

Bruchstrukturen im Spritzbetonausbau von Tunneln und ihre Interpretation

R. POISEL

1. Bruchstrukturen im Spritzbetonausbau

Ähnlich wie in Betonauskleidungen von Tunneln treten auch im Spritzbeton bei entsprechender Beanspruchung (Überschreitung der jeweiligen Festigkeiten) Zugrisse, Scherbrüche und Abplatzungen auf. Betonauskleidungen entsprechen aufgrund der vorgegebenen Form der hohlraumseitigen Oberfläche noch am ehesten einem (kreis-)zylindrischen Rohr. Im Gegensatz dazu können beim Spritzbetonausbau, dessen Geometrie vor allem durch die Ausbruchsoberfläche vorgegeben wird, zufolge des Trennflächengefüges größere, ebene Oberflächen auftreten. Solche Bereiche können bei entsprechender Beanspruchung durch Knicken zu Bruch gehen (Bild 1).

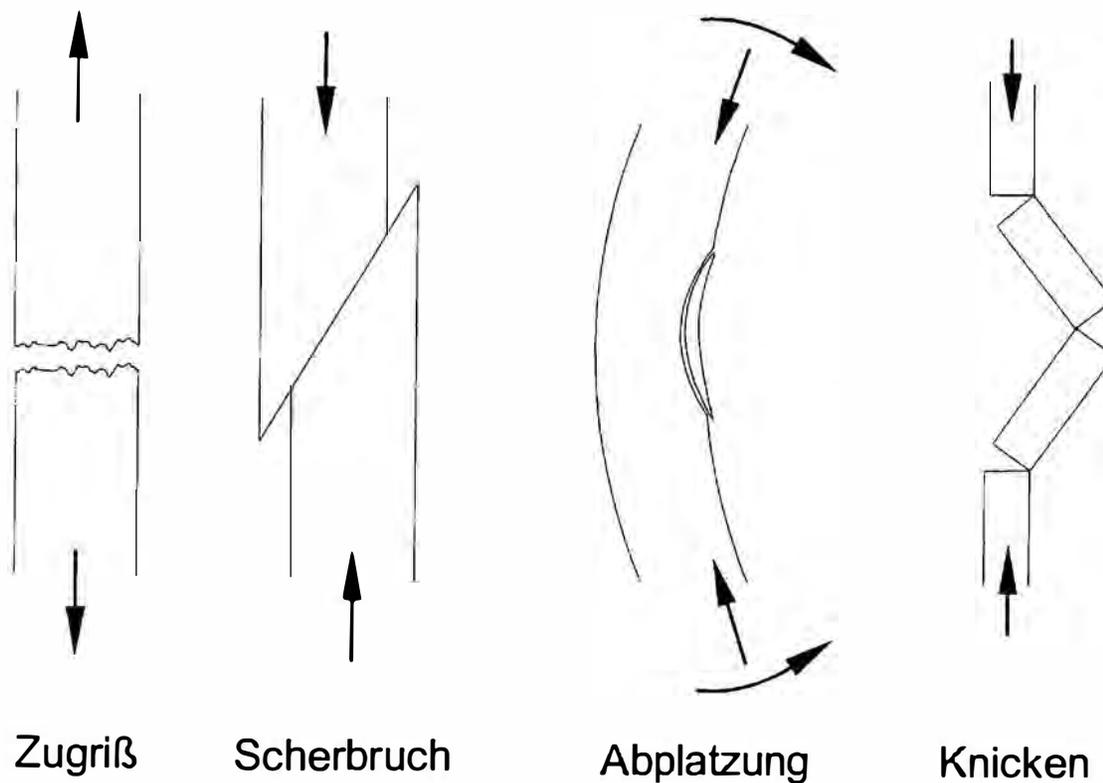


Bild 1: Brucherscheinungen im Spritzbetonausbau von Stollen und Tunneln

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Bruchstrukturen in Betonauskleidungen und im Spritzbetonausbau sind:

1) Der Spritzbetonausbau ist meist dünner als die Betonauskleidung und wird meist schon belastet, wenn er seine Endfestigkeit noch nicht erreicht hat. Das bedeutet, daß der Bruchmechanismus des Gebirges in vielen Fällen den Bruchmechanismus des Spritzbetonausbaues prägt. Die Entscheidung, ob z.B. ein Scherbruch im Spritzbeton durch einen dahinter liegenden Scherbruch im Gebirge aufgeprägt oder durch die Beanspruchung (Deformationen, Spannungen) durch das Gebirge hervorgerufen wurde, ist für die Interpretation dieses Scherbruches unumgänglich (Bild 2).

Im Gegensatz dazu wird ein Scherbruch in der wesentlich steiferen und spröderen Betonauskleidung kaum durch einen dahinter liegenden Scherbruch im Gebirge hervorgerufen, sondern in erster Linie durch eine zu hohe Tangentialspannung (bzw. Normalkraftbeanspruchung).

Bei der Interpretation solcher Brucherscheinungen wäre eine Möglichkeit zur Feststellung von Hohlräumen hinter Auskleidungen sehr hilfreich (vgl. Bild 2). Geophysikalische Methoden, wie z.B. Ultraschall oder Georadar, die sich dafür besonders anbieten, brachten bis jetzt aber noch keine überzeugenden Ergebnisse.

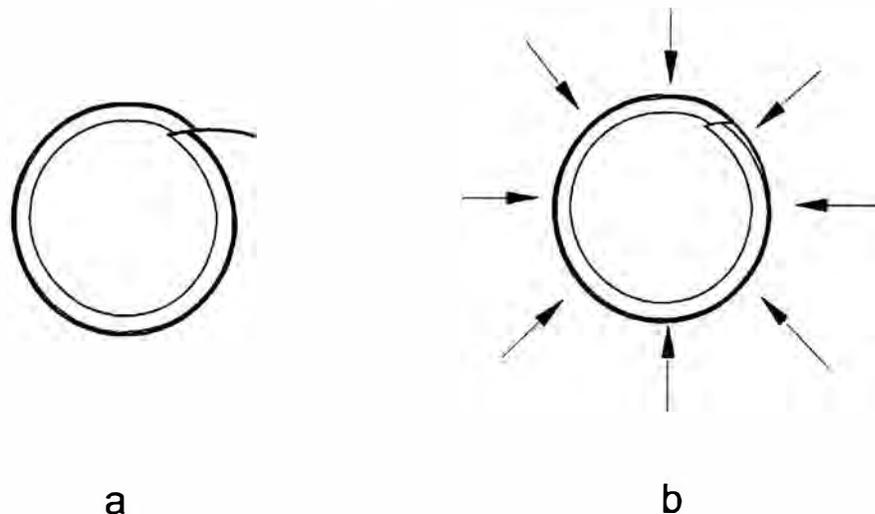


Bild 2: Ursachen für einen Scherbruch im Spritzbetonausbau

- a Scherbruch im Gebirge
- b Überschreitung der Druckfestigkeit des Spritzbetons zufolge der Beanspruchung durch das Gebirge

2) Gegenüber Betonauskleidungen sind Spritzbetonschalen von konventionell ausgebrochenen Tunneln meist komplizierte räumliche Gebilde, die ein weitgehend anderes Tragverhalten bzw. eine andere Lastabtragung als Rohre haben. Die Untersuchungen von Stille et al. (1994) haben z.B. gezeigt, daß strukturierte Schalen mit unregelmäßiger Oberfläche höhere Restfestigkeiten haben als Schalen mit nicht strukturierter, "glatter" Oberfläche.

Bruchstrukturen im Spritzbetonausbau sind daher in Kleinbereichen kaum interpretierbar, weil sie von der mehr oder weniger zufälligen Geometrie der Ausbruchsoberfläche stark beeinflusst werden. Sie müssen vielmehr in ihrer Gesamtheit über den gesamten Querschnitt beurteilt werden.

2. Beispiele für die Interpretation von Bruchstrukturen im Spritzbetonausbau

Bruchstrukturen im Spritzbetonausbau werden vom Gefüge des Gebirges wesentlich beeinflusst. Im folgenden werden Beispiele für Tunnel bzw. Stollen in homogenem Gebirge und in Gebirge, das von einer Störung bzw. Bewegungsbahn geprägt ist, gegeben. Der Begriff homogen bezieht sich dabei auf den Bereich des den Tunnel unmittelbar umgebenden Gebirges.

2.1 Bruchstrukturen im Spritzbetonausbau bei homogenem Gebirge

2.1.1 Regelmäßig geklüftetes Gebirge

Bild 3 zeigt den Fall eines Tunnels in regelmäßig geklüftetem Gebirge mit hohem Zerlegungsgrad. Zuzufolge geringer Gebirgsverspannung hat sich ein Großluftkörper aus dem Verband gelöst und belastet den Ausbau. Die Brüche im Spritzbeton sind nur in ihrer Gesamtheit und auf Grundlage einer guten geologischen Stollendokumentation interpretierbar.

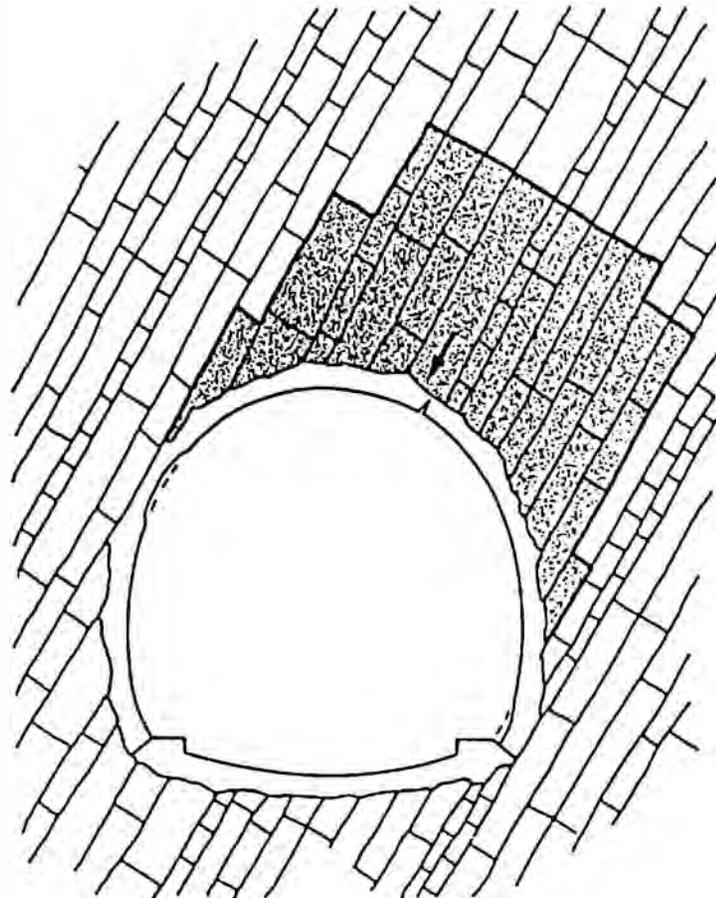


Bild 3: Bruchkörper im Gebirge zufolge Trennflächengefüge und geringer Gebirgsverspannung und daraus resultierende Brucherscheinungen im Spritzbeton (Biegezugriß im rechten Firstbereich, Abplatzungen im linken Kämpfer und in der rechten, unteren Ulme)

2.1.2 Blähendes Gebirge

Bild 4 zeigt die Zerstörungen des 40 cm dicken Spritzbetonausbaues in einem großquerschnittigen Autobahntunnel durch blähendes Gebirge. Die Volumszunahme des Gebirges im Sohlbereich führt zu hohen Biege- und Normalkraftbeanspruchungen im Ausbau und zum Durchscheren der Spritzbetonschale in den Übergangsbereichen Sohle – Ulmen (Bild 5). Auch hier wäre ein einzelner Scherbruch nicht interpretierbar, nur das Gesamtbild läßt die wahren Bruchursachen erkennen.

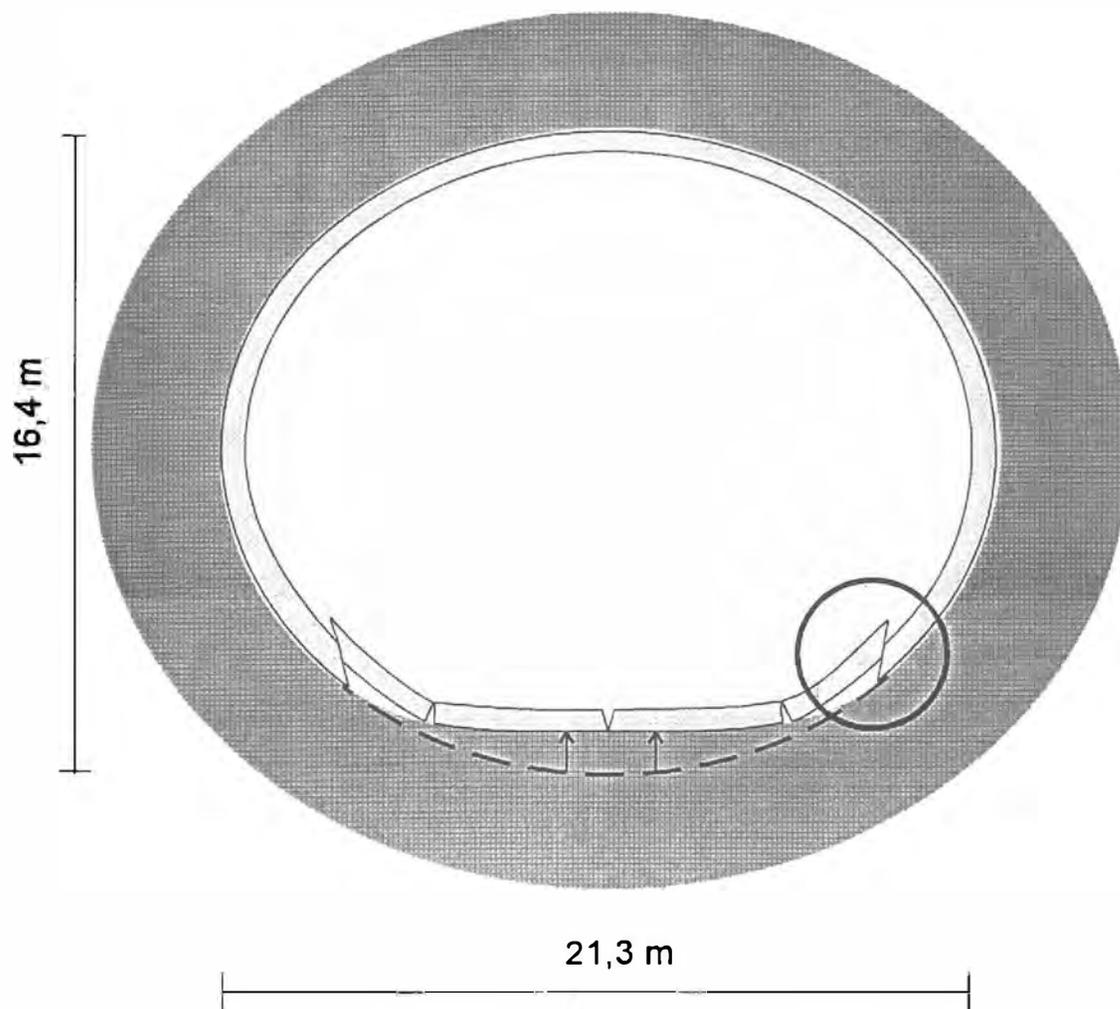


Bild 4: Brucherscheinungen im Spritzbetonausbau eines großquerschnittigen Autobahntunnels zufolge Sohlhebungen durch blähendes Gebirge (schematische Darstellung)



Bild 5: Scherbruch im Spritzbeton zufolge Sohlhebungen durch blähendes Gebirge
(Foto: I. Reichl)

2.2 Bruchstrukturen im Spritzbetonausbau zufolge Störungen bzw. Bewegungszonen

Im folgenden soll besonders auf die Beeinflussung des Tragverhaltens des Systems Gebirge - Spritzbeton durch Störungen bzw. Bewegungszonen eingegangen werden. Störungen bzw. Bewegungszonen stellen Flächen dar, die Schubkräfte in geringerem Ausmaß als das umgebende Gebirge übertragen können. Je nach der räumlichen Beziehung zwischen Tunnel und Störung und dem in situ-Spannungszustand ergeben sich daraus verschiedene Fälle der Einflußnahme. In diesem Zusammenhang wird auf die Arbeit von Zischinsky (1996) besonders hingewiesen, die zahlreiche Beispiele (Bilder) zu diesem Thema enthält.

2.2.1 *Störung verläuft annähernd parallel zum Tunnel und schneidet den Tunnel nicht*

In unmittelbarer Nähe eines Tunnels verlaufende Störungen bewirken auf Grund der begrenzten Schubkraftübertragung (ungünstige Orientierung der größten Hauptnormalspannung zur Störung) eine Konzentration der Tangentialspannungen in hohlraumnahen Bereichen (Bild 6). Diese Spannungskonzentrationen führen meist zum Brechen des Gebirges und zu erhöhtem Stützmittelbedarf in diesen Bereichen.

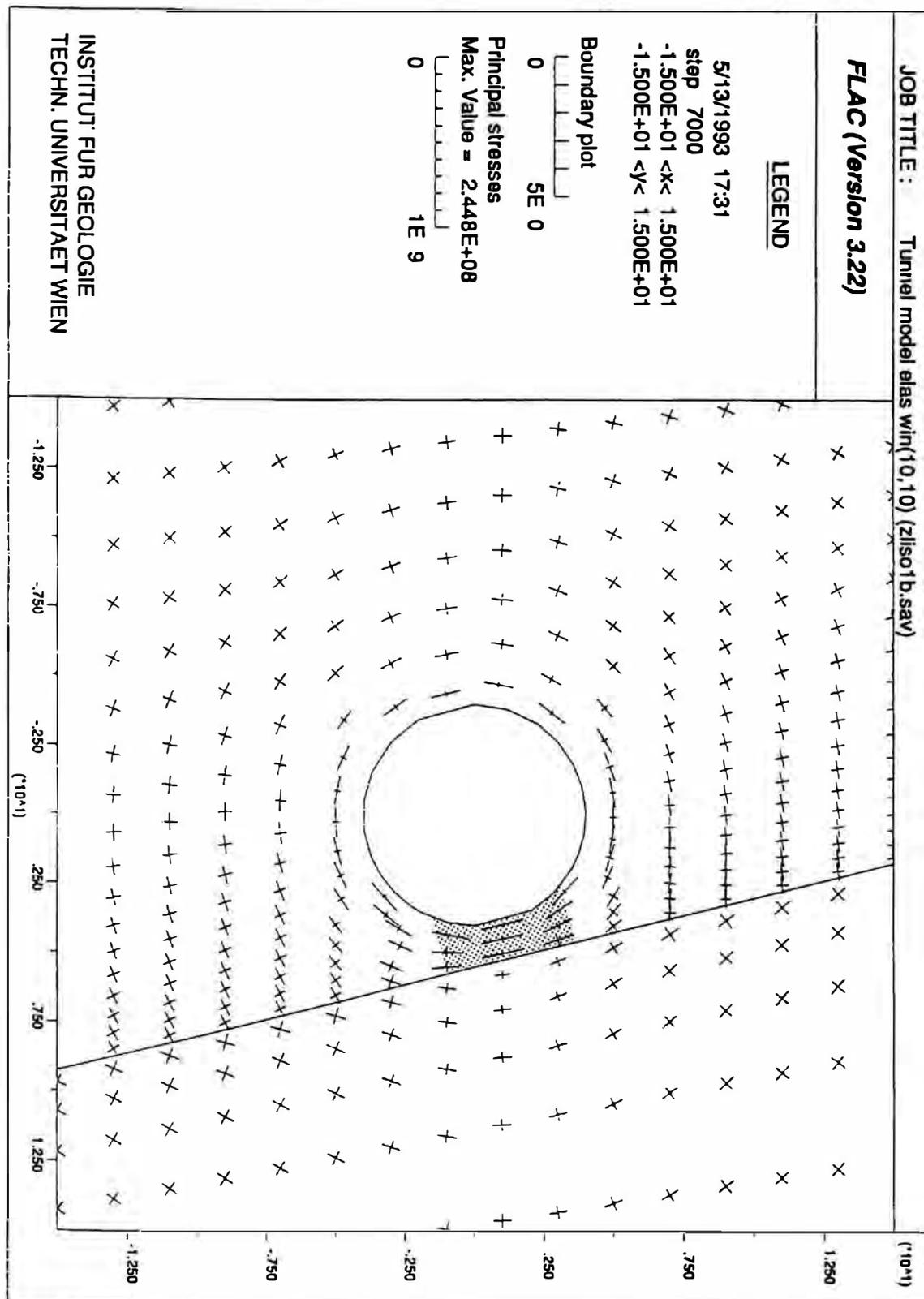


Bild 6: Konzentration der Tangentialspannungen zwischen Störung und Tunnel zufolge der begrenzten Schubkraftübertragung an der Störung (Zettler, 1997)

2.2.2. Störung schneidet den Tunnel

A) Störungen, bei denen im Primärspannungszustand die Scherwiderstände wesentlich größer als die auftretenden Scherkräfte sind (Störung nicht nahe dem Grenzgleichgewicht)

An Störungen, bei denen im Primärspannungszustand die Scherwiderstände wesentlich größer als die auftretenden Scherkräfte sind, werden nach dem Tunnelausbruch nur in jenen Fällen Verschiebungen an der Störung auftreten, in denen die Orientierung der größten Hauptnormalspannung (meist Tangentialspannung) zur Störung ungünstig ist (vgl. 2.2.1).

Bild 7 zeigt, daß im Fall eines Tunnelvortriebes im Bereich einer flach einfallenden Störung Verschiebungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Position der Störung im Tunnelquerschnitt auftreten. Diese Verschiebungen sind in den Hohlraum gerichtet.

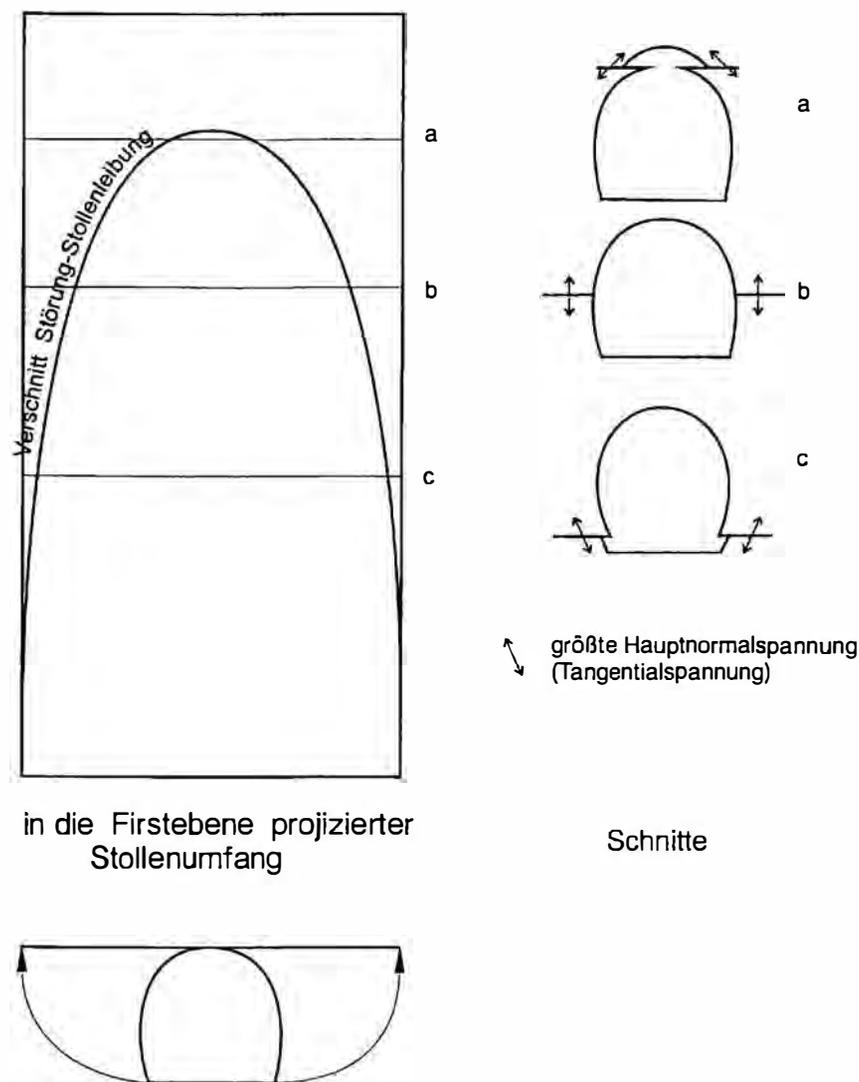


Bild 7: In den Tunnel bzw. Stollen gerichtete Verschiebungen an Störungen bei ungünstiger Orientierung der größten Hauptnormalspannung zur Störung (Fall a und c; Scherwiderstände an der Störung im Primärspannungszustand wesentlich größer als die Scherkräfte)

B) Störungen, bei denen im Primärspannungszustand die auftretenden Scherkräfte und die Scherwiderstände ungefähr gleich groß sind (Störung z.B. zufolge Tektonik im Primärspannungszustand im Grenzgleichgewicht).

Störungen sind in den wenigsten Fällen ebene, glatte Flächen, die über ihre ganze Erstreckung überall gleich intensiven Kontakt haben. Die Kraftübertragung an Störungen erfolgt vielmehr bereichsweise stark unterschiedlich, die Störung „hängt“ an begrenzten Bereichen. Erfolgt in einem solchen Bereich ein Stollen- oder Tunnelausbruch, fällt dieser Bereich für die Kraftübertragung aus und die Kraftübertragung über die Störung muß in andere Bereiche umgelagert werden. Diese Umlagerung ist mit Deformationen und Verschiebungen an der Störung verbunden (Versetzung der Störungsufer gegeneinander). In einem solchen Fall treten daher im Tunnel zusätzlich zu den „normalen“ Umlagerungen vom Primär- in den Sekundärspannungszustand und den daraus resultierenden Deformationen (Fall A) Versetzungen der Störungsufer gegeneinander auf. Dies führt zu Verschiebungen an der Störung, die an gegenüberliegenden Punkten des Tunnelprofils (aber auf dem selben Störungsufer) gleichsinnig ausgerichtet sind. (Im Fall A treten im Gegensatz dazu an gegenüberliegenden Punkten des Tunnelprofils in den Hohlraum [gegensinnig] gerichtete Verschiebungen auf.) Auf die Gefahr solcher Verschiebungen wies bereits Stini (1953) hin, über konkrete Fälle berichten Poscher (1994) aus dem Tunnel Schönrain und Gamsjäger (1996).

Der Spritzbetonausbau wird bei solchen Verschiebungen an der Störung einer einfachen Scherung unterworfen (Bild 8). Dies bedeutet, daß im Spritzbetonausbau entlang dieser Störung Riedel-Brüche auftreten (Bild 9).

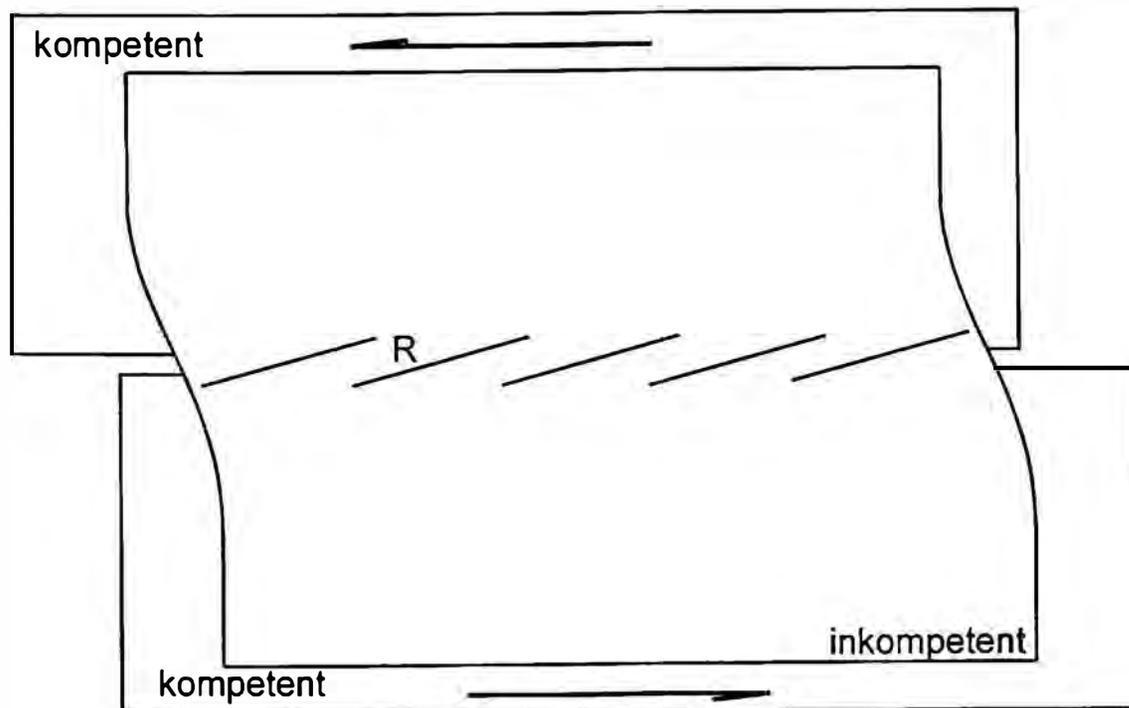


Bild 8: Einfache Scherung einer inkompetenten Lage zufolge Versetzung zweier kompetenter Blöcke gegeneinander und daraus resultierende Riedel-Brüche

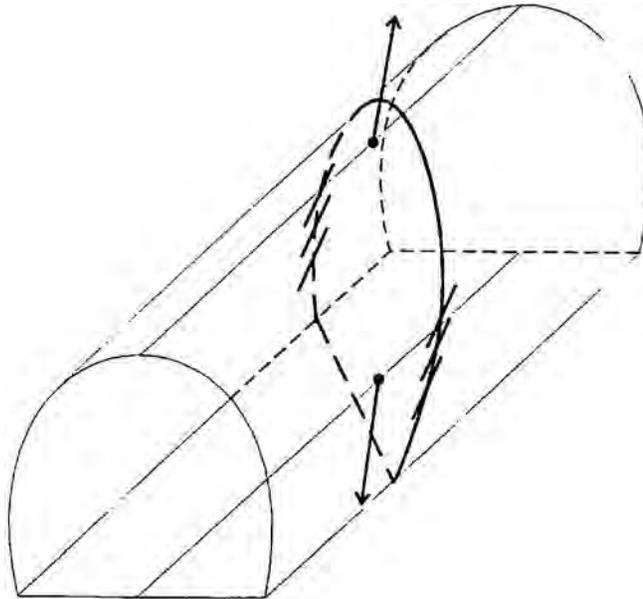


Bild 9: Riedel-Brüche im Spritzbetonausbau zufolge einer Scherverschiebung an einer Störung (Scherwiderstände und Scherkräfte im Primärspannungszustand z.B. zufolge Tektonik ungefähr gleich groß)

Solche Brüche konnten auch in einfachen Modellversuchen (Stern, 1997) beobachtet werden. In diesen Modellversuchen wurde in eine halbe kreiszylindrische Hohlform eine dünne Schicht einer Mischung aus Sand, Mehl, Salz und Öl eingebracht, die den Ausbau modellierte. Nach einer Scherverschiebung entlang einer schräg zur Hohlformachse verlaufenden Schnittfläche traten im Modellausbau Bruchflächen mit einer Riedel-Brüchen entsprechenden Orientierung auf (Bild 10). Die Intensität der Zerlegung hängt dabei u.a. von der Haftfestigkeit des Ausbaues am Gebirge ab.

Treten daher im Spritzbetonausbau eines Stollens oder Tunnels Riedelbrüche entlang einer Störung bzw. einer Bewegungsbahn auf, erfolgten an dieser Scherverschiebungen. Kann als Ursache für solche Brüche eine Massenbewegung ausgeschlossen werden, sind diese Verschiebungen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Stollen- bzw. Tunnelausbruch zurückzuführen. Verläuft die Störung unter einem spitzen Winkel zur Stollen- bzw. Tunnelachse, läßt dies auf eine bedeutende Druckbeanspruchung des Gebirges in Richtung der Tunnelachse schließen. Diese Beobachtungen sollten daher zu Maßnahmen führen, die eine schadhafte Aufnahme großer Längsdeformationen ermöglichen.

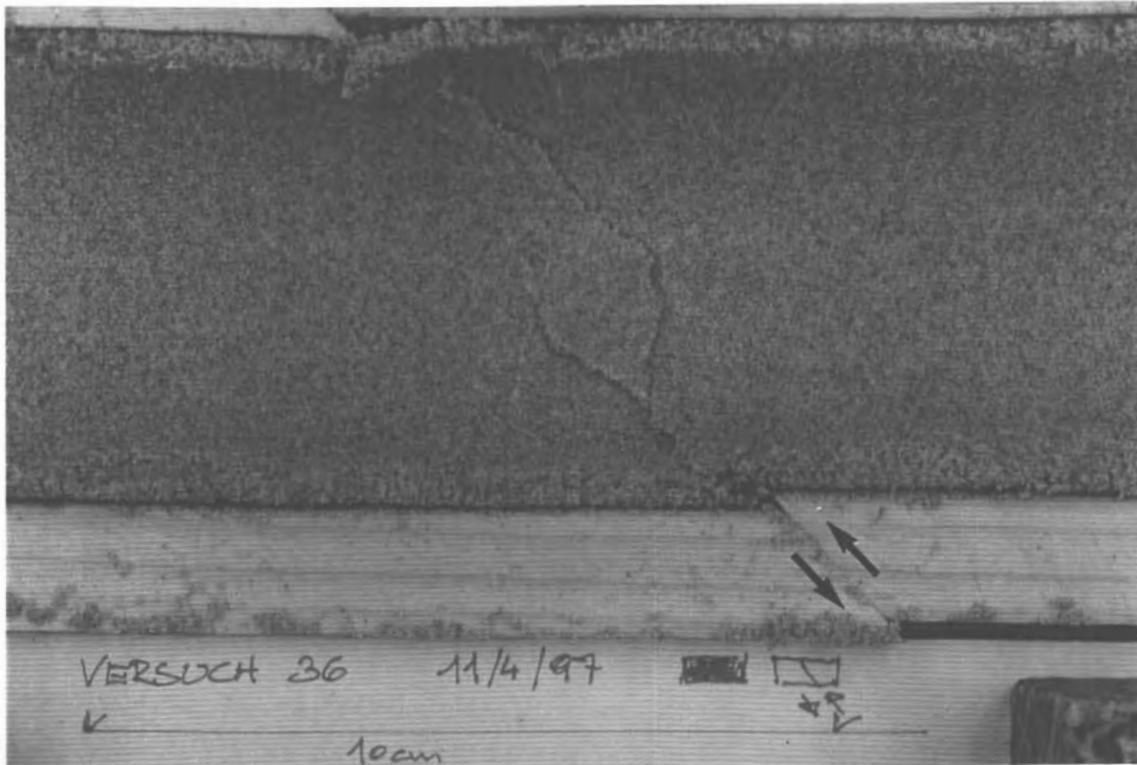


Bild 10: Bruchstrukturen im Tunnelausbau zufolge einer Scherverschiebung an einer Störung im Modellversuch (Blick in den halben, kreisförmigen Hohlzylinder)

An dieser Stelle muß ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß nicht alle en-echelon-Brüche im Spritzbetonausbau Riedel-Brüche sind. Bild 11 zeigt schematisch einen Fall, in dem in der Ulme eines Stollens schräge, parallel liegende Brüche auftraten. Diese Brüche folgten jedoch nicht einer Störung, wie die geologische Stollendokumentation zeigte. Absenkungen des Stollens zufolge Lösungsvorgängen hatten vielmehr zu einer Biegebeanspruchung des Ausbaues und zur Bildung von schrägen Zugrissen (vgl. Biegung eines Betonbalkens) im dargestellten Bereich geführt.

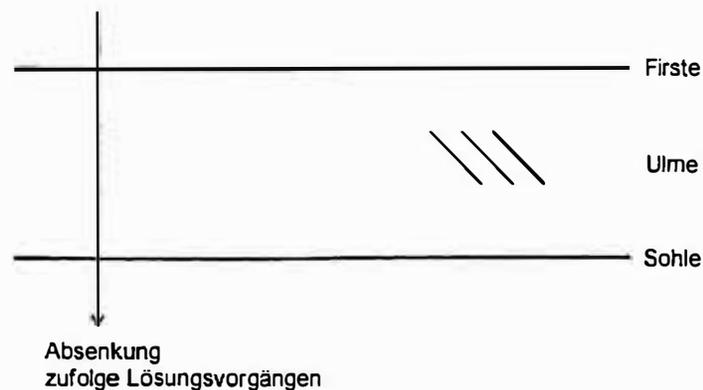


Bild 11: Schräge Zugrisse in der Ulme eines Stollens zufolge Absenkungen auf Grund von Lösungsvorgängen (schematische Darstellung)

3. Abschließende Bemerkung

Bruchstrukturen im Spritzbetonausbau von Stollen und Tunneln enthalten eine Fülle an Informationen, auf die man nicht verzichten sollte. Die Kosten für eine Dokumentation von Bruchstrukturen sind im Vergleich zum Gewinn, den man aus solchen Aufzeichnungen ziehen kann, gering. Bereits beim Vortrieb des Scheiteltunnels der Tauernautobahn führte die Kartierung der Bruchstrukturen im Spritzbetonausbau im Rahmen der ingenieurgeologischen Tunneldokumentation zur Entwicklung der heute oft eingesetzten Längsschlitzte im Spritzbetonausbau. Voraussetzung für die richtige Interpretation von Bruchstrukturen und die richtigen Konsequenzen daraus ist allerdings eine gute ingenieurgeologische Stollen- bzw. Tunneldokumentation.

Literatur

- Gamsjäger, H.: Untersuchung der Schäden am Außenring des Semmering Basistunnel Pilotstollens und deren Interpretation. Diplomarbeit am Institut für Geologie der Technischen Universität Wien. 1996.
- Poisel, R., Öhreder, H.: Risse in Betoninnenringen von Tunneln und deren Beurteilung im Hinblick auf die Standsicherheit. Felsbau 9, 117-125 (1991)
- Poisel, R., Zettler, A.H., Unterberger, W.: Maintenance and stability of damaged tunnels. Slovak Journal of Civil Engineering 4, 25-31 (1996).
- Poisel, R., Zettler, A.H., Unterberger, W.: Tunnelling in Landslides. Proc. Eurock 96. Turin 1996, 667-674 (1996).
- Poscher, G.: Tunnelvortrieb in einem Grabenbruchsystem bei hohen horizontalen Primärspannungen. Felsbau 12, 269-274 (1994).
- Stern, H.: Modellversuche zur Bildung von Riedel-Brüchen im Spritzbetonausbau. Seminararbeit am Institut für Geologie der Technischen Universität Wien (unveröff.), 1997.
- Stille, H., Chang, Y., Holmberg, M.: Support of weak rock - from theory to practice. Felsbau 12, 261-268 (1994).
- Stini, J.: Verwerfungen und Talsperrenbau. Geologie und Bauwesen 20, 152-166 (1953).
- Zettler, A.H.: Unterlagen zur Lehrveranstaltung „Finite-Difference-Models in Geoengineering“ (1997).
- Zischinsky, U.: Wirkungsmechanismen geologischer Störungen in Tunneln. Felsbau 14, 342-346 (1996).