Der vollständige ausinjizierte Felsanker

Autor(en): **Hagedorn, Heinz**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 24

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74822

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Der vollständig ausinjizierte Felsanker

Von Heinz Hagedorn, Zürich

Die Systemankerung im Furka-Basistunnel dient dazu, den Fels und den Hohlraum zu stabilisieren und einen bleibenden Gebirgstragring um den Tunnel zu schaffen. Die Felsanker sind daher als dauerhafter Bestandteil des einschaligen Ausbausystems mit einem Spritzbetongewölbe zu betrachten.

Die geforderte *Langzeitwirkung* der Systemankerung erforderte für den Einsatz in diesem Bauwerk eine eingehende Untersuchung bezüglich der *Tragfähigkeit* des Ankertyps und der *Materialeigenschaften des Epoxidharzes* als Injektionsgut.

Für die Prüfung der *Verfestigungseigenschaften* eines vollverklebten Ankers im Gebirge wurde versucht, die Beanspruchung von Injektionsmaterial und Ankerrohr mit Hilfe eines *Berechnungsmodells* qualitativ zu erfassen. Anhand von Laborversuchen erprobte man weiter die *Klebeeigenschaften* und die *Widerstandsfähigkeit* des Epoxidharzes am Beispiel von Ausstossversuchen an versetzten Felsankern. Der vorliegende Bericht enthält eine Beschreibung der theoretischen Untersuchungen und der Prüfverfahren im Labor sowie einige entsprechende repräsentative Resultate.

Das Ankersystem

Das Prinzip des vollständig ausinjizierten Rohrankers beruht auf der Kombination von vier grundlegenden Ideen (Bild 1):

- Verwendung eines Rohrs als Anker,
- Benützung des Ankerrohrs für das Verfüllen des Bohrlochs mit dem Injektionsgut,
- Verwendung eines neuartigen Epoxidharzes als Injektionsmaterial,
- Mischen der Harzkomponenten A und B im Ankerrohr.

Das Ankerharz wird nach dem Mischprozess im statischen Mischer mit hohem Druck durch das Rohr ins Bohrlochtiefste gepresst und verfüllt den Hohlraum zwischen Anker und Bohrlochwand von hinten her (Bild 1). Sobald das Harz am Bohrlochanfang erscheint, hat man die Gewissheit, dass das Bohrloch vollständig ausinjiziert ist. Diese einfache optische Kontrolle garantiert einen guten Formschluss, selbst wenn ein Teil der Injektion in Spalten und Risse abgeflossen sein sollte.

Für die Anker können *hochfeste Polyester-Glasfaserrohre mit alkalibeständigen Glasfasern* oder *Stahlrohre* verwendet werden. Mit dem Stahlrohr lässt sich zusätzlich eine ideale *Kombination von Freispiel- und Injektionsankern* erzielen, wie sie beispielsweise für den Bau der Doppelspur (siehe Beitrag: Die Doppelspur im Baulos 61) zur Anwendung gelangte.

Das Zweikomponenten-Epoxidharz

Mit dem Epoxidharz lassen sich ausgezeichnete Klebeeigenschaften mit mineralischen Stoffen sowie an Metallen erreichen, wobei eine Haftung mit hohen mechanischen Festigkeiten ausgebildet wird. Die Aushärtung erfolgt dabei auch in feuchter und nasser Umgebung, was besonders für die Anwendung im Furka-Tunnel sehr wichtig war. Im Temperaturbereich von 20–25 °C ist durch geeignete «Einstellung» der Harzkomponenten eine vollständige Erhärtung bereits nach etwa 30 Minuten gewährleistet. Dank neuartiger Härter- und Modifizierungsmittel ist es jedoch möglich, die Tragfähigkeit des Ankers auch bei niedrigen Temperaturen bis zu 5 °C in relativ kurzer Zeit zu erreichen. Die Verformungseigenschaften des Injektionsgutes lassen sich durch geeignete Mischverhältnisse variieren, wodurch der Elastizitätsmodul in einem Bereich zwischen 1700 und 6000 N/mm² liegen kann und eine gute Anpassung an die Deformationseigenschaften des Gebirges ermöglicht. Von besonderer Bedeutung sind ferner die hohe Zug- und Scherfestigkeiten dieses Injektionsgutes (Bild 2a).

Das Epoxidharz hat in seiner chemischen Zusammensetzung keine freien Valenzen und kann somit *keine chemischen Reaktionen* eingehen. Besonders im Tunnelbau, wo häufig aggressive Wasser auftreten, ist diese *Beständigkeit* für die dauerhafte Wirkung einer Systemankerung unerlässlich. Der Erhärtungsprozess geht ohne Schwinden vor sich und garantiert somit den Formschluss und die Haftung an der Bohrlochwand wie auch am Anker. Diese Tatsache ist beim Stahlanker zu berücksichtigen, weil dadurch der Zutritt von Wasser erheblich reduziert und somit ein hoher Korrosionsschutz gewährleistet ist. Als weitere positive Eigenschaft ist die *Alterungsbeständigkeit* zu erwähnen.

Die Anker

Im Furka-Basistunnel gelangten folgende *Rohrankertypen* zur Anwendung:

GFK: ∅a = 27 mm, ∅i = 18 mm
GFK: ∅a = 20 mm, ∅i = 10 mm
Stahl (St 50): ∅a = 27 mm, ∅i = 18 mm

Ihre Länge variiert zwischen 2 und 4,5 m und wurde den jeweiligen geotechnischen Bedingungen angepasst.

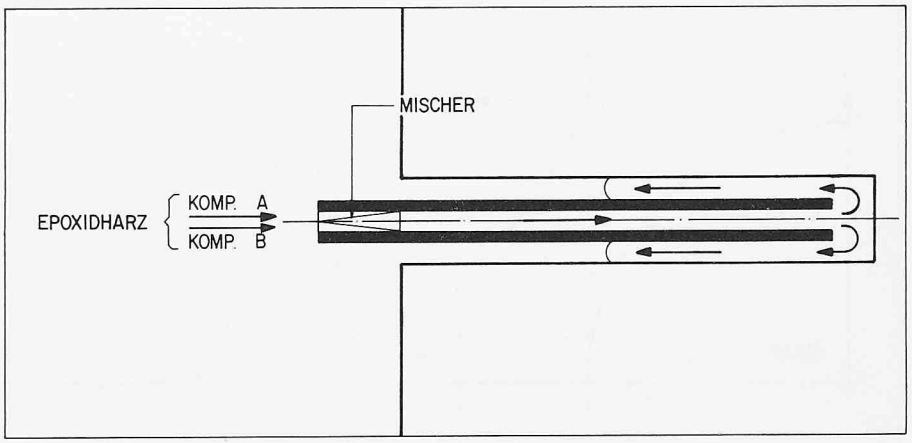
Versuche an GFK-Stäben haben gezeigt, dass die Zugfestigkeit σ_z des hochfesten Polyesters mit Glasfasern mit max. 970 N/mm² höher ist als bei einem Stahl 50 (Bild 2b).

Theoretische Aspekte über die Ankerbeanspruchung

In der Umgebung eines unterirdischen Hohlraumes treten durch die Spannungsumlagerungen im Fels Deformationen δ auf, die gemäss Bild 3 mit zunehmender Entfernung vom Ausbruch abklingen. Die Grösse dieser Deformationen und ihre zeitliche Entwicklung sind abhängig vom primären Spannungszustand, von den Materialeigenschaften wie auch von der Bauweise und der Profilform.

Durch die Bewegungen des Felses gegen den Hohlraum wird der Anker gespannt, wobei die Beanspruchung proportional ist zur Deformationsdifferenz Δδ zwischen Anfangs- und Endpunkt

Bild 1. Injektionsprinzip beim Rohranker



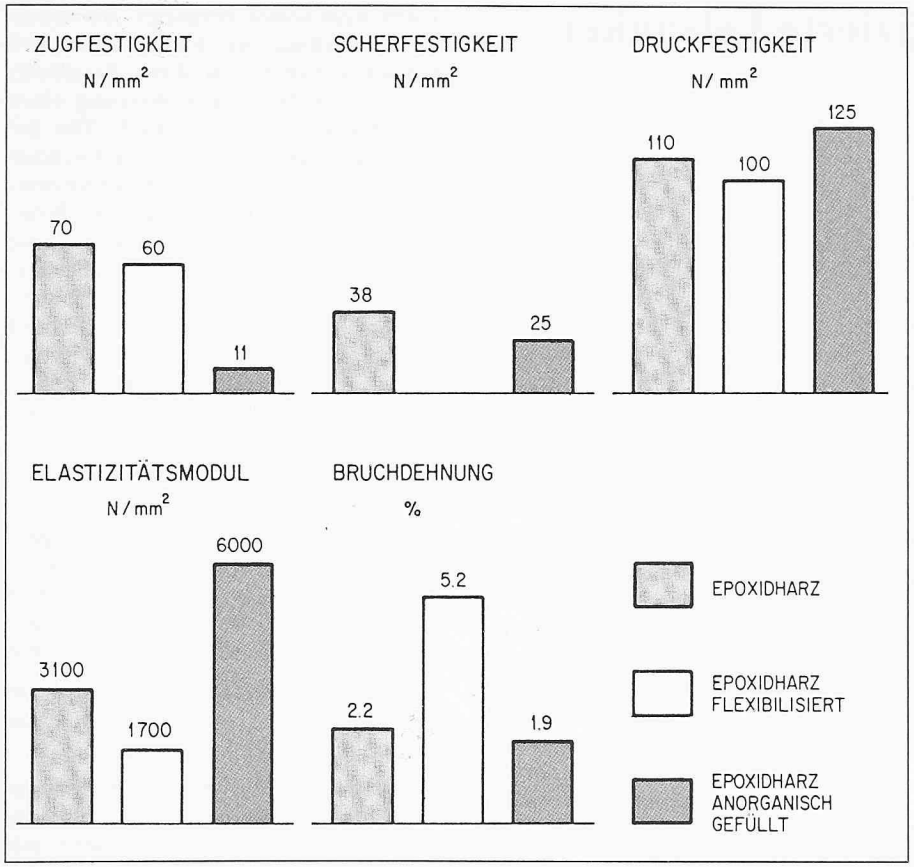


Bild 2a. Materialeigenschaften von Epoxidharz (Angaben des Herstellers [1])

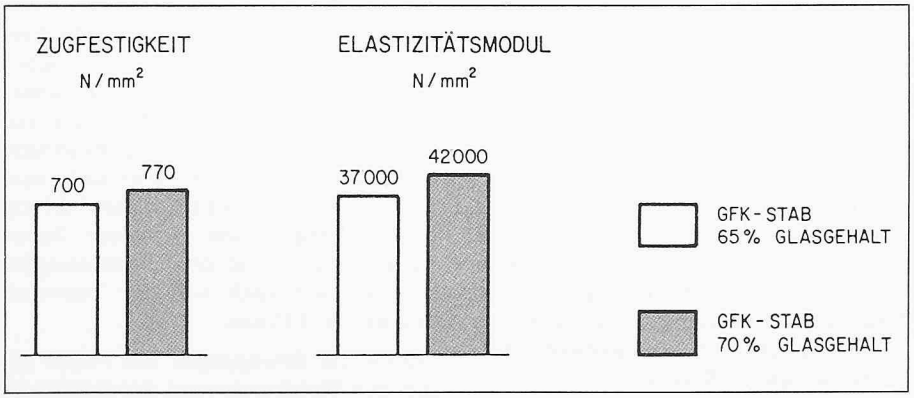
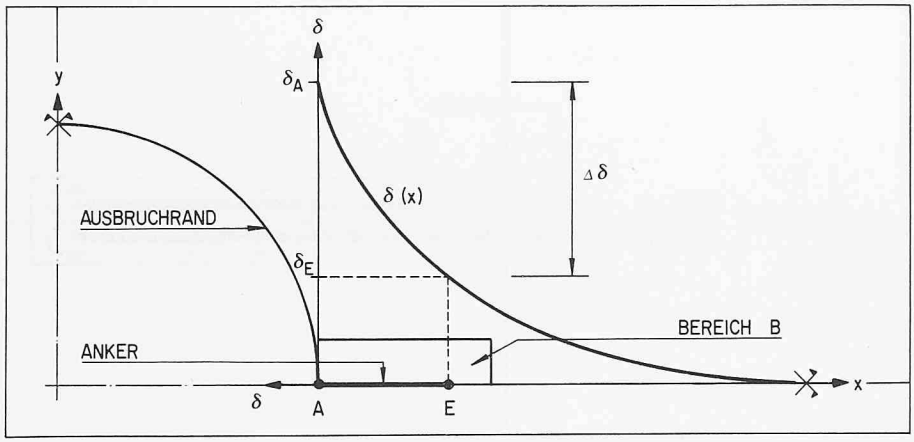


Bild 2b. Materialeigenschaften des GFK-Ankers (Angaben des Herstellers [1])

Bild 3. Theoretischer Verlauf der Deformationen δ in der Umgebung eines Hohlraumes



(A, E). Beim *Freispielanker* (Spreizhülsenanker), bei dem das Gestänge nur in den Punkten A und E durch Ankerplatte bzw. Spreizhülse mit dem Fels verbunden ist, lässt sich die Spannkraft in der Ankerstange über die Dehnung und den Elastizitätsmodul der Ankerstange einfach ableiten. Diese Spannkraft wird beim Spreizhülsenanker über die Ankerplatte in den Fels eingeleitet und erzeugt einen Ausbauwiderstand.

Anders verhält sich das Kräftespiel beim *vollverklebten* Anker, bei dem durch die Haftung mit dem Injektionsmaterial die Krafteinleitung über die ganze Ankerlänge erfolgt. Für eine qualitative theoretische Erfassung dieser Krafteinleitung und für die Abschätzung der Materialbeanspruchung wurde versucht, diesen Vorgang in einem Berechnungsmodell zu simulieren. Bild 3 zeigt den Bereich B um einen Felsanker im Deformationsfeld des Gebirges. Diesen Bereich berechnete man mit einem Finite-Element-Modell, mit dem es möglich war, auch für die dünne Zwischenschicht des Injektionsgutes noch genügend Elemente mit einer vernünftigen Elementform zu generieren. In Bild 4 ist das Berechnungsmodell schematisch dargestellt, das die Berücksichtigung der Inhomogenität infolge verschiedener Materialeigenschaften von Fels, Injektionsgut und Ankern erlaubt.

Die *Lastannahme* erfolgte unter *zwei grundsätzlich verschiedenen Gesichtspunkten*. Der erste Lastfall bestand in der Belastung des Scheibenrandes mit den Knotenkräften Ki ≃ 500 Mp/m². Diese Belastung tritt theoretisch am Ausbruchrand auf, wenn beim Ausbruch die «Stützwirkung» des entfernten Felsmaterials wegfällt [2]. Beim zweiten Lastfall nahm man an, dass die Felsoberfläche über die ganze Breite eine gleichmässig verteilte Verschiebung von δ = 5 mm erfährt.

Bei beiden Lastfällen klingen die Verschiebungen in X-Richtung gegen den hinteren, unverschieblich gelagerten Scheibenrand ab.

Mit der Annahme einer *Belastung des Scheibenrandes durch die Knotenkräfte Ki* (Lastfall 1) entsteht eine ungleichmässige Deformation der Felsoberfläche, d.h., in der Umgehung des Ankers wird die Bewegung zum Hohlraum hin reduziert. Die Schubspannungsverteilung (τ) zwischen Fels und Injektionsgut (Bild 5) verdeutlicht für den Belastungsfall 1 die Wirkung des vollverklebten Ankers. Im vorderen Bereich mit negativer Schubspannung versucht der Felsanker die Felsbewegung in Richtung der angreifenden Kräfte zu verhindern. Die Verankerung selbst liegt im hinteren Teil des Bohrlochs,

d.h. im Bereich geringerer Deformationen. Dieser Rückhalteeffekt ist durch den Wechsel des Vorzeichens der Schubspannungen charakterisiert. Analog zur Schubverteilung wird die Zugspannung (σ_z) im Ankerstab von beiden Enden her stetig aufgebaut und erreicht das Maximum beim Vorzeichenwechsel von τ.

Bei der *Belastung des Scheibenrandes mit einer gleichmässigen Verschiebung* (Belastungsfall 2) soll am Ankeranfang eine Bewegung aufgezwungen werden, wie sie in Wirklichkeit etwa in hartem Gestein durch eine Ankerplatte hervorgerufen wird. Da die Steifigkeit des Ankerstabes gegenüber dem Fels im Modell grösser ist, wird dadurch ein Herausziehen des Ankers simuliert. In diesem Fall entsteht die Schubspannungsspitze am Ankerende, ähnlich wie beim Freispielanker im Bereich der Spreizhülse. Im Fall der Vollverklebung ist jedoch eine kontinuierliche Krafteinleitung über die ganze Ankerlänge gegeben, was gegenüber der Spreizhülse eine Reduktion der Spannungsspitze im Bohrlochtiefsten bewirkt.

Aus den Berechnungsresultaten war ferner ersichtlich, dass die grössten Schubbeanspruchungen am Bohrlochrand bzw. zwischen Fels und Injektionsgut entstehen.

Aus den Berechnungsresultaten ist der massgebende Einfluss der Annahmen für das Modell ersichtlich. Die vorliegenden Resultate sind daher im Sinne einer *qualitativen* Beurteilung der Stabilisierungswirkung eines vollverklebten Ankers zu betrachten. Die zwei Belastungsfälle sollen die mögliche Abweichung der gerechneten Ankerbeanspruchung verdeutlichen, wie sie beim Umsetzen der komplexen Wirklichkeit in ein Berechnungsmodell entstehen kann.

Trotzdem lassen sich aus den Resultaten einige Hinweise über die Stabilisierungswirkung des vollverklebten Felsankers ableiten. Die Schubspannungsverteilung für den Lastfall 1 beispielsweise zeigt die Tendenz, das Gestein im vorderen Ankerbereich durch die Haftung am Injektionsgut zusammenzuhalten und im hinteren Teil des Bohrloches zu verankern. Dieser Effekt ermöglichte im Furka-Basistunnel eine wirksame Verbindung der vertikal gestellten Gesteinsschichten und hat massgebend zur Verfestigung des Felsverbandes beigetragen. Eine weitere Schlussfolgerung aus den Berechnungsresultaten bezieht sich auf das Injektionsmaterial. Mit der Krafteinleitung vom Fels über das Ankerharz in den Ankerstab entstehen hohe Scher- und Zugbeanspruchungen in der Injektionsmasse, was entsprechend hohe Festigkeitseigenschaften des Injektionsmaterials erfordert.

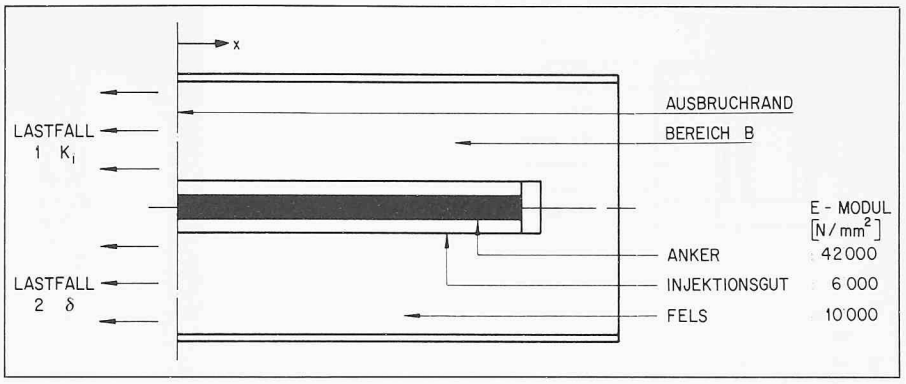


Bild 4. Berechnungsmodell für die FE-Berechnungen zur qualitativen Abschätzung der Beanspruchungen von Injektionsgut und Ankern

Laborversuche

Die Prüfung des vollverklebten Ankers durch Ausziehversuche gibt nicht die gewünschten Angaben über Tragverhalten oder Belastbarkeit. Zugversuche an den Stahlrohrankern haben gezeigt, dass es nicht möglich ist, den vollverklebten Anker ($L \geqq 1{,}0$ m) aus dem injizierten Bohrloch (⌀ 42 und 35) zu ziehen. Der Bruch erfolgte bei solchen Versuchen praktisch immer im Stahlrohr an der Stelle der Krafteinleitung.

Zur Prüfung des Widerstandes eines vollverklebten Ankers sind am ISETH (Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich) Laborversuche an Gesteinsproben mit ausinjizierten Ankern durchgeführt worden.

Die Gewinnung der Proben erfolgte durch das Umbohren von versetzten Ankern in einem Sandstein und im Granit. Die Kerne zersägte man für die

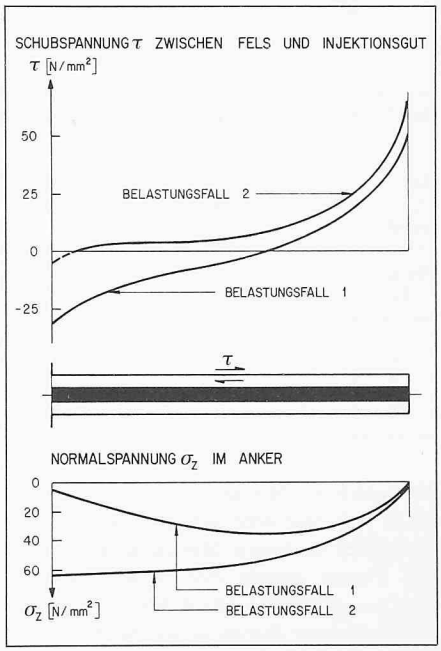


Bild 5. Resultate der Berechnungen für die Belastungsfälle 1 und 2, Schubspannung τ zwischen Injektionsgut und Fels, Normalspannung σ_z im Anker

Bild 6a. Prüfkörper mit ausinjiziertem Anker

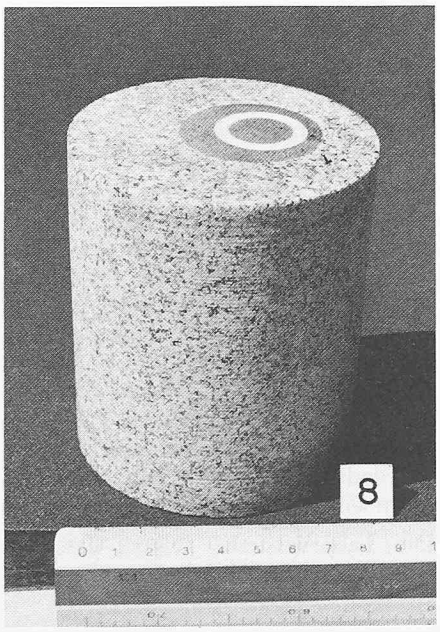
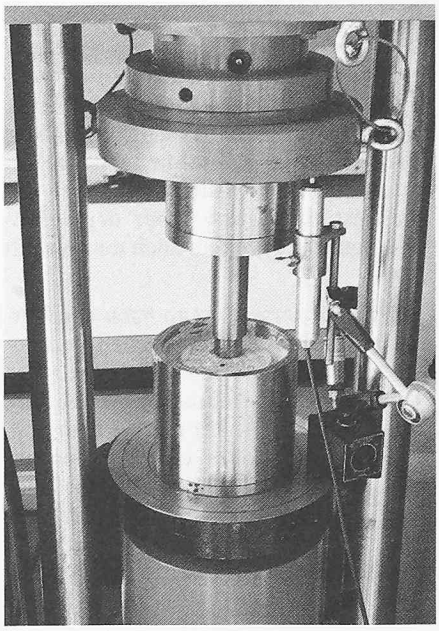


Bild 6b. Eingegossener Prüfkörper im Stahlmantel während des Ausstossversuchs unter der Presse



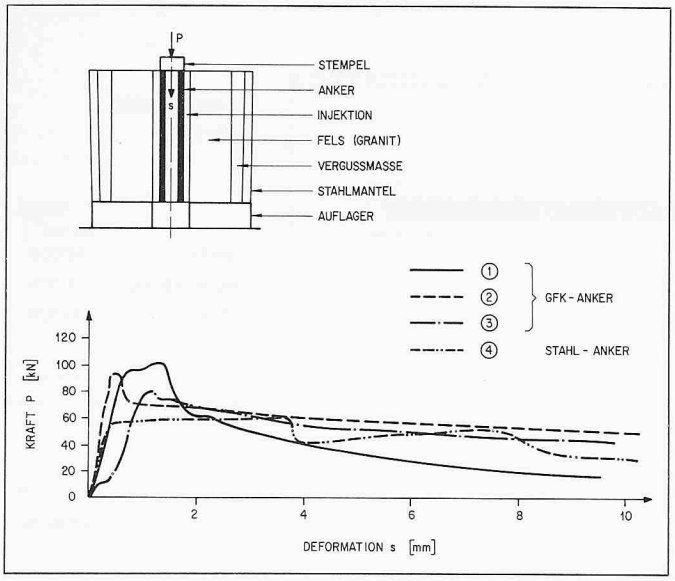


Bild 7. Kraft-/Deformationsdiagramm für vier Ausstossversuche

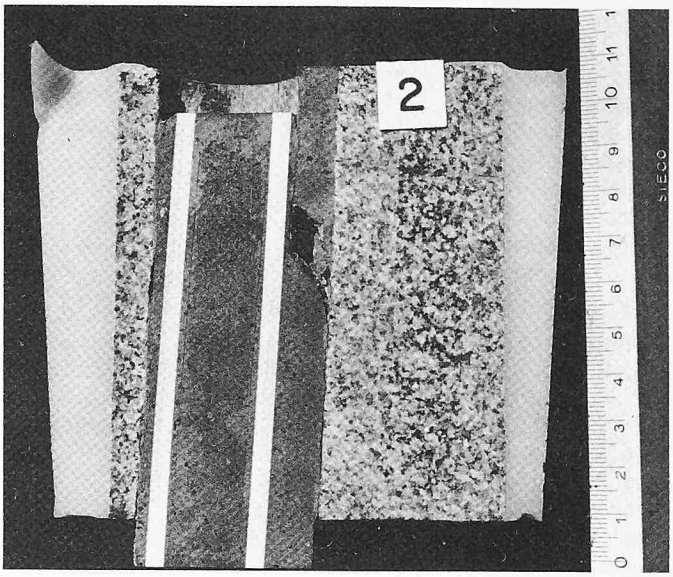


Bild 8. Zersägte Probe nach dem Versuch

Tabelle 1. Höchst- und Restscherwiderstand (τ_{max},τ_{res}) zwischen Injektionsgut und Bohrlochwand

Versuch Nr.	Bohrloch ⌀ mm	Anker ⌀a/⌀i mm	τ_{max} N/mm²	τ_{res} N/mm²
1	35	20/10	9,09	2,91
2	42	27/18	6,97	4,39
3	35	20/10	7,27	4,72
4	42	27/18	4,55	3,49

Versuche in Stücke von 10 cm Höhe (Bild 6a) und goss sie mit hochfestem Polyester in einen Stahlmantel. Unter der Presse wurde der Anker belastet und ausgestossen (Bild 6b). Die seitliche Stützung durch einen Stahlmantel war erforderlich, um ein Spalten des Prüfkörpers bei der Belastung zu verhindern. In Bild 7 sind vier entsprechende Versuchsresultate an Granitproben dargestellt. Die notwendige Belastung P, um den 10 cm langen Anker aus dem Bohrloch zu stossen, beträgt in diesen Beispielen zwischen 80 und 100 kN für die GFK-Anker.

Nach dem Überschreiten der Haftung des Ankers («Höchstfestigkeit») wurde mit dem Versuch weitergefahren, bis das Ankerrohr eine Bewegung S (Bilder 7 und 8) von max. 10 mm zurückgelegt hatte, was einen Aufschluss über die «Restfestigkeit» bzw. über den Gleitwiderstand des Ankers nach dem Bruch ergab.

Die Proben zersägte man nach den Versuchen und stellte bei fast allen Beispielen ein ähnliches Bruchbild fest (Bild 8). Mit der Krafteinleitung über den Stempel in den Anker entsteht im oberen Teil des Rohrs eine Schubspannungskonzentration, durch die der Scherwiderstand im Injektionsgut oder entlang des Ankers überschritten wird. Nach etwa 3 cm verläuft die Rissbildung durch das Epoxidharz zur Bohrlochwand, und auf der restlichen Probenlänge erfolgt die Trennung an der Klebefläche zwischen Injektionsgut und Fels.

Beachtenswert ist die Tatsache, dass es mit den Versuchen nicht gelang, den GFK-Anker auf seiner ganzen Länge aus dem Injektionsgut zu stossen, was die sehr guten Hafteigenschaften zwischen Kunststoffanker und Epoxidharz bestätigt. Durch den Bruch des Ankersystems zwischen Injektion und Fels an der Bohrlochwand erreichte man infolge der Reibung in den meisten Fällen eine hohe Restfestigkeit (Bild 7). Mit zunehmender Bewegung werden die Unebenheiten in den Trennflächen abgeschliffen, was eine langsame Abminderung des Gleitwiderstandes bewirkt. Tabelle 1 zeigt für die vier Versuchsresultate die maximale Schubspannung τ_{max} am Bohrlochrand und den Restwiderstand τ_{res} nach einer Bewegung (S) des Ankers von 5 mm.

Schlussfolgerungen

Die theoretisch ermittelten Schubspannungsverteilungen am Bohrlochrand verdeutlichen die Notwendigkeit vom hohen Scherwiderstand des Injektionsgutes bei der Vollverklebung eines Felsankers. Weiter ist daraus ersichtlich, dass seine Haftung am Fels und am Anker einwandfrei gewährleistet sein muss, um die Kräfte aus den Felsbewegungen in den Ankerstab zu übertragen und dadurch das Gebirge um den Hohlraum wirksam zu stabilisieren.

Die Laborversuche zeigen, dass das Epoxidharz als Injektionsgut diese Anforderungen gut erfüllt und durch seine guten Materialeigenschaften eine Gebirgsverfestigung entlang des Ankers ermöglicht. Das System kann dank seiner chemischen Beständigkeit als dauerhaft betrachtet werden.

Die Injektion durch das Rohr und das Verfüllen des Bohrlochs vom Bohrlochtiefsten her geben ferner die gute Gewissheit, dass der Anker auf seiner ganzen Länge verklebt und der notwendige Formschluss für die erforderliche Haftung der Injektion vorhanden ist.

Ein weiterer positiver Aspekt ist der hohe Restwiderstand nach dem Bruch. Vergleicht man die theoretischen Schubspannungsspitzen an den Ankerenden (Bild 5), so ist es durchaus denkbar, dass an solchen Stellen eine Überbeanspruchung an der Kontaktfläche Injektionsgut/Fels entstehen kann. Hier ist dank der grossen Gleitreibung immer noch ein hoher Widerstand zur Abminderung von Bewegungen vorhanden, und zusätzlich behält der Anker im verbleibenden intakten Bereich noch seine volle Wirkung bei.

Literatur

[1] SAS Stucarit Anker Systeme: Dokumentation über Versuchsergebnisse von Epoxidharz der Firma E. Epple & Co. GmbH, Stuttgart, Bundesrepublik Deutschland

[2] *Kovari, K.*und *Hagedorn, H.*: «Berechnungsmodelle für die Ermittlung der Deformationen und Beanspruchungen in Tunnelbauwerken». International Conference on Subway Construction, Budapest-Balatonfüred, Mai 1975

Adresse des Verfassers: *H. Hagedorn*, dipl. Ing. ETH/SIA, Amberg Ingenieurbüro AG, Zürich und Sargans, Ausstellungsstr. 88, Postfach 3141, 8031 Zürich.