

Tunnelvortrieb in einem Grabenbruchsystem bei hohen horizontalen Primärspannungen

Von Dipl.-Geol. Dr. Gerhard Poscher

In Mitteleuropa herrschen NW-SE-orientierte horizontale Hauptspannungen vor (1, 2)*, über deren Auswirkungen im Mainfränkischen Gebiet Erfahrungen vorliegen (Bild 1).

Von Tunnelbauten im Gebiet der Süddeutschen Großscholle sind nur wenige Beispiele, wie jenes des Fensterstollens für den Landrückentunnel (Judtmann, ILF, pers. Mitteilung), über tunnelbautechnisch relevante Auswirkungen hoher horizontaler Druckbeanspruchungen bekannt.

Dieser Umstand wird auf methodische Ursachen der bisher üblichen Methoden der Erfassung der Hohlraumverformung zurückgeführt. Erst durch den Einsatz der berührungslosen, geodätischen Messung der räumlichen Verformungen bei Tunnelvortrieben, die seit Ende des letzten Jahrzehnts in zunehmendem Maße zur Anwendung gelangt, sind vektorielle Aussagen zum Verformungsverhalten der Spritzbetonschale im Rahmen der Routinemessungen möglich. Dieses Verfahren wurde beim Vortrieb des Tunnels Schönrain 1990/92 eingesetzt (Bild 2). Auswirkungen erhöhter horizontaler Primärspannungen wurden mit diesem Verfahren dabei erstmals durch gegensinnige Längsverformungen der Ulmen bei gleichzeitigem Bruch der Spritzbetonschale nachgewiesen.

Geologische Situation

Das Arbeitsgebiet liegt im nördlichen Bereich der Süddeutschen Großscholle. Die saxonische Tektonik führte im Mainfränkischen Raum zu einer Zerlegung in nahezu äquidistante herzynisch streichende Schollenstreifen (3). Der Tunnel Schönrain durchörtert in diesem herzynisch geprägten Mosaik auf knapp 4 km Länge die „Buntsandsteinplatte“ des Mühlbergs südlich von Gemünden am Main. Im Zuge des Vortriebs wurde nahezu die gesamte stratigraphische Abfolge des Mittleren und Oberen Buntsandstein (4) durchörtert.

Der Verfasser ist Mitarbeiter der ILF Ingenieurgesellschaft Lässer – Feizlmayr.

Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf den Quellennachweis am Schluß des Aufsatzes.

Rund 70 % des Vortriebs wurden durch einen herzynisch streichenden Grabenbruch bestimmt, der entsprechend seines strukturgeologischen Inventars als Scherbruchgraben interpretiert wird (5). Der Grabenbruch bildet zur Krümmung der Tunneltrasse eine Sehne und wurde dementsprechend im Zuge des Vortriebs zweimal schweifend gequert. Auf einer Strecke von knapp 300 m verlief die nordöstliche Grabenflanke tunnelachsenparallel.

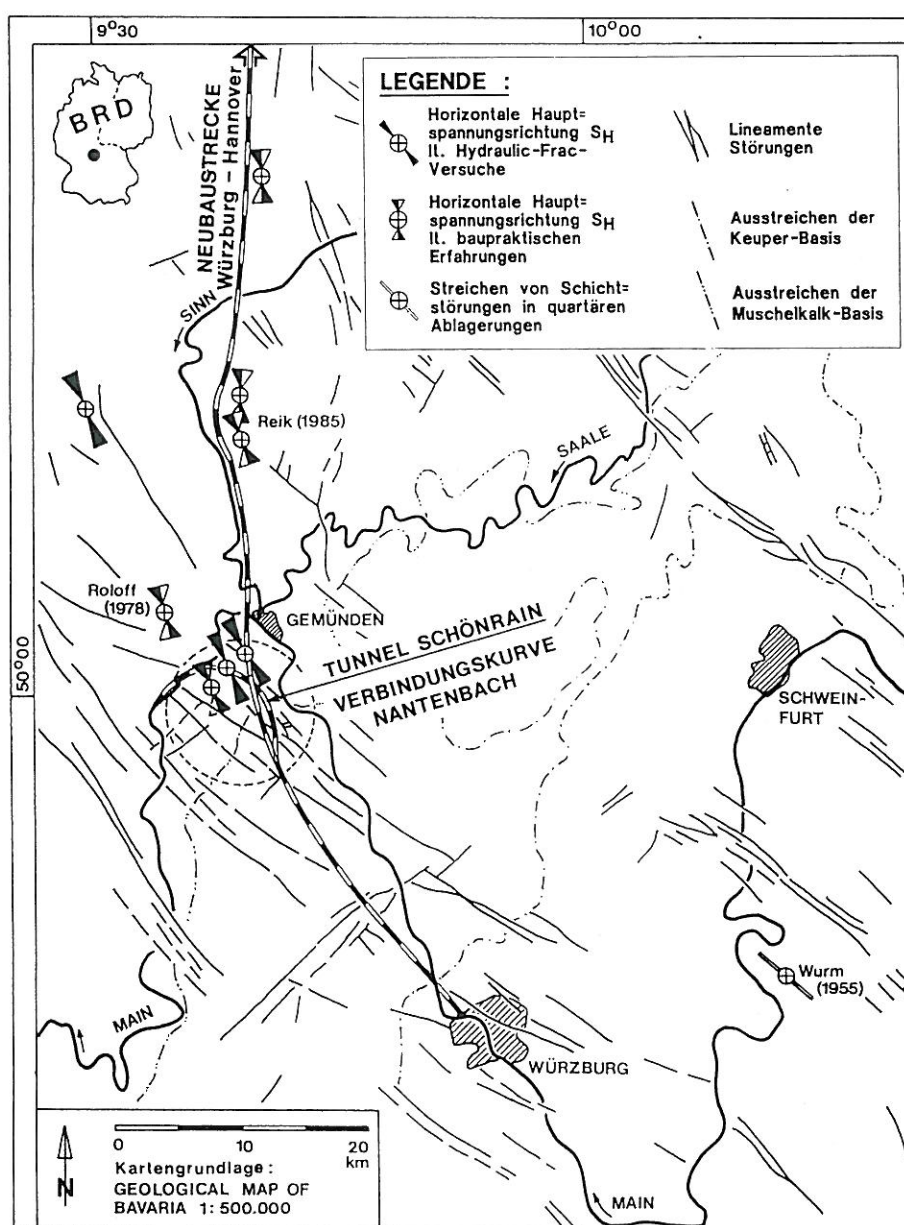


Bild 1 Geologische Übersicht des Mainfränkischen Gebietes mit Ergebnissen zur horizontalen Hauptspannung.

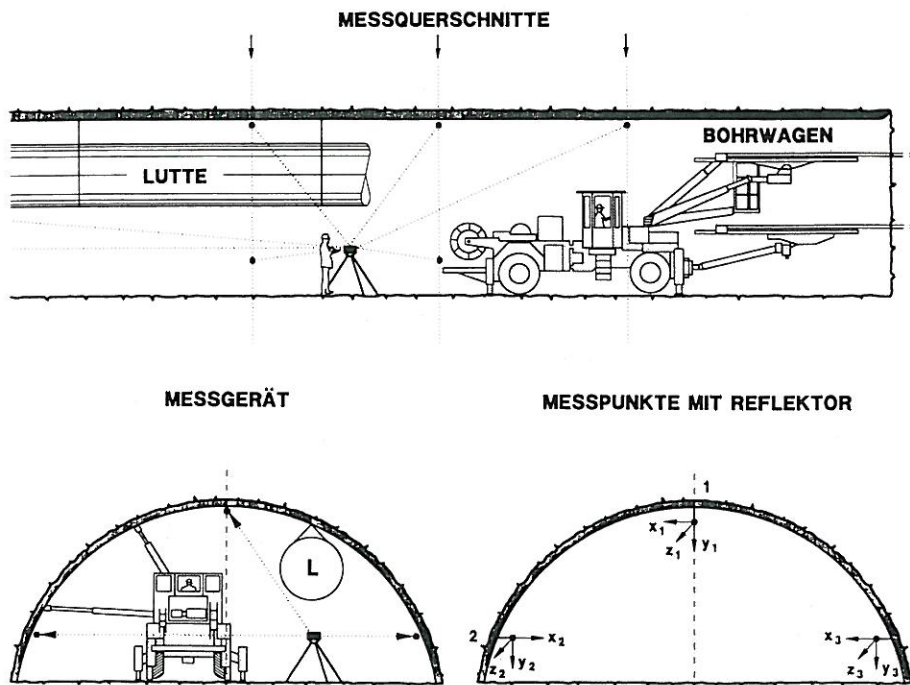


Bild 2 Meßmethode zur Bestimmung der Hohlraumverformung.

Gebirgstypen und Tunnelabschnitte im Tunnel Schönrain mit homogenen geologisch-geotechnischen Verhältnissen.

Typ Abschnitt	Tektonische Position	Stratigraphische Position	Länge m
A	Horstbereich	Mittlerer Buntsandstein	1000
B	Grabenbruch (Vorgaben)	Mittlerer Buntsandstein	280
A	Horstbereich	Mittlerer Buntsandstein	40
C1	Scherbruchgraben (Südwestflanke)	Mittlerer Buntsandstein	65
C2	Scherbruchgraben (Grabenzentrum)	Mittlerer Buntsandstein	1389
C3	Scherbruchgraben (Nordostflanke)	Mittlerer-Oberer Buntsandstein	310
D1	Scherbruchgraben (Grabenzentrum)	Oberer Buntsandstein	505
D2	Scherbruchgraben (Südwestflanke)	Oberer Buntsandstein	58
E	Horstbereich	Oberer Buntsandstein	262

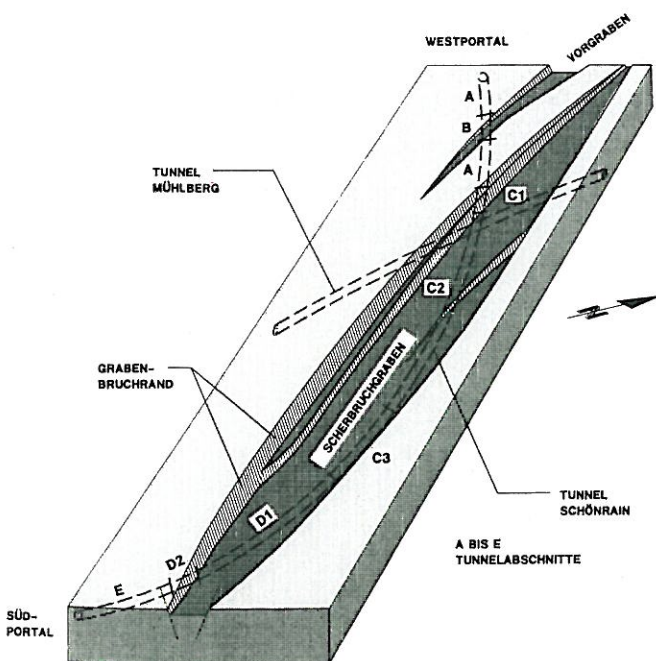


Bild 3 Strukturgeologische Situation Tunnel Schönrain.

lel innerhalb der Tunnelröhre. Die südwestliche Grabenflanke wurde knapp westlich der Unterfahrung des Tunnels Mühlberg gequert (Bild 3, Abschnitt C1, C3).

Aufgrund der geotechnischen Eigenschaften können die geologischen Verhältnisse im Tunnel Schönrain nach der Tabelle vereinfacht in 9 Gebirgstypen zusammengefaßt werden.

Der Harrbacher Scherbruchgraben kann obertags als morphologisch deutlich ausgeprägte Einsenkung abgegrenzt werden. Sowohl nach Nordosten und Südwesten verliert das System an Breite und Einbruchtiefe und vermittelt zu anschließenden Scherbruchgräben, wie dem im Abschnitt Typ B dargestellten (Bilder 3 und 4).

Der Gesamtversatz zwischen Grabenzentrum und den obertags aufgeschlossenen Horstbereichen beträgt bis zu 100 m, in der Ortsbrust wurden Versätze bis maximal 30 m abgeleitet. Die Orientierung des Grabens fällt mit der regionalen und rezent wirksamen Hauptspannung in horizontaler Ebene zusammen. Die Grabenbildung ist als geologisch relativ jung einzustufen, da in der obertags ausgebildeten Einsenkung keine nennenswerten Lockerseimentvorkommen auftreten.

Regionales Spannungsfeld

Die regionalen Primärspannungen im süddeutschen Raum wurden wiederholt auf methodisch breiter Ebene analysiert (6 bis 8). Für den westeuropäischen Bereich wurde eine durchschnittliche Haupthorizontalspannungsrichtung von $145^\circ \pm 26^\circ$ ermittelt (2). Beispiele zu neotektonischen Aktivitäten im süddeutschen Raum sind zahlreich (7). Aus dem mainfränkischen Raum sind Zeugen junger tektonischer Bewegungen in quartären Sedimenten aus dem Raum östlich von Würzburg dokumentiert (9). Ferner liegen folgende Beispiele über bautechnisch relevante Auswirkungen hoher horizontaler Druckspannungen vor: Roloff (10) berichtet über Horizontaldruckerscheinungen in Form von Auffaltungen der Felssohle im Sindeltal (westlich Gemünden/Main) quer zur Richtung der größten Horizontalspannungskomponente. Reik (11) beschreibt vergleichbare Verformungen von Gründungssohlen bei Ingenieurbauwerken im Sinntal (vergl. Bild 1).

Ergebnisse von In-situ-Spannungsmessungen (Hydraulic-Fracturing-Verfahren) ergänzen die baupraktischen Erfahrungen. Im Zuge der geologischen Erkundung für die Bauvorhaben Tunnel Mühlberg und Tunnel Schönrain der Deutschen Bundesbahn wurden Horizontalspannungsmessungen durchgeführt (12, 13). Die Haupthorizontalspannungsrichtung wurde im Mittel mit 150° bzw. 156° bestimmt, wobei im Zentralbereich des Grabenbruchs erhöhte Horizontalspannungen festgestellt wurden (Bild 4). Beim Bau des Tunnels Mühlberg (1982/86) wurden beim

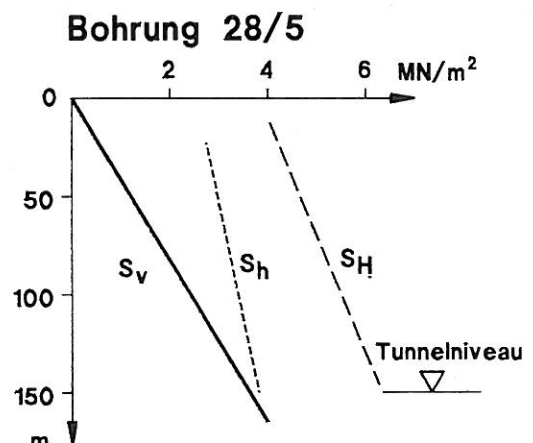
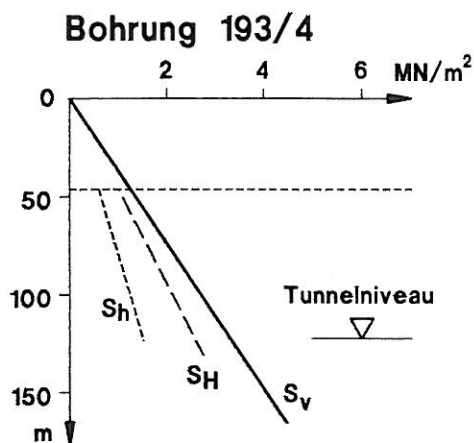
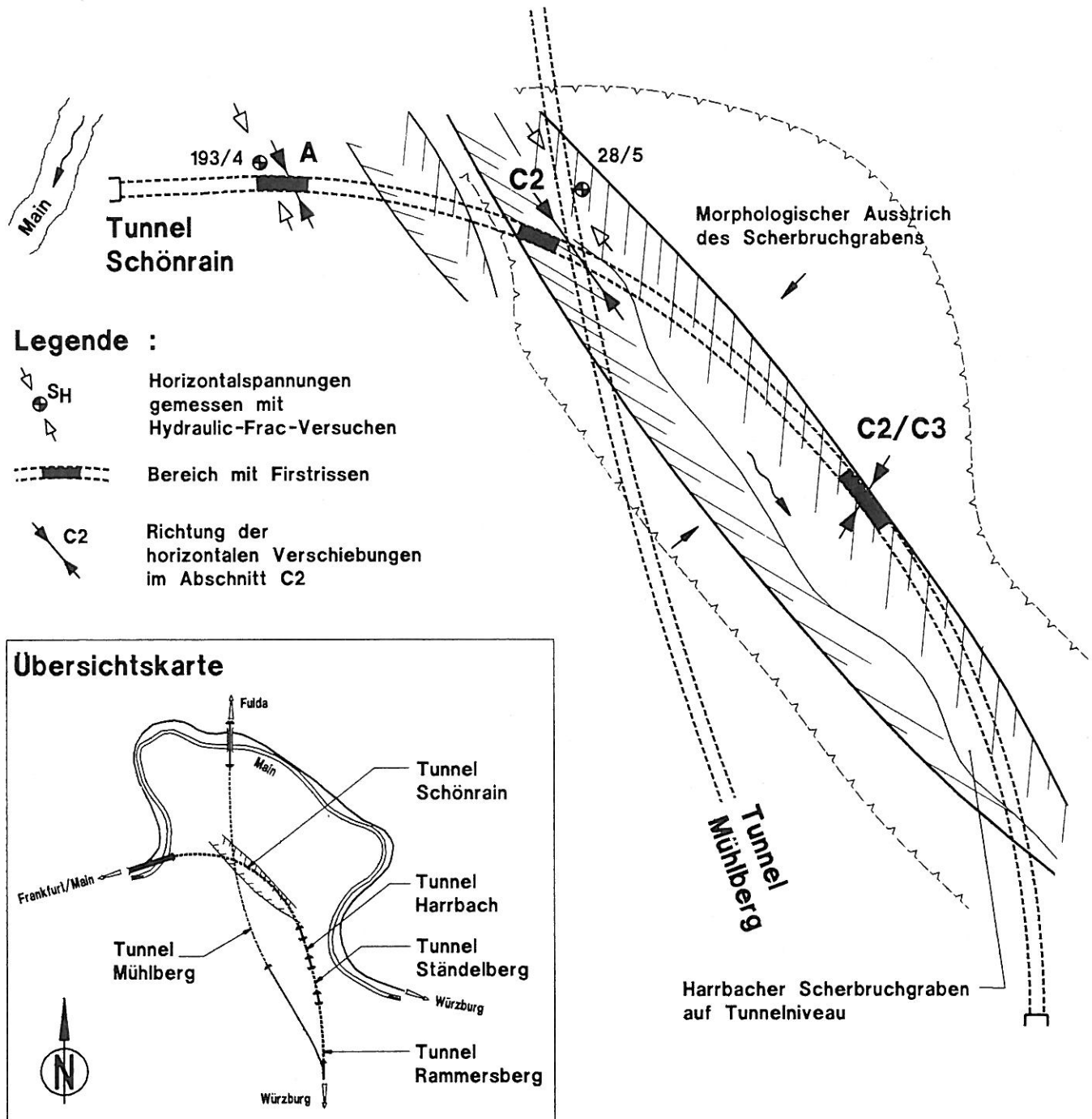


Bild 4 Ergebnisse der Horizontalspannungsmessungen und Richtung der horizontalen Deformationen im Tunnel Schönrain.

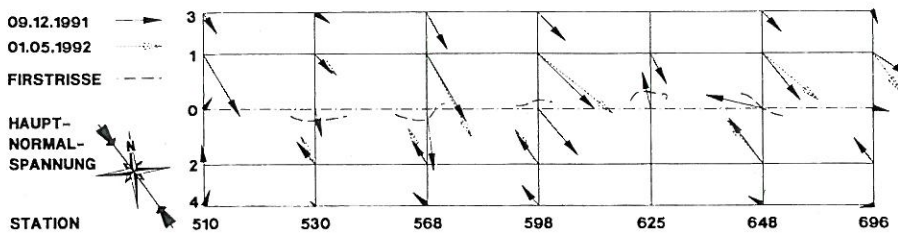


Bild 6 Horizontalverformung und Firstrisse im Abschnitt A (Meßpunkte 0-5 laut Bild 5).

gefunden, in der Sohle wurden hingegen keine Auflockerungen festgestellt.

Dem Einfluß der horizontalen Primärspannungen auf das Verformungsverhalten wurde durch den Einbau von hydraulischen Druckgebern im Spritzbeton quer und längs zur Tunnelachse nachgegangen.

Die Meßgeräte wurden bei der Sanierung der Spritzbetonschale eingebaut und zeigen daher langfristige Spannungsumlagerungen. Die Ergebnisse zeigen, daß die Spritzbetonspannung in Tunnel längsrichtung mit einem Maximum von 4 MN/m^2 deutlich über jener in Querrichtung von $0,5$ bis $1,2 \text{ MN/m}^2$ liegt (Bild 7).

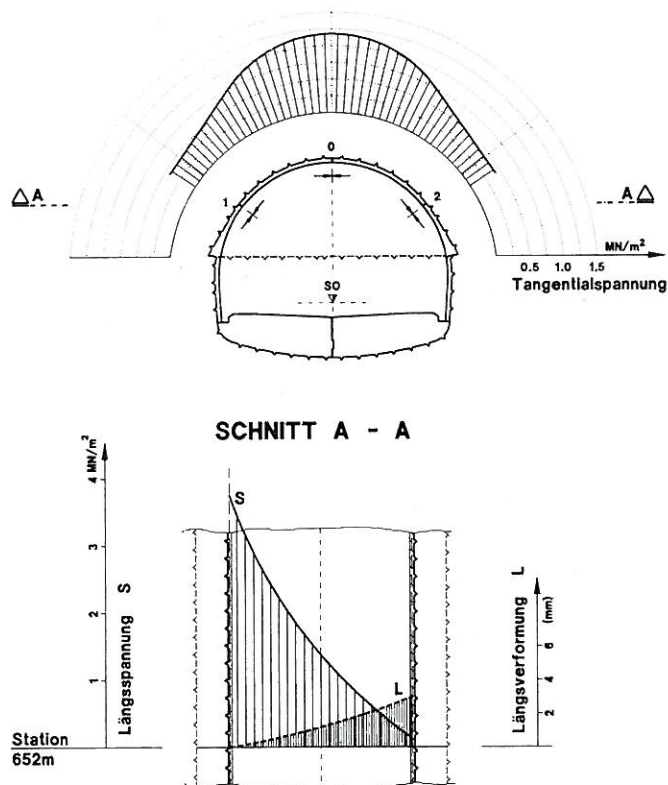


Bild 7 Spritzbetonbeanspruchung in Längs- und Querrichtung, Abschnitt A, Station 652.

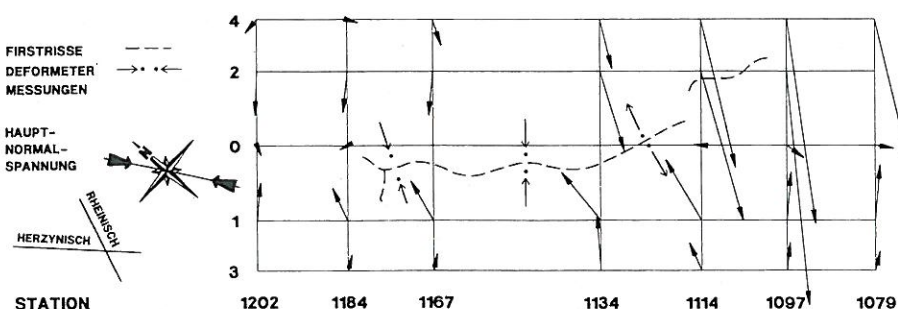


Bild 8 Horizontalverformung und Firstrisse im Abschnitt C2/C3.

Das bedeutet, daß die horizontalen Verformungen über die Verzahnung Gebirge – Spritzbeton deutlich höhere Spannungen verursachten als jene, die aus der Gebirgsauflockerung resultieren.

Rißbildung im Bereich des Gebirgstyps C2

Der Gebirgstyp C2 steht für das Grauzentrum des Harrbacher Scherbruchgrabens. Der betrachtete Abschnitt liegt im Bereich der Unterfahrung des Tunnels Mühlberg in einem nahezu kluftfreien Bereich und unmittelbar innerhalb der südwestlichen Flanke des Harrbacher Scherbruchgrabens. In diesem Bereich wurde in der Kernbohrung KB 28/5 die größte Horizontalspannung mit einer Streichrichtung von ca. 150° ermittelt.

Die Bildung der Längsrisse in der Firste wurde durch den Strossenvortrieb initiiert, sie beschränkte sich auf wenige Zehnermeter. Innerhalb des kluftfreien Bereiches konnten auf einer zusätzlichen Länge von über 200 m gleichfalls synchron mit dem Strossenvortrieb gegensinnige Horizontalverformungen des Hohlraumes festgestellt werden. Vergleichbar dem Bereich des Gebirgstyps A lag eine gute Übereinstimmung mit der durch das Hydraulic-Fracturing-Verfahren festgestellten Richtung der größten Horizontalspannungen vor (Bild 4).

Rißbildung im Bereich des Grenzbereiches Gebirgstyp C2/C3

Der betrachtete Abschnitt betrifft die Nordwest-Flanke des Scherbruchgrabens (C3) mit dem unmittelbar anschließenden ungestörten Internbereich (C2). Beim Aushub des Sohlgewölbes traten im Abschnitt C2 über 80 m Längsrisse in der Firste auf.

Verformungsmessungen an den Firstissen der Außenschale zeigten abschnittsweise ein Öffnen und Schließen der Risse, was als Hinweis auf einen Scherbruch der Außenschale interpretiert wurde. Für einen Scherbruch sprach auch der synchrone Anstieg der Horizontalverformungen. Auch in diesem Fall wurde eine signifikante Zunahme der Verformungsgeschwindigkeiten in Tunnel längsrichtung festgestellt (Bild 8). Es konnte keine Übereinstimmung mit der Richtung der horizontalen Hauptspannungsrichtung festgestellt werden. Die resultierenden horizontalen Verformungen im betrachteten Abschnitt C2/C3 zeigen jedoch mehrheitlich $\pm$ rheinisches Streichen (Bild 8). Die Ursachen dafür werden auf einen veränderten, transpressiven Spannungszustand im Umfeld der Nordwest-Flanke des Grabenbruchsystems zurückgeführt. Diese verläuft in einer Entfernung von 10 m bis 30 m

außerhalb der Tunnelröhre. Im Bereich C3 befindet sich die herzynisch streichende Flanke innerhalb der Tunnelröhre und verursachte hohe asymmetrische Verformungen beim Tunnelvortrieb (Bilder 4 und 9).

Als eine mögliche Interpretation für das „rheinische Streichen“ der resultierenden Horizontalverformung im Abschnitt C2/C3 wird angenommen, daß sich nach der Ausbildung der herzynisch streichenden Scherzone

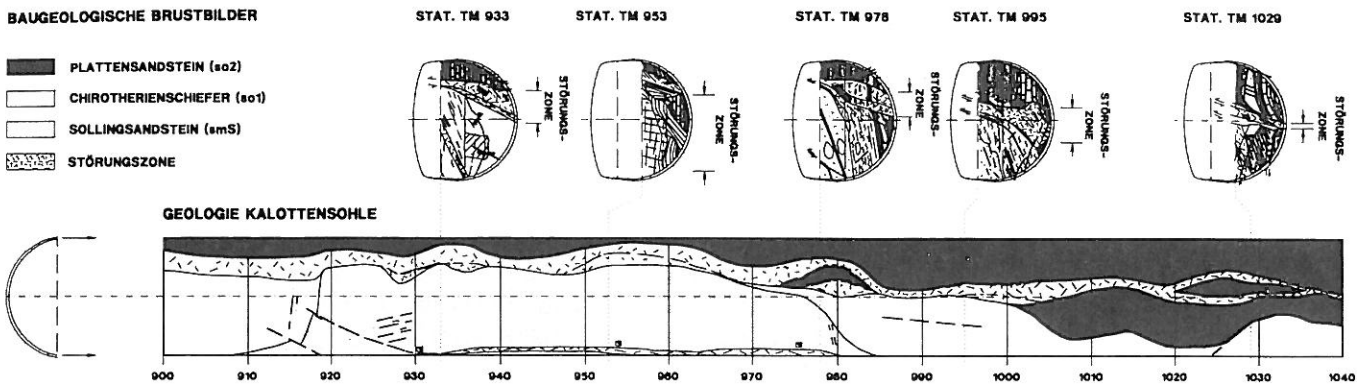


Bild 9 Geologische Situation im Abschnitt C3 – Nordostflanke des Scherbruchgrabens.

erster Ordnung ein sekundärer Spannungszustand mit Transpression in Richtung der unterdrückten rheinischen Scherbrüche zweiter Ordnung eingestellt hat. Diese Interpretation steht in Übereinstimmung mit dem von Naumann und Prinz (5) erarbeiteten Konzept einer „richtungsabhängigen tektonischen Gebirgsauflockerung“ in Gebieten mit saxonischer Bruchtektonik.

Schlußfolgerungen

Die Methode der geodätischen Ermittlung der räumlichen Hohlraumverformungen ermöglicht bei Berücksichtigung des strukturgeologischen Inventars eine Interpretation über Richtung und Größe der Verformungen des Gebirges. Die Resultierende der Restverformungen in der Horizontalebene zeigt in den ungestörten Gebirgsabschnitten

Übereinstimmung mit der Richtung der mittels Hydraulic Fracturing-Verfahren ermittelten maximalen Horizontalspannung. Diese stimmt mit der herzynischen Orientierung der Scherbrüche erster Ordnung und dem geologisch relativ jungen System des Harrbacher Scherbruchgrabens überein. Resultierende Horizontalverformungen in Richtung des rheinischen Streichens treten im Bereich der nordwestlichen Grabenflanke auf und werden auf sekundäre transpressive Spannungszustände zurückgeführt.

Die Bildung von Längsrissen im Firstbereich der Außenschale ist auf die hohen horizontalen Primärspannungen zurückzuführen, welche durch die resultierenden Horizontalverformungen bestätigt werden. In den gering zerlegten Gebirgsabschnitten tritt bei flacher Schichtlagerung ein Gleitlösen des Gebirgsverbandes aufgrund des hohen Seitendruckes ein. In weiterer Folge tritt eine Überlastung der kompetenten Gesteinsbänke mit daraus resultierendem Scherbruch des Spritzbetons in der Firste ein.

Quellennachweis

1. Becker, A.; Paladini, S.: In-situ-Spannungen in Nord- und Mitteleuropa. In: *Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe* 10 (1990), S. 1-63.
2. Müller, B.; u. a.: Regional Patterns of Tectonic Stress in Europe. In: *J. Geophys. Res.* 97 (1992), S. 11.783-11.803.
3. Voßmerbäumler, H.: Strukturgeologische Untersuchungen in Mainfranken: Bestandsaufnahme und Versuch einer Interpretation. In: *Z. dt. geol. Ges.* 136 (1985), S. 69-92.
4. Schwarzmeier, J.: Über den Buntsandstein an unterer Saale und Sinn. In: *Geologica Bavarica* 89 (1986), S. 95-115.
5. Naumann, G.; Prinz, H.: Die Bedeutung richtungsabhängiger tektonischer Gebirgsauflockerung für den Tunnelbau im Buntsandsteingebirge. In: *Felsbau* 7 (1989), S. 190-197.
6. Ahorner, L.: Present-day stress field and seismotectonic block movements along major fault zones in Central Europe. In: *Tectonophysics* 29 (1975), S. 233-249.
7. Illies, H.; Greiner, G.: Regionales stress-Feld und Neotektonik in Mitteleuropa. In: *Oberrhein geol. Abh.* 25 (1976), S. 1-40.
8. Grünthal, G.; Stromeyer, D.: The Recent Crustal Stress Field in Central Europe; Trajectories and Finite Element Modelling. In: *J. Geophys. Res.* 97 (1992), S. 11.805-11.820.
9. Wurm, A.: Über diluviale Tektonik im Maingebiet. In: *Geol. Rundschau* 43 (1955), S. 103-107.
10. Roloff, A.: Geomechanische Erfahrungen beim Bau und Betrieb eines Pumpspeicherwerkes mit gedichtetem Unterbecken in Buntsandstein. In: *Rock Mechanics Suppl.* 7 (1978), S. 41-51.
11. Reik, G.: Primärspannung und Gebirgsdruck. In: *Felsbau* 3 (1985), S. 101-106.
12. Rummel, F.; Baumgärtner, J.: *Spannungsmessungen im östlichen Bereich der Südwestdeutschen Scholle*. Unpublished Report BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) Hannover, S. 1-145.
13. IGI – Niedermeyer 1986: *Projektunterlagen Ingenieurgeologie Tunnel Schönrain*. Unveröffentlicht.
14. Vadar, M.: Zeiteinfluß auf das Bruchverhalten des Gebirges in der Umgebung von Tunneln. In: *Veröffentl. Inst. Bodenmechanik und Felsmechanik Universität Karlsruhe* 72 (1977), S. 1-117.

Suchen

Sie einen kompetenten Partner für

- Niederspannungsschaltanlagen
- Steuerungsbau
- Automatisierung



Dann

sprechen Sie uns an



Auf Wunsch komplette Projektabwicklung von Engineering bis zur Inbetriebnahme.

Sondergehäusebau auch in Edelstahl.

Kompetenz - Qualität - Preiswürdigkeit

FRANKAUER GMBH

Elektrotechnik · Elektronik · Automation · Lichttechnik
Engineering · Herstellung · Instandsetzung · Montagen
Alte Grenzstr. 97 · 45663 Recklinghausen
Tel. (0 23 61) 3 33 72/3 52 55 · Fax (0 23 61) 3 46 71