

Geotechnische Probleme im Zusammenhang mit Störungen

G. RIEDMÜLLER

1. Einleitung

Viele geotechnische Probleme bei großen Bauvorhaben werden durch tektonische Störungen verursacht. Besondere Schwierigkeiten durch Bauzeit- und Kostenüberschreitungen, im schlimmsten Fall durch Schäden an Bauwerken, die zu Katastrophen führen, entstehen dadurch, daß Phänomene von tektonischen Störungen falsch gedeutet und bewertet werden. Dies gilt sowohl für aktive wie auch inaktive Störungen.

Im folgenden werden einige wichtige Aspekte der Genese, der geotechnischen Charakteristik sowie der Erkundung von Störungszonen diskutiert. Anhand von Fallstudien werden schließlich einige geotechnische Probleme in Zusammenhang mit tektonischen Störungen näher erläutert.

2. Charakteristik von Störungen

Tektonische Störungen sind schmale, langgestreckte Zonen, in denen sich die Scherverformung konzentrierte und zu mechanischen und chemischen Veränderungen des Gesteins führte. Demzufolge wird sich das Gebirge in Scherzonen in Hinblick auf Gesteinsausbildung, Gefüge und mechanische Eigenschaften gegenüber dem umgebenden Gebirge unterscheiden.

Auch innerhalb einer Scherzone ist die Verformungsenergie nicht homogen auf die gesamte Scherzone verteilt, sondern lokalisiert sich auf diskrete Flächen oder auf Zonen, die sich plastisch verformen. Je nach Vorherrschenden bruchhafter oder plastischer Verformungen unterscheidet man demnach spröde, duktile und als Übergang semiduktile Störungen. Duktile Scherzonen sind auf tiefe Krustenbereiche mit metamorphen Mineralreaktionen und spröde Scherzonen auf oberflächennahe Krustenbereiche beschränkt.

Bei einem Vortrag an der Universität Bern im Jänner 1994 stellte MANDL aufgrund theoretischer Überlegungen und experimenteller Beobachtungen die interessante These auf, daß eine weiträumige tektonische Scherdeformation des Gebirges zunächst zur Bildung einer sogenannten "damage zone", gewissermaßen als "Proto-fault" führt. Diese "damage zone" ist zunächst durch Mikrorißbildung, Korngefügeauflockerung, Kornzerkleinerung und somit erhöhte Permeabilität gekennzeichnet. Bereits während dieser Entstehungsphase führt die Scherkonzentration zur Bildung diskreter Scherflächen, die in gesetzmäßiger Ausbildung und zeitlicher Abfolge auftreten.

Aufgrund der segmentweisen Entstehung von Störungszonen, die durch Unterschiede in der Lithologie, im Porenwasserdruk und durch Heterogenitäten des Spannungsfeldes hinsichtlich Größe und Richtung der Hauptdruckspannungen verursacht wird, kann die Mächtigkeit einer Störungszone und die Intensität der Zerscherung räumlich stark variieren. Die Maßstabsunabhängigkeit von Störungszonen führt dazu, daß sich die gleichen Störungsstrukturen und Mächtigkeitsschwankungen in verschiedensten Größenordnungen, vom Dezimeter - bis in den Kilometerbereich finden (Mandl, 1988; Archambault et al. 1990).

Es läßt sich feststellen, daß Mineralumwandlungen und -neubildungen in wesentlicher Weise die Eigenschaften von Störungsgesteinen bestimmen (Riedmüller & Schwaighofer, 1970, Riedmüller 1978, Wu 1978, Klima et al. 1988 etc.). Systematische Tonmineralanalysen in Scherzonen silikatischer Gesteine ließen genetische Zusammenhänge zwischen Tonmineralumwandlungen bzw. -neubildungen und Scherdeformationen finden. Es zeigte sich, daß Smektite bevorzugt entlang Scherbahnen auftreten, die ein Endstadium der Scherdeformation kennzeichnen, während Kaolinite in zerstütteten, stärker permeablen Störungsbereichen vorkommen, die als Anfangsstadien der Scherzenenentwicklung gedeutet werden. Durch die Bildung von Mixed Layer Mineralen werden Übergangsstadien angezeigt (Abb.1, 2).

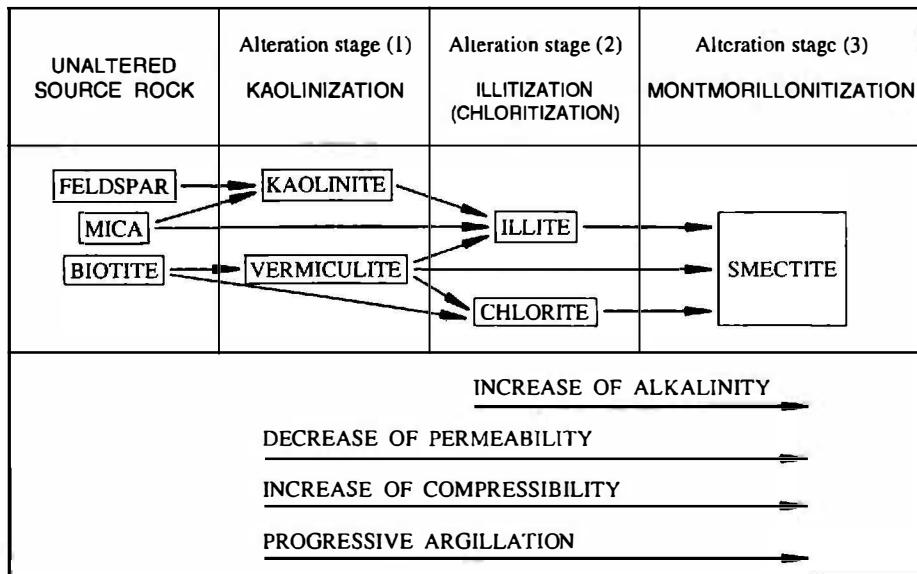
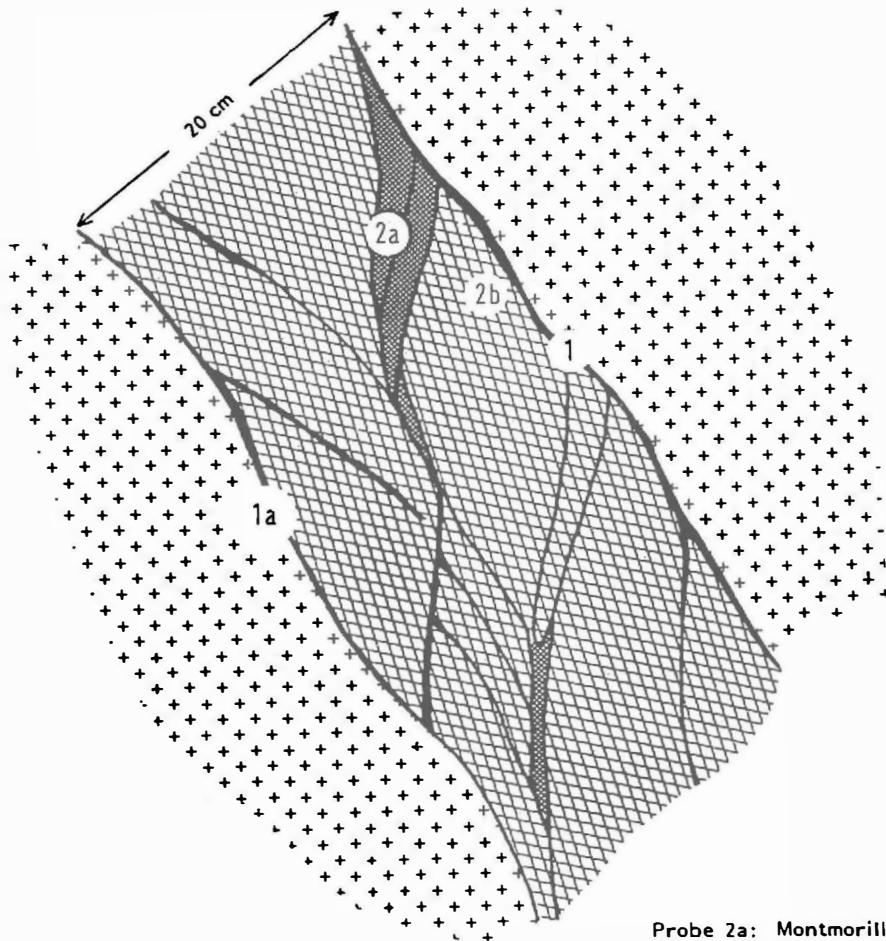


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Tonmineral-Umwandlung in Scherzonen
(RIEDMÜLLER 1978)



Probe 1: Montmorillonit 92%
Illit 8%

Probe 2a: Montmorillonit 77%
Mixed Layer 3%
Kaolinit 17%
Illit 3%

Probe 1a: Montmorillonit 87%
Illit 13%

Probe 2b: Montmorillonit 40%
Kaolinit 50%
Illit 10%

Abbildung 2: KW Malta - Gößstollen, Stat. 4615 m
Detail aus Scherzone im Zentralgneis

Die tektonischen Deformationen führten in Verbindung mit gleichzeitig ablaufenden, niedrig temperierten Lösungsumsätzen zu einer deutlichen festigkeitsmindernden Umgestaltung des Gesteins, sodaß derartige Störungszonen ernste geotechnische Probleme bei Bauvorhaben verursachen.

Obwohl die tektonische Beanspruchung in Verbindung mit Lösungsumsätzen zu einer lockergesteinsähnlichen Umwandlung der Festgesteine in Störungszonen führte, ist der Vergleich mit den mechanischen Eigenschaften eines durch sedimentäre Vorgänge oder Verwitterungsprozesse entstandenen Lockergesteins nur mit Einschränkungen möglich. Im Gegensatz zu sedimentären Lockergesteinen und Verwitterungsprodukten bewirkte die extreme Scherdeformation eine spezifische Gefügeprägung, die vom Mikrobereich bis in den Großbereich des Aufschlusses reicht, sodaß bei tektonischen Lockergesteinen nurmehr Restscherfestigkeiten gegeben sind und im allgemeinen hohe Anisotropien vorherrschen.

Messungen der Porenverteilung ermöglichen eine quantitative Charakterisierung des Mikrogefüges toniger Mylonite und eine Unterscheidung von sedimentären Lockergesteinen. So zeigen tonige Mylonite, die eine vergleichbare Kornverteilung haben wie sedimentäre Lockergesteinen, deutlich niedrigere Gesamtporositäten und kleinere Maxima der Poredurchmesser. Das Maximum der Poredurchmesser von tonigen Myloniten liegt zwischen jenen von Locker- und Festgesteinen (Abb. 3).

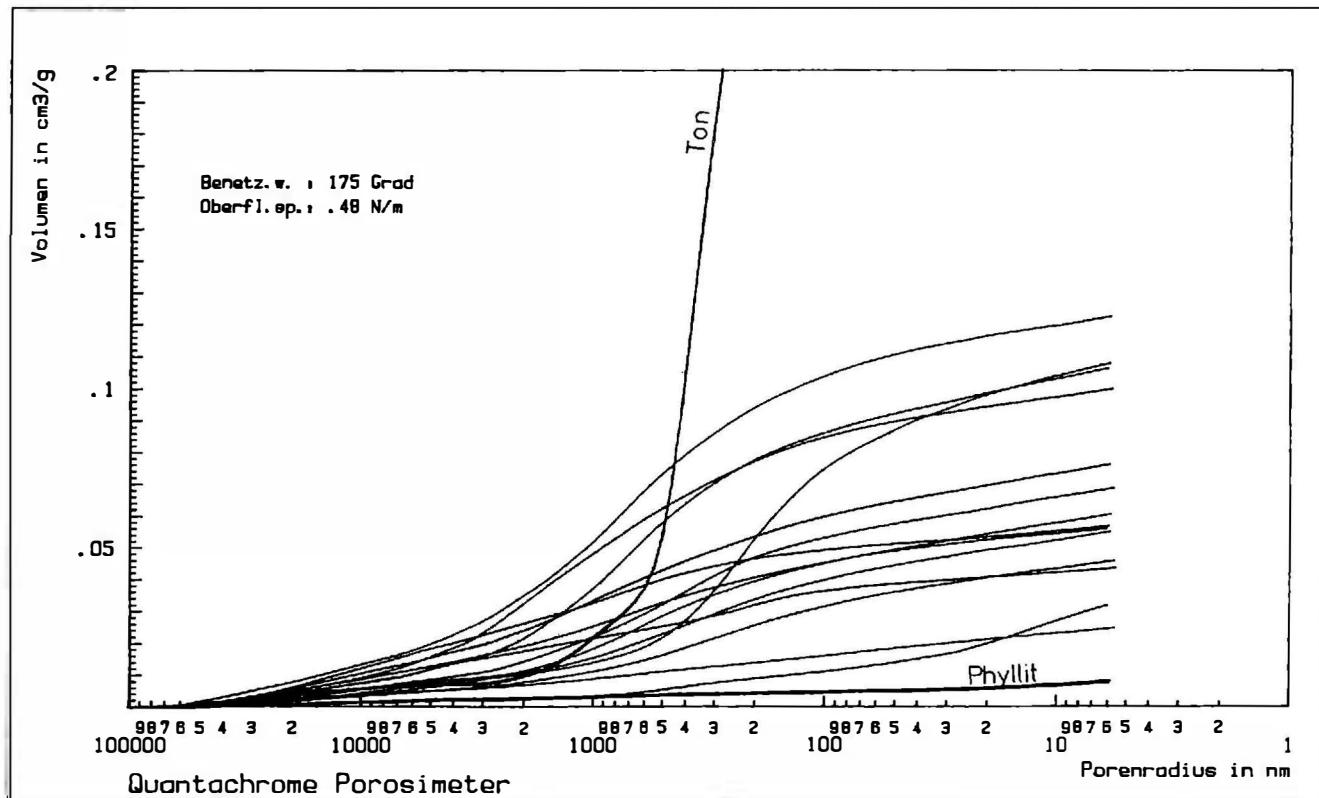


Abbildung 3: Porenverteilungen in tonigen Myloniten (Phyllite des Tunnels Niklasdorf)

Neben Festigkeiten variieren in Störungszonen auch die Grundwassereigenschaften erheblich. Es finden sich unterschiedliche Grundwasserspiegellagen, Strömungsrichtungen und gespanntes Wasser mit wasserstauenden Barrieren. Diese spezifische Grundwassersituation in Störungszonen führt vielfach zu Stabilitätsproblemen beim Bau und erfordert wirksame Drainage- und Stützmaßnahmen.

Zusammenfassend lassen sich für eine geotechnische Charakteristik und Bewertung von Störungszonen folgende Merkmale anführen:

- Störungszonen sind extrem heterogen: Störungsbrekzien bzw. Scherkörper mit höherer Festigkeit werden von tonigen Gesteinen anastomosierend umflossen. Die Primärspannungskomponenten können in bezug auf Größe und Orientierung auf engstem Raum variieren.

Die geotechnischen Eigenschaften werden weitgehend durch das Auftreten toniger Kataklasite bestimmt, die besondere Schwächezonen darstellen.

- Für die Beurteilung der Scherfestigkeit von Störungszonen sollte man Restscherfestigkeiten annehmen.
- Wichtige mineralogische Kennwerte, die mit Scherparametern korrelieren, sind die Korngrößenverteilung < 40 µm und < 2 µm

sowie der Gehalt an Smektit und quellfähigen Mixed Layer Mineralen.

Neben der tonigen Matrix werden die mechanischen Eigenschaften in Störungszonen sehr wesentlich durch die Orientierung und Dichte von Scherflächen mitbestimmt.

Innerhalb von Störungszonen findet sich ein rascher Wechsel von stark und gering wasserdurchlässigen Bereichen. Somit hat eine Störungszone meist gleichzeitig die Funktion eines Grundwasserspeichers und Grundwasserstauers.

3. Erkundung von Störungen

Aufgrund der ungünstigen mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen ist ihre sorgfältige Erkundung die Voraussetzung für eine ökonomische und technisch sichere Bauausführung.

In den meisten Fällen werden Störungszonen von mächtigen Lockergesteinsüberlagerungen bedeckt, sodaß ihre Erfassung im Gelände durch indirekte Merkmale sowie mittels künstlicher Aufschlüsse erfolgen muß.

Wichtige Merkmale von Störungszonen liefern morphologische Phänomene, wie z.B. langgestreckte Muldenformen in Verbindung mit Vernässungen, Rutschungen und Kriechbewegungen. Hinweise für das Auftreten von

Störungen sind weiters auffällige, linear orientierte Steilformen und Sattelbildungen.

Zusätzliche Anhaltspunkte für das Vorhandensein von Störungen sind häufig entsprechend orientierte Harnischflächen, die in Aufschlüssen in unmittelbarer Nachbarschaft der vermuteten Störung auftreten.

Zur näheren Erkundung von Störungen, zur Abgrenzung und Feststellung von Aufbau und Felszustand sind Tiefenerkundungen unerlässlich.

Tiefenerkundungen bestehen üblicherweise aus Schurfschlitten bzw. Schächten; Kernbohrungen und geophysikalischen Untersuchungen.

Die Erkundung von Störungszonen mittels Kernbohrungen erfordert große Erfahrung des Geologen, besonderes Können des Bohrmeisters und exzellente Qualität der Bohrwerkzeuge. Bohrtechnik und Bohrkronen bzw. Kernrohre müssen auf die spezifischen Verhältnisse der jeweiligen Störungszone abgestimmt werden.

Wichtige Voraussetzung für eine aussagekräftige Bohrkernerkundung sind ein Kerngewinn von mehr als 90 % sowie das Verneiden des Ausspülens von Feinteilen und Zerstören von Schertexturen.

Geophysikalische Erkundungen, die in enger Zusammenarbeit mit dem Geologen erfolgen sollen, sind eine wertvolle Ergänzung der Bohrerkundung. So ermöglichen geoelektrische Messungen die Erfassung mächtigerer toniger Kataklasite. Insbesonders bei steil stehenden Kontaktten ergeben sich klare Abgrenzungen.

Die Refraktionsseismik stellt die übliche Routinemethode zur Erfassung von Störungen dar. Aus den Verhältnissen von Longitudinal- und Transversalwellen, bzw. aus den dynamischen elastischen Kenngrößen (E-Modul, Scher-Modul, Kompressions-Modul) lassen sich Störungen nicht nur von ihrer Umgebung abgrenzen, sondern ermöglichen auch eine Differenzierung unterschiedlicher Störungssegmente. So lassen sich z.B. Störungsbereiche mit Dominanz toniger Kataklasten von solchen mit einem Vorherrschen zerrütteter, kleinstückig zerlegter Gebirgsarten unterscheiden.

In neuerer Zeit wurde bei einigen Projekten erfolgreich der Versuch unternommen, mittels Reflexionsseismik Störungsstrukturen abzubilden. Ein Problem bildet die Tiefeneichung zur genauen koordinativen Lokalisierung der erfaßten Strukturmödelle (Brückl & Stötzner, 1995; Gärtner et al., 1995; Watzlaw et al., 1995).

Die Problematik der Ermittlung mechanischer Kennwerte in Störungszonen besteht in der großen Streuung der Daten. Neben Laboranalysen, kommen in erster Linie Triax - und Direktscherversuche in Betracht, gehören Bohrlochaufweitungsversuche zur routinemäßigen Kennwertermittlung. Eine wichtige Ergänzung der mechanischen Laborversuche sind Tonmineralanalysen. Aus Tonmineralverteilungen ergeben sich wichtige Hinweise auf mechanische Eigenschaften und mögliche Langzeitveränderungen der Störungsgesteine.

4. Fallstudien

4.1 Adana - Gaziantep Trans European Motorway, Turkey

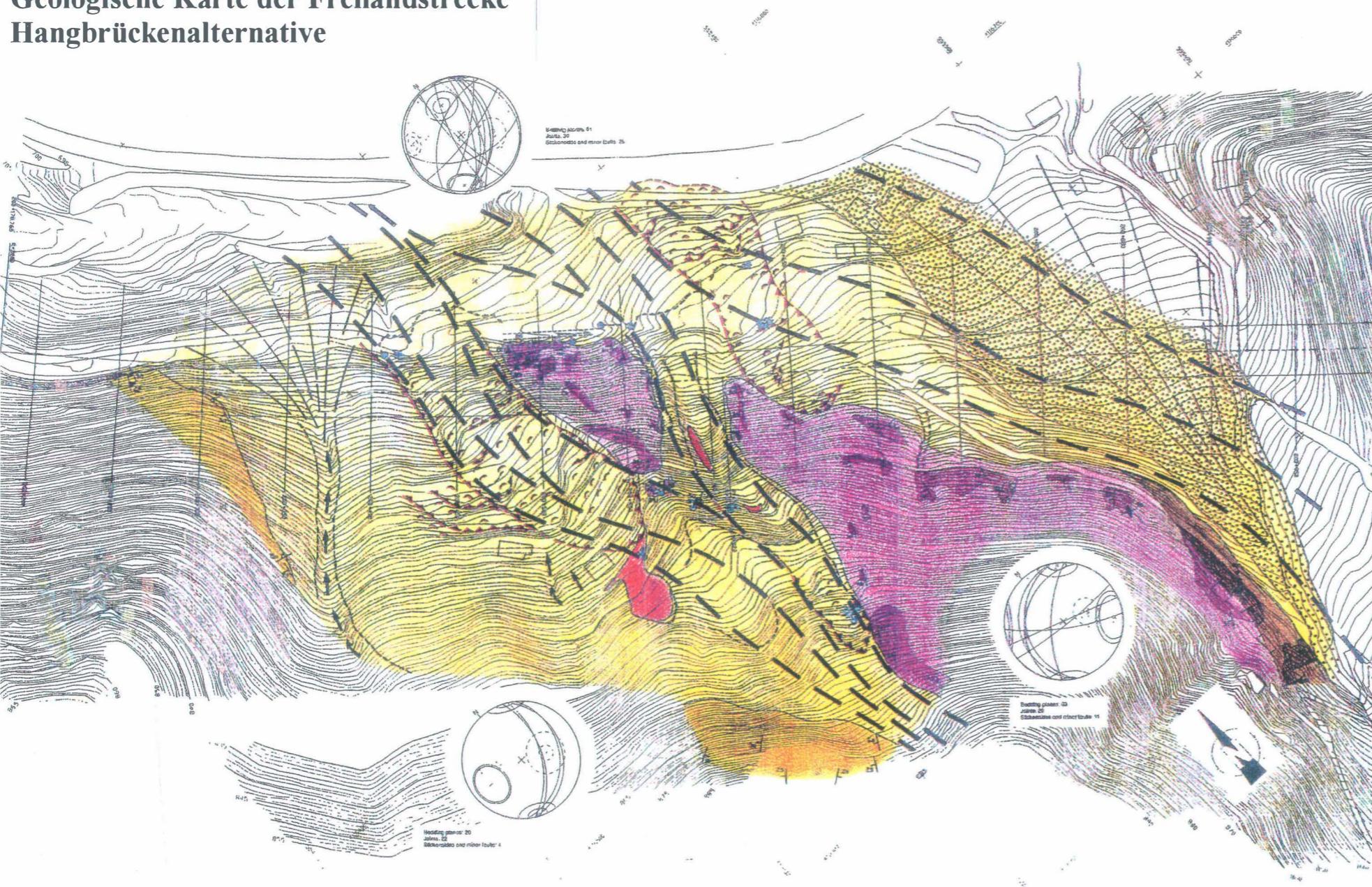
Der schwierigste Abschnitt der Autobahn zwischen Adana und Gaziantep ist die Querung des Amanos Gebirges in Südostanatolien. Dieses NE-SW streichende Gebirge wird von der ostanatolischen Störung im Westen und dem Hatay-Karasu Grabensystem im Osten begrenzt.

Aufgrund von Variantenuntersuchungen, bei denen aktive Hangbewegungen eines der Hauptentscheidungskriterien waren, wurde eine Trasse, bestehend aus 4 Tunneln, zahlreichen Talübergängen und teilweise hohen Einschnitten ausgesucht. Diese Trasse quert eine paläozoische Sedimentfolge, die im wesentlichen aus Sandsteinen, Grauwacken und Siltsteinen aufgebaut ist.

Bei den geologischen Erkundungen wurde bis zur Ausschreibungsprojektierung die Lage und der Einfluß von Störungen nicht richtig erkannt. Gelände- und Bohrbefunde wurden fehlinterpretiert. Rutschungen und Hangkriechvorgänge würden als oberflächennahe Massenbewegungen in der Lockergesteinsüberlagerung gedeutet und bei Einschnitten z.B. ein Abtrag der instabilen Überlagerung empfohlen. Zusammenfassend wurde im Ausschreibungsprojekt gefolgert, daß keine größeren geologischen Risken zu erwarten sind.

Nach Auftragsvergabe mußte im Rahmen einer Beratungstätigkeit für die Baufirma in kurzer Zeit ein realistisches geologisches Modell der Trasse

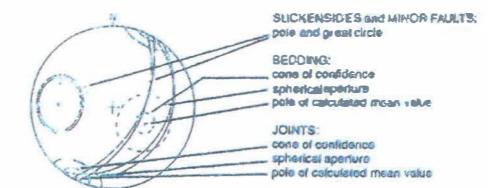
Autobahn Adana-Gaziantep
Geologische Karte der Freilandstrecke
Hangbrückenalternative



LEGEND:

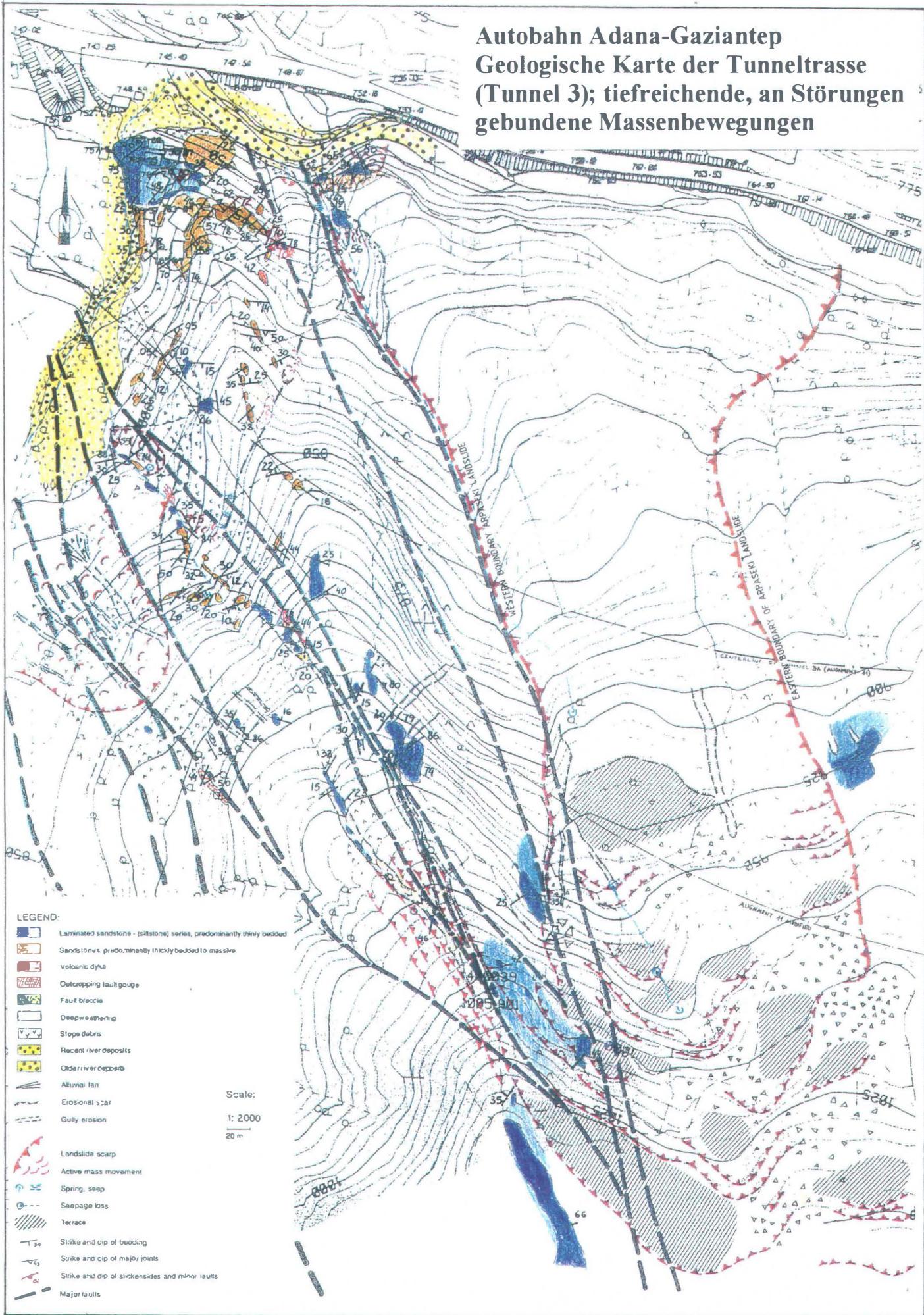
- Quartz sandstone - greywacke - (conglomerate) - series
- Laminated sandstone - (siltstone) series, predominantly thinly bedded
- Sandstones, predominantly thickly bedded to massive
- Volcanic dyke
- Outcropping fault gouge
- Slope debris
- Recent river deposits
- Older river deposits
- Alluvial fan
- Erosional scar
- Gully erosion
- Recent debris flow (episodically)
- Landslide scar
- Active mass movement
- Spring, seep
- Seepage loss
- Trench of pipeline
- Strike and dip of bedding
- Strike and dip of major joints
- Strike and dip of slickensides and minor faults
- Major faults

STRUCTURAL DIAGRAMS:



100 m

Autobahn Adana-Gaziantep
Geologische Karte der Tunneltrasse
(Tunnel 3); tiefreichende, an Störungen
gebundene Massenbewegungen



erstellt werden¹. Durch Detailkartierungen kritischer Bereiche, einige Kernbohrungen, die in schlecht aufgeschlossenen Bereichen zur Absicherungen des geologischen Modells und zur Kennwertgewinnung abgeteuft wurden, sowie aufgrund zusätzlicher Schürfe und geophysikalischer Erkundungen gelang es uns, Störungen zu identifizieren und zu charakterisieren.

Es konnte festgestellt werden, daß mehrere Störungszonen, die z.T an tiefreichende Massenbewegungen gebunden waren, die Trasse querten. Die bautechnische Konsequenz bestand in einer rasch durchgeföhrten Umplanung einzelner Trassenabschnitte. An Stelle von Einschnitten wurde eine Hangbrückenalternative vorgeschlagen. Auf diese Weise war es möglich, instabile Hangbereiche zu überbrücken, wobei die Gründung der Brückenpfeiler in den Störungszonen weitgehend in größeren kompakten Scherkörpern erfolgen konnte. Nach den neuen geologischen Vorstellungen gelangten zwei Tunnel in tiefreichende, an Störungen gebundene, vermutlich aktive Kriechbewegungen. Keineswegs unterteufsten sie seichtgründige Lockergesteinsrutschungen, wie dies in den ursprünglichen Projektsstudien ausgesagt wurde. Trotz bestehender Zwangspunkte konnte die Trasse in den kritischen Tunnelabschnitten noch so weit bergwärts verschoben werden, daß eine Beeinträchtigung des Tunnelbauwerkes durch Massenbewegungen nicht zu erwarten war.

¹ Die zusätzlichen geologischen Erkundungen wurden gemeinsam mit den Geologen der Geoconsult Salzburg (Dr.J.Kleberger) und der Abteilung der Ingenieurgeophysik der Zentralanstalt f. Meteorologie und Geodynamik, Wien (Dr.S.Seren) durchgeführt.

4.2 Bolu Tunnel

Der Bau des Bolu Tunnels stellt die gewaltigste Herausforderung beim Bau der Autobahn zwischen Istanbul und Ankara dar. Mit einer Gesamtlänge von 3261 m durchtönt der zweiröhrlige Tunnel die Wasserscheide des Bolu Gebirges, das durch die Nordanatolische Störung geprägt wurde. Bei den Erkundungsarbeiten konnte der komplexe Aufbau des nordanatolischen Störungssystems im Bereich der Tunneltrasse im wesentlichen erfaßt werden. Es wurde festgestellt, daß der N-S orientierte Tunnel in einem günstigen Winkel die durch Blattverschiebungen getrennten lithologischen und tektonischen Einheiten, präkristallines Grundgebirge, paläozoische Metasedimente und mesozoische bis tertiäre Sedimente durchtönt wird.

Ein besonderes Problem war die im Detail erforderliche geotechnische Charakteristik des Gebirges. Zur Feststellung der Verformungseigenschaften als Grundlage der Gebirgsklassifizierung mußte in den Störungsgesteinen die Verteilung von weicher, toniger Matrix und steifen Blöcken erfaßt werden. Das volumetrische Verhältnis von Blöcken und Matrix wurde aus der Auswertung von Kernbohrungen abgeschätzt. Aus Laborversuchen wurden für die tonige Matrix niedrige Restscherfestigkeiten und Quelleigenschaften festgestellt. Der Smektitgehalt in der Fraktion $< 2\mu\text{m}$ erreichte in einigen Proben 90 %!

Als Grundlage für Berechnungen wurde ein vereinfachtes geomechanisches Modell entwickelt. Es bestand aus einer Wechselfolge vertikaler, verschieden mächtiger, steifer und weicher Lamellen. Auf Grundlage der Berechnungen und geotechnischen Überlegungen wurden schließlich

Stützmaßnahmen vorgesehen, die das Ausmaß der maximalen radialen Verformungen auf etwa 25 cm beschränken sollten.

Beim Vortrieb des Tunnels wurden maximale Konvergenzen in der Größenordnung von etwa 100 cm angetroffen. Die geologische Ursache dieser hohen Verformung wurde in dem unerwarteten Auftreten flacher Aufschiebungen sowie steiler, die Tunnelachse im ungünstigen spitzen Winkel querender Abschiebungen gesehen.

Nach einem Baustop erfolgte eine rasche Umplanung, die in einer Verkleinerung der Kalotte und Verstärkung der Stützmaßnahmen bestand.

5. Schlußfolgerungen

Bauvorhaben in Störungen gehören zu den schwierigsten Aufgaben des Baugeologen. Voraussetzungen für eine erfolgreiche Bewältigung sind detaillierte strukturelle Untersuchungen und gezielte, störungsspezifische Kennwertenmittlungen.

Bei der Datenerhebung ist zu beachten, daß in Störungszonen naturgemäß Singularitäten von besonderer Bedeutung sind und statistische Ermittlungen nur mit Vorsicht angewendet werden sollten.

Aufgrund von Maßstabsunabhängigkeiten können strukturelle Muster vom Kleinbereich auf größere Bereiche extrapoliert werden, sodaß auf diese

Weise eine realistische Modellierung von Störungszonen, die der Beobachtung nicht zugänglich sind, mit Einschränkungen möglich wird.

Literatur

- Archambault, G., Daigneault, R., Rouleau, A. & O.Tavchandjian (1990): Mechanics of shear zones and fault belts development by anastomosing patterns of fractures at all scales.- Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Rossmanith (ed.), 197-204, Balkema.
- Brückl, E. & U. Stötzner (1995): Geophysik und die geologisch-geotechnische Vorerkundung von Felsbauten. - *Felsbau* 13/5, 256-261.
- Gaertner, H., Bauer, M. & R. Seitz (1995): Reflexionsseismische Erkundung des Nahbereiches für Verkehrsbauten.- *Felsbau* 13/5, 266-271.
- Mandl, G. (1988): Mechanics of tectonic faulting: Models and basic concepts. - Developments in Structural Geology, 407 p., Elsevier.
- Riedmüller, G. & Schwaighofer, B. (1970): Mineralumwandlungen und Neubildungen in Myloniten der Oschenikseestörung (Kärnten, Österreich): *Mitt. Ges. Geol. Berghaustud.* 19, 315-328.

Riedmüller, G. & Schwaighofer, B. (1977): Zur Tonmineralverteilung nachbruchgefährdeter Gesteinsbereiche im Untertagebau: *Verh. Geol.B.A.* Wien 1977/3, 387-392.

Riedmüller, G. (1978): Neoformation and transformation of clay minerals in tectonic shear zones : *Tschermaks Min.Petr.Mitt.* 25, 219 - 242.

Klima, K., Riedmüller, G. & Stattegger, K. (1988): Statistical analysis of clay mineral assemblages in fault gouges: *Clays and Clay Minerals*, Vol. 36, No. 3, 277 - 283.

Watzlaw, W., Schulz, G., Fischer, R. & V. Trogisch (1995): Einsatz der Geophysik bei der Erkundung von Tunneltrassen.- *Felsbau* 13/5, 291-295.

Wu, F.T. (1978): Mineralogy and physical nature of clay gouge: *Pure Appl.Geophys.* 116, 655 - 689.

Autor: Univ.Prof.Dr. Gunther Riedmüller
Institut für Technische Geologie
TU Graz
8010 Graz, Rechbauerstr. 12