuchen wurden Dilatometermessungen zur Quantifizierung des Injektionserfolgs durchgeführt. Die Messungen erfolgten ab 0,5 m Bohrlochtiefe im Abstand von 0,5 m bis zu einer Tiefe von 3 m. Die Messungen erfolgten mit einer Goodmann-Sonde in einem Kernbohrloch mit Durchmesser 76 mm. Die Messebene liegt in einer Vertikalen, die senkrecht zur Stollenachse steht. An jeder Messstelle wurden drei Lastzyklen mit Belastungen bis 8,6 N/mm^2 gefahren.



2 Prinzipskizze Versuchsanordnung

Die Öffnung der Druckplatten wird mit zwei induktiven Weggebern mit einer Genauigkeit von 0,001 mm gemessen. Alle Daten werden mit einem Laptop erfasst und anschliessend ausgewertet.

Für die Ermittlung des geometrischen Mittelwerts des E-Moduls wurden auch Daten benachbarter Injektionsfelder, für die die Ausgangsmessungen bereits durchgeführt worden waren, herangezogen. Mit dieser breiten Erfassung des Ausgangszustands ergibt sich eine relativ grosse Sicherheit, in welchem Rahmen Schwankungen des E-Moduls im nicht injizierten Gebirge zu erwarten sind.

Die Auswertung aller Messungen ergab für die nicht injizierten Bereiche einen Wert von 1,6 ± 0,5 kN/mm^2 für Bereiche bis 1,5 m unter der Stollenoberfläche und von 3,0 ± 0,8 kN/mm^2 für grössere Tiefen. In diesen Werten spiegelt sich die Auflockerung und Entspannung des Gebirges um den Stollenhohlraum durch Sprengerschütterungen und Lastumlagerungen wider.

Versuchsdurchführung

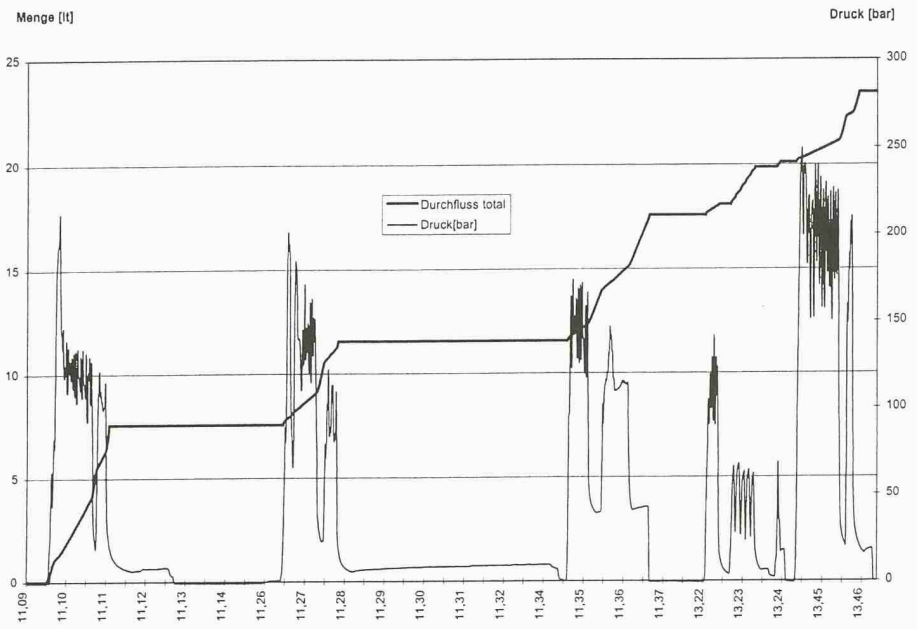
Die Verpressarbeiten des Injektionsguts wurden mit handelsüblichen Injektionspumpen in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Injektionsmittellieferanten ausgeführt. Der Injektionsmittelverbrauch und die Injektionsdrücke wurden kontinuierlich über induktive Durchflussmengenmesser bzw. Drucksensoren erfasst (Bild 2). Der Injektionsmittelverbrauch wurde nur in einer Komponente gemessen. Vom Förderverhältnis der Pumpe wurde auf die Gesamtinjektionsgutmenge geschlossen. Alternativ besteht die Möglichkeit, den Injektionsmittelverbrauch über eine Wägeeinrichtung mit angeschlossener Datenerfassung zu ermitteln.

Bei der Druckmessung wurde auf eine aufwendige Im-Loch-Messung verzichtet, da bei geringen Durchflussgeschwindigkeiten, die im Rahmen der Injektionsarbeiten zu erwarten waren, die Druckverluste in den Leitungen und Mischelementen klein würden. Der Injektionsdruck wurde nur orientierend erfasst und stellt keine entscheidende Kenngrösse für die weitere Beurteilung des Injektionserfolgs im Rahmen dieser Arbeiten dar.

In der Regel wurde jedes Injektionsmittel in zwei Versuchsfeldern verpresst. Damit war die Möglichkeit geschaffen, bei Injektionsgutaustritten in den Beobachtungsbohrungen oder an der Stollenoberfläche auf das andere Feld zu wechseln und dem Injektionsmittel die Möglichkeit zu geben, die Wegigkeiten zu verschliessen, um im nächsten Injektionsgang weitere Wegigkeiten und Klüfte zu erreichen.

Aufgrund der Injektionsgutverluste an der Stollenoberfläche und in den Beobachtungsbohrungen entsprachen die verpressten Injektionsgutmengen nicht der im Gebirge verbliebenen Masse, da nur schwer abschätzbar war, wie gross die Verluste durch die Oberflächenaustritte waren. Ein typischer Druckverlauf und ein Materialverbrauchsprotokoll als Funktion der Zeit sind in Bild 3 dargestellt. Beim Anpumpen ist jeweils eine Druckspitze festzustellen, die sich anschliessend wieder abbaut. Aufgrund des Druckniveaus ist zu vermuten, dass durch das Aufreissen vom Gebirge neue Wegigkeiten geschaffen wurden. Es ist aber zu beachten, dass die Drücke an der Injektionspumpe gemessen wurden, und daher keine abschliessende Aussage über die Druckverhältnisse im Bohrloch möglich ist. Andere Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass im Bohrloch und bei den Übergängen in die Klüfte und Spalten im Gebirge sehr grosse Druckabfälle zu verzeichnen sind. Dies führt dazu, dass im Gebirge nur noch ein Bruchteil des Drucks wirksam ist, der an der Pumpe gemessen wird. [3]

Die Verbrauchskurve zeigt kumuliert die verpresste Injektionsgutmenge. Die Steigung dieser Kurve ist ein Mass für die Injektionsgeschwindigkeit.



3
Verlauf von Injektionsdruck und Verbrauchsmenge als Funktion der Zeit

Aufgrund der Austrittstellen des Injektionsguts während der Verpressarbeiten wurden die Ansatzpunkte für Kernbohrungen, die auf einer Tiefe von 3 m erstellt wurden, festgelegt, mit denen Kernmaterial für Dünnschliffuntersuchungen gewonnen wurde, und in denen die Dilatometermessungen nach Abschluss der Versuchsarbeiten ausgeführt wurden.

Dünnschliffuntersuchungen

Teilweise wurden Klüfte bzw. Risse mit einer Injektionsgutfüllung von bis drei Millimetern Dicke gefunden. Aufgrund der Verteilung des Injektionsguts in den Bohrkernabschnitten muss davon ausgegangen werden, dass im Wesentlichen Risse und Klüfte verfüllt worden sind. Ein eigentliches Imprägnieren des Gesteinsgefüges konnte nicht beobachtet werden.

Aus den Bereichen, durch die die makroskopisch erkennbaren Injektionsgutbänder verliefen, wurden Dünnschliffe präpariert, um die Injektionsgutverteilung auch in den engständigen Kluftsystemen beurteilen zu können. Bei der Präparation der Dünnschliffe war teilweise ein vorgängiges Imprägnieren erforderlich, um ein Zerfallen des Probenmaterials längs unverfestigter Klüfte zu verhindern.

Anhand der Dünnschliffe (Bild 4) ist ersichtlich, dass das Injektionsgut Risse und Schichtlagen bis hin zu Öffnungsweiten von 40 µm gefüllt hat, die in gerader Linie bis 1,8 m von der Eintrittsstelle des Harzes in das Gebirge entfernt lagen.

Dilatometermessungen nach der Injektionsmassnahme

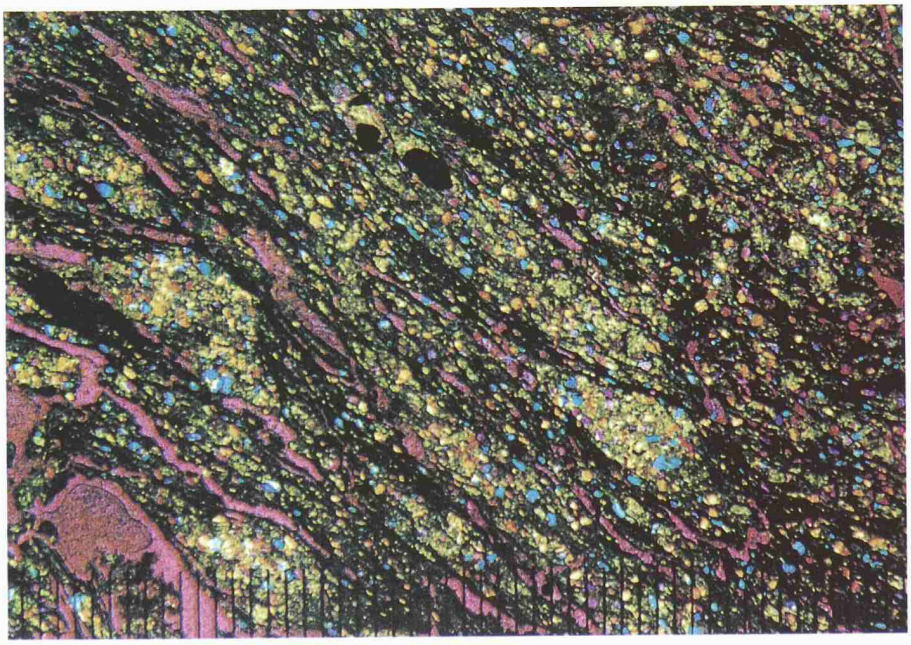
Nach den Injektionsmassnahmen wurden in den Kernbohrlöchern, in denen das Injektionsgut makro- und mikroskopisch nachgewiesen worden war, Dilatometermessungen zur quantitativen Erfassung des Injektionserfolgs ausgeführt.

Die ermittelten E-Modulwerte lagen im Bereich von 6 bis 7 kN/mm^2. Dies entspricht mehr als einer Verdoppelung der Werte des nicht injizierten Bereichs. Auffallend ist, dass dies für den Bereich zutrifft, der aufgrund der Messung der Ausgangswerte als durch Sprengerschütterungen und Lastumlagerungen unbeeinflusst angesehen werden muss. Für den Bereich bis rund 1,5 m ab Stollenoberfläche ergibt sich eine Vervierfachung des entsprechenden Werts.

Da in den Bereichen mit den erhöhten E-Modul-Werten keine «Imprägnierung» des Gebirges mit Injektionsgut festgestellt werden konnte, muss vermutet werden, dass der verfestigende Effekt allein durch das Verfüllen und Verkleben von groben und feinen Rissen verursacht wird.

Inhomogenitäten im Gebirge als Ursache für die festgestellten E-Modul-Werte anzunehmen, ist aufgrund der Messwertverteilung auszuschliessen [5].

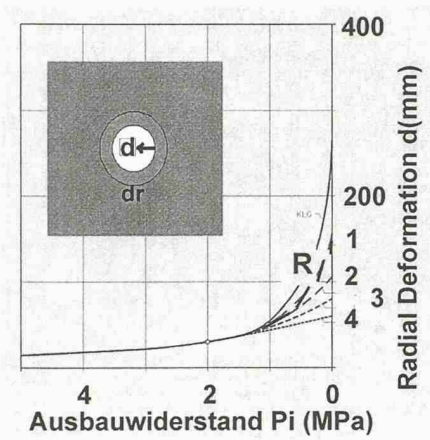
4
Dünnschliff mit Injektionsgut (violett) in Tonschiefer. Ein Teilstrich entspricht 0,1 mm



Modell für Simulationsberechnungen

Mit FE-Berechnungen kann der Einfluss der Festigkeitssteigerung des umliegenden Gebirges auf den erforderlichen Ausbauwiderstand bzw. die Deformationen berechnet werden. Im Rahmen dieser Berechnungen ist die Dicke des Injektionsrings zu berücksichtigen.

In Bild 5 ist beispielhaft eine Berechnung für ein Tunnelkreisprofil mit 9,6 m Durchmesser bei einer Überlagerung von 500 m dargestellt. Die mit «R» bezeichnete Kurve charakterisiert den Gleichgewichtszustand des unverfestigten Gebirges. Die Kurven 1 bis 4 entsprechen einer Festigkeitssteigerung um den Faktor 2, 3, 4 bzw. 5 [6]. Daraus folgt, dass sich bei gegebenem Ausbauwiderstand durch entsprechende erfolgreiche Injektionsmass-



5
Erforderlicher Ausbauwiderstand als Funktion der radialen Deformationen

nahmen die entstehenden Deformationen erheblich reduzieren. Bei einer gegebenen maximalen zulässigen Deformation, die sich aus Ausbruchquerschnitt abzüglich Ausbaustärke und gefordertem Lichtraumprofil ergibt, kann der Ausbauwiderstand und -aufwand reduziert werden.

Am Projekt Beteiligte

- Amberg Ingenieurbüro AG, Regensdorf
- Sika AG, Zürich
- Versuchs Stollen Hagerbach AG, Sargans

Der Verlauf dieser Kurven ist von den jeweiligen gebirgsmechanischen Kennziffern abhängig. Im Rahmen eines wirtschaftlichen Optimierungsprozesses sind Injektionsaufwand sowie Ausbauwiderstand und Ausbruchquerschnitt im Sinne einer Kostenminimierung aufeinander abzustimmen.

Ausblick

Die ausgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass auch in dichtgelagerten Untergründen ein Injektionserfolg mit entsprechenden Injektionsmitteln erreichbar ist. Dieser Erfolg kann mit geeigneten Methoden qualitativ und quantitativ nachgewiesen werden.

Modellrechnungen zeigen, dass sich die quantitativ nachweisbaren Injektionserfolge auch in wirtschaftlicher Hinsicht positiv auf ein Tunnelbauwerk auswirken und nachweisen lassen. Voraussetzung ist aber in jedem Fall eine seriöse und geeignete Messung des Injektionserfolgs, z.B. durch die beschriebenen Dilatometermessungen im Injektionskörper.

Bei den beschriebenen Arbeiten handelt es sich um versuchstechnische Ansätze, den Injektionserfolg im Gebirge qualitativ zu erfassen. Mit Sicherheit sind weitere theoretische und praktische Untersuchungen in diesem Zusammenhang erforderlich.

Adresse des Verfassers:
Volker Wetzig, Dipl.-Ing., Versuchs Stollen Hagerbach AG, Rheinstr. 4, 7320 Sargans

Literatur

[1]
Kutzner Christian: Injektionen im Baugrund. F. Enke Verlag, Stuttgart 1991
[2]
Untersuchungsprogramm Felsinjektionen, unveröffentlicht, Versuchs Stollen Hagerbach AG, Sargans 1996
[3]
Untersuchungsbericht Felsinjektionen, unveröffentlicht, VersuchsStollen Hagerbach AG, Sargans 1997/1998
[4]
Widmann R.: Injektionen von der Erfahrung zur Theorie. TAE-Lehrgang, Stuttgart 1993
[5]
Wittke Walter: Felsmechanik. Springer Verlag, Berlin 1984
[6]
Hagedorn Heinz: Die Bedeutung von Injektionen aus felsmechanischer und statischer Sicht. IUT-Fachveranstaltung, Sargans 1997

André Banz, Andrea Bassetti, Simon F. Bailey und Manfred A. Hirt, Lausanne

Tragsicherheit bestehender Strassenbrücken

Beurteilung mit aktualisierten Lastfaktoren

Anzahl und Alter der bestehenden Strassenbrücken erhöhen sich stetig, die Lasten nehmen zu und die Konstruktionsnormen entwickeln sich. Dies zwingt die Bauherren dazu, sich mit der Beurteilung bestehender Strassenbrücken auseinanderzusetzen. Dieser Bericht präsentiert die Resultate zweier vom Bundesamt für Strassenbau am Institut für Stahlbau (ICOM) der ETH-Lausanne in Auftrag gegebener Forschungsaufträge, deren Ziel die Festlegung aktualisierter Lastfaktoren für Eigen- und Auflasten war.

Bereits im Rahmen eines früheren Forschungsauftrags wurden die Grundsätze zur Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Strassenbrücken erarbeitet [1], vorgestellt im SI+A vom Juni 1996 [2]. Dabei hatte sich herausgestellt, dass eine genauere Ermittlung der Lastfaktoren zur Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Tragwerke von grossem Nutzen sein kann.

Die am Ende der achtziger Jahre eingeführten Schweizer Tragwerksnormen - SIA 160, 161 und 162 - basieren auf einem einheitlichen Nachweiskonzept. Es wird klar zwischen Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit unterschieden. Die Lastmodelle für Verkehrslasten der Norm SIA 160 basieren auf Verkehrsmessungen und wurden mit probabilistischen Methoden festgelegt. Diese Tragwerksnormen sind für die *Bemessung* von Tragwerken bestimmt; der *Nachweis* bestehender Tragwerke ist darin nicht explizit geregelt. Aus diesem Grunde wurde 1994 die Richtlinie SIA 462 [3] zur Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke eingeführt. Diese Richtlinie enthält Grundsätze für das Vorgehen und numerische Werte für den Hochbau; für den Brückenbau fehlen aber die notwendigen Angaben beispielsweise bezüglich Lastmodellen und -faktoren.

Im Rahmen eines am Institut für Stahlbau (ICOM) der ETH-Lausanne vom Bundesamt für Strassenbau in Auftrag gegebenen Forschungsauftrages wurden aktualisierte Lastmodelle ermittelt [1]. Das Nachweiskonzept der Tragwerksbemessung bleibt dabei bestehen, doch können jetzt die Lastmodelle dem Verkehr angepasst werden. Möglichkeiten zur Messung von Verkehrslasten und den daraus resultierenden Beanspruchungen wurden im SI+A vom September 1996 vorgestellt [4]. Auch Tragwerksabmessungen und Materialdichten können durch Messungen erhoben werden, was eine genauere Bestimmung der Eigen- und Auflasten ermög-