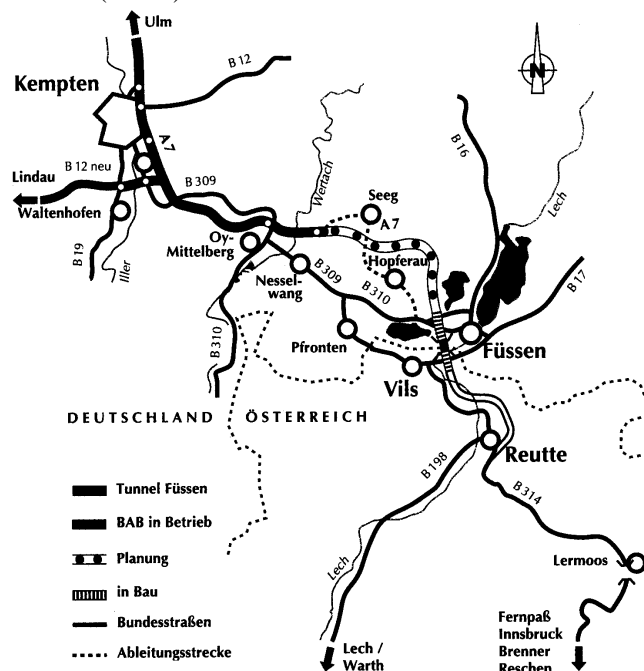


# Ungewöhnliche geologische Verhältnisse und deren Bewältigung beim Vortrieb des Grenztunnels Füssen

von Kuroschi Thuro, Gerhard Brugger, Friedrich Winkler

Die Bundesautobahn A7 ist eine der wichtigsten deutschen Fernstraßenverbindungen und mit derzeit 946 km die längste Autobahn Deutschlands. Im bayerischen Abschnitt Würzburg-Ulm-Kempten-Füssen ist sie bereits bis zum provisorischen Anschluß bei Nesselwang fertiggestellt. Bis zur Bundesgrenze fehlen nur noch 16,2 km. Der verbleibende Abschnitt Nesselwang-Füssen-Reutte bildet den Schlußstein zur Anbindung an das österreichische Fernstraßennetz (Bild 1).



**Bild 1** Lage des Grenztunnels Füssen im Fernstraßennetz.

**Fig. 1** Location of the Füssen Tunnel in the system of the federal transit routes.

Im äußersten Süden verbindet der 1.271 m lange grenzüberschreitende Tunnel Füssen die A7 mit der österreichischen Fernpaßroute B314. Nach Beilegung eines nahezu 2 Jahrzehnte dauernden Rechtsstreites um die letztendlich verordnete Trassenführung konnten die Bauarbeiten für den Grenztunnel Füssen im Herbst 1995 in Angriff genommen werden.

Mit der Durchführung beauftragte die Autobahndirektion Südbayern im Oktober 1995 eine aus den österreichischen Firmen Östu-Stettin (für den Tunnelbau) und Gebr. Haider (für den Erdbau) bestehende Arbeitsgemeinschaft. Die Bauzeit wurde bei Auftragserteilung mit 24 Monaten veranschlagt.

Dipl.-Geol. Dr. Kuroschi Thuro, Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie der Technischen Universität München, Dipl.-Ing. Gerhard Brugger, ARGE Grenztunnel Füssen ÖSTU-Stettin-Haider, Dipl.-Ing. Friedrich Winkler, Keller Grundbau Ges.m.b.H. Innsbruck. Die geologischen Ausführungen stützen sich zu einem großen Teil auf die Baugeologische Dokumentation von Herrn Dipl.-Geol. Werner Baumgärtner.

Der Grenztunnel Füssen wird als eine im Gegenverkehr befahrene Tunnelröhre hergestellt und liegt zu 73% (925 m) auf deutschem und zu 27% (346 m) auf österreichischem Staatsgebiet. Der Vortrieb erfolgte durchwegs steigend von Norden nach Süden.

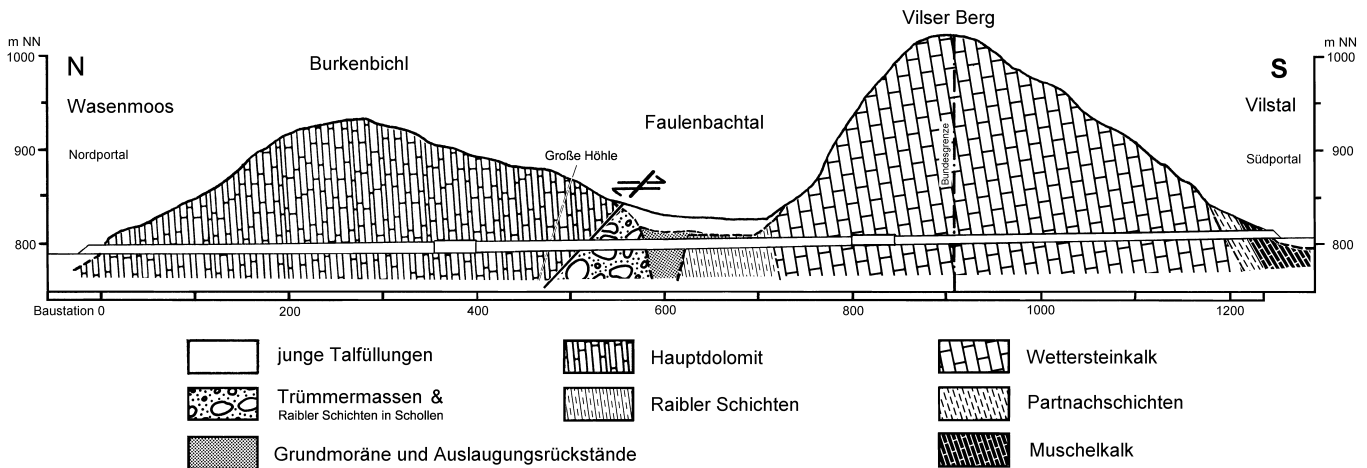
## Baugeologischer Überblick

Das Projektgebiet befindet sich im sogenannten Falkensteinzug, einem Ost-West verlaufenden Gebirgszug der Nördlichen Kalkalpen. Der Tunnel liegt über die ersten 500 m im z.T. wasserführenden Hauptdolomit des Burkenbichls (Bild 2) mit einer maximalen Überlagerung von 160 m. Im Faulenbachtal wurden auf einer Länge von ca. 200 m die sog. Raibler Schichten bei einer minimalen Überlagerung

## Coping with exceptional geological conditions during excavation of the Füssen tunnel at the German-Austrian border

*The 1271 m long border-passing Füssen tunnel is the missing link of the German Freeway A7 and the Austrian Fernpaß route B 314. In March 1996, during running excavation works, an unexpected ground water inburst of 400 l/sec occurred. Carrying out voluminous grouting measures immediately, the water inflow could be stopped. To give an explanation for this unexpected water inflow, the model of a collapse dolina has been worked out. The dolina must have developed due to heavy leaching of the originally gypsum bearing strata of the Raibl formation during the glaciation period, covering an area of app. 100 x 80 m at the surface. The buried dolina is surrounded by collapse breccias, which give a reference for the extremely steep walls of the sink hole at that time. As a consequence and in order to avoid further lowering of the ground water level in the Faulenbach valley, the tunnel had to be excavated within a protection shield of ahead-of-the-face-groutings at an overall length of 240 m. This method is unique in the history of NATM.*

Der 1271 m lange Grenztunnel Füssen ist ein wesentliches Bindeglied zwischen der bundesdeutschen BAB 7 und der österreichischen Fernpaßroute B 314. Im März 1996 ereignete sich ein unerwarteter Wassereintritt mit einer Anfangsschüttung von etwa 400 l/sec. Durch sofort eingeleitete, umfangreiche vorausseilende Injektionsmaßnahmen konnte der Wasserzufluß gestoppt werden. Der wesentliche Grund ist eine bis dato nicht erkannte Einbruchstruktur im Bereich des Faulenbachtals, die durch tiefgreifende Auslaugung der ursprünglich gipsführenden Raibler Schichten entstanden war. Um eine nochmalige Grundwasserabsenkung zu vermeiden, mußte der Tunnel über 240 m im Schutz vorausseilender Feststoff-Injektionen aufgeföhren werden. Die beschriebene Bauweise kann als einzigartig in der Geschichte der NÖT bezeichnet werden.



**Bild 2** Geologischer Längsschnitt durch den Grenzunnel Füssen.  
**Fig. 2** Geological section along the border-passing Füssen tunnel.

von 20 m durchörtert. In diesen Raibler Schichten, einer Wechselfolge von Kalken, Dolomiten, Sandsteinen, Ton-schluffsteinen und - im nördlichen Abschnitt - ehemals Gips und Anhydrit war eine ca. 40 m breite Rinne aus quartären Ablagerungen prognostiziert. Auf den weiteren 520 Metern der bergmännischen Strecke war der Tunnel weitgehend im klüftigen, teils verkarsteten Wettersteinkalk (untergeordnet Dolomit) des Vilser Berges bei einer maximalen Überlage-rung von 210 m aufzufahren. Im Wettersteinkalk mußte mit Kluft- und Karstwasserzutritten gerechnet werden.

Aufgrund des vermuteten Zusammenhanges des Grund-wasserstromes im Faulenbachtal mit der Schüttung der ca. 1,5 km östlich der Tunneltrasse liegenden Heilquelle „Nothburga“ im Kurort Bad Faulenbach wurden in der Planfeststellung und im Bauvertrag außergewöhnlich res-triktive Auflagen in Bezug auf die Wasserableitung aus dem Tunnelvortrieb vorgegeben:

- ⇒ Der Grundwasserspiegel im Faulenbachtal war im na-türlichen Schwankungsbereich aufrecht zu erhalten und durfte auch während der Bauausführung nicht nachteilig beeinflußt werden. Die dauerhaft abgeführte Bergwas-sermenge aus dem Tunnel durfte 1,5 l/s nicht überstei-gen.
- ⇒ Größere, in den Tunnel eintretende Bergwassermengen waren durch dem Vortrieb nacheilende Injektionsmaß-nahmen zu unterbinden.
- ⇒ Zur vorauseilenden Abdichtung der „Quartärrinne“ im Faulenbachtal war die Ausführung eines ca. 45 m langen Injektionsrohrschirmes vorgesehen.
- ⇒ Im Faulenbachtal war der Tunnel auf einer Strecke von 276 m druckdicht auszuführen.

Bereits im Erkundungsstadium waren zur hydrogeologi-schen Beweissicherung in den Jahren 1990 bis 1993 von den insgesamt 60 Erkundungsbohrungen 16 Bohrlöcher zu automatisch registrierenden Grundwasserpegeln ausgebaut sowie vier Oberflächenwassermeßwehre im Faulenbachtal errichtet worden. Diese Pegel wurden auch während der Baudurchführung überwacht und regelmäßig ausgewertet.

### Bauablauf bis zum Wassereinbruch

Bereits nach wenigen Vortriebsmetern stellte sich heraus, daß die gegebenen Auflagen in bezug auf die abgeführte Grenzwassermenge nicht einzuhalten waren. Flächig-diffus zusitzende Bergwasserzutritte aus der Tunnellaibung im

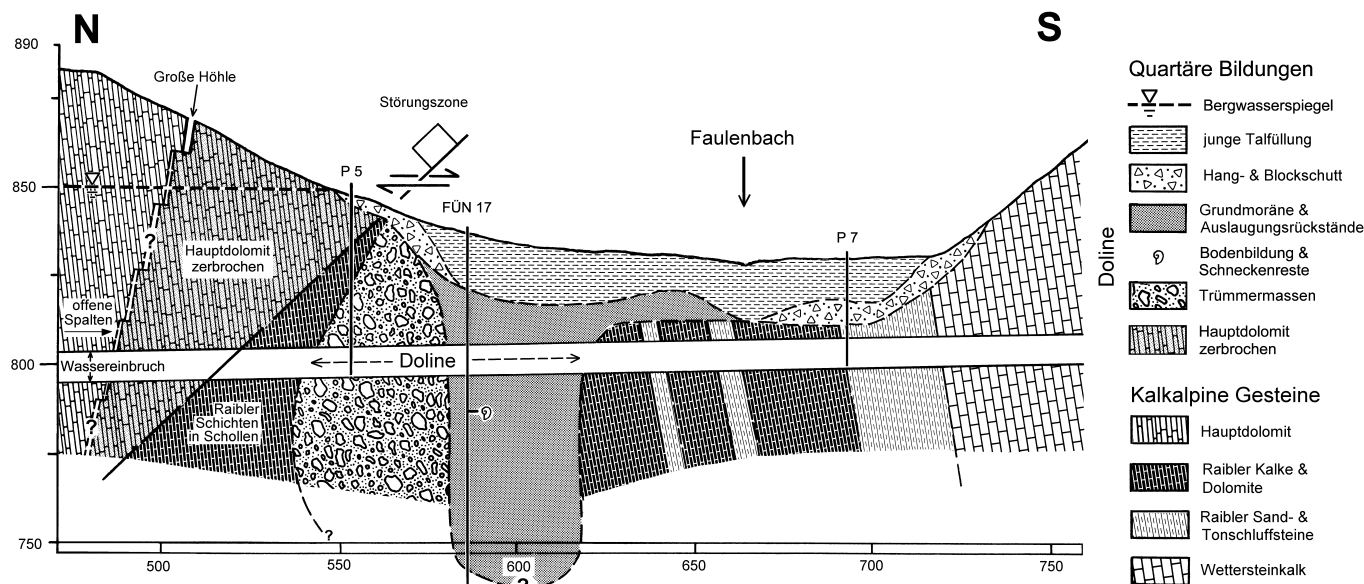
Hauptdolomit konnten durch nachträglich durchgeführte Injektionen bestenfalls verringert, in keinem Fall jedoch vollkommen unterbunden werden. Bis zum Erreichen der Vortriebsstation 480 betrug die Gesamtwassermenge am Tunnelportal bereits mehr als 10 l/s. Diese Erfahrung wie-derholte sich - auch mengenmäßig - später bei der Durchörterung des Wettersteinkalkes.

Der Vortrieb selbst war bis dahin problemlos verlaufen: Im Sprengvortrieb konnten mittlere Tagesleistungen von 10 m erreicht werden. Die Sicherung bestand aus 15 cm Spritzbeton mit Baustahlgitter und einer örtlichen Swellex-Ankerung.

Am 6. März 1996 erreichte der Vortrieb im Hauptdolo-mit die Station 480. Der Beginn der „Raibler Schichten“ war laut geologischem Längsschnitt erst bei Station 530 zu erwarten. Im Zuge vortriebsbegleitender Erkundungsboh-rungen wurde hier druckhaftes Bergwasser mit einer Schüttung von ca. 20 l/s erschotet. Nachdem die zahlrei-chen zur Beweissicherung installierten Pegel im Faulen-bachtal bereits auf dieses Ereignis empfindlich reagierten, wurde der Vortrieb eingestellt und eine horizontale Kern-bohrung zur weiteren Vorerkundung angeordnet.

Drei Tage später, am 9. März 1996 ereignete sich im Zuge der Kernbohrarbeiten ein plötzlicher Wassereinbruch, dessen Anfangsschüttung auf 400 l/s geschätzt wurde. Ein dramatisches Absinken praktisch aller Pegel im Faulen-bachtal war die Folge, so daß insbesondere für den Bestand der Heilquelle „Nothburga“ höchste Alarmstufe gegeben war. Der Wasserdruck wurde durch Entlastungsbohrungen entspannt so daß sich an der Ortsbrust eine anhaltende Dau-erschüttung von ca. 70 l/s einstellte, die nach einigen Tagen mit ersten Injektions- und Abdichtungsmaßnahmen unter-bunden werden konnte. Die Pegelstände stabilisierten sich daraufhin zusehends. Dennoch war zu diesem Zeitpunkt an einen weiteren Vortrieb ohne systematische Vorausinjkti-on, deren Umfang damals auch nicht annähernd vorherseh-bar war, nicht zu denken.

Das Ausmaß des Wassereinbruches, seine Lage im Hauptdolomit, die Aufschlüsse aus den Kernbohrungen sowie das unerwartet rasche und weiträumige Anspringen der Meßpegel gaben Anlaß, das ursprüngliche geologische Gesamtbild, welches dem ausgeschriebenen Vortriebskon-zept zugrunde lag, neu zu überdenken und entsprechend den tatsächlichen Gegebenheiten ein modifiziertes Vortriebs-



**Bild 3** Geologisches Detailprofil durch das Faulenbachtal.

**Fig. 3** Geological section through the Faulenbach valley - detail.

konzept für die Durchörterung des Faulenbachtals zu erarbeiten.

### Überarbeitetes geologisches Modell

Das Faulenbachtal wird durch mehrere Seen gesäumt (Alat See, Ober und Mitter See, Gipsweiher), deren Ursprung mit einer tiefgreifenden Auslaugung der Anhydrit- bzw. Gipsführenden Raibler Schichten in Zusammenhang steht. Einige der wohl ursprünglich vorhandenen Seen sind bereits verlandet und nur noch als anmoorige Stellen sichtbar.

Aus diesem Grund wurde bei den Voruntersuchungen ein besonderes Gewicht auf die Erkundung der sog. Quartärrinne gelegt. Allein im Bereich des Faulenbachtals wurden über 30 Bohrungen, zum Teil als Schrägbohrungen, abgeteuft. Aus diesen Bohrungen ergab sich das Bild einer mit bindigen, schwach wasserdurchlässigen sowie mit sandig-kiesigen Lockergesteinen aufgefüllten Rinnenstruktur. Deshalb wurde die Durchörterung dieser Strecke als eines der Hauptprobleme des Vortriebs angesehen. Man ging weiters davon aus, daß der Hauptdolomit nur gering wasserführend und praktisch frei von offenen Spalten sein würde. Nach dem Wassereinbruch bei Station 480 mußte dieses Modell gründlich revidiert werden.

Der weitere immer wieder durch die Injektionsarbeiten unterbrochene Vortrieb ermöglichte eine tiefergehende Untersuchung der Ursachen des Wassereinbruchs. Es wurden zwei Horizontalbohrungen von bis zu 70 m Länge vom Tunnel aus in Vortriebsrichtung ausgeführt sowie eine knapp 100 m tiefe Vertikalbohrung im vermuteten Zentrum der „Quartärrinne“ abgeteuft. Zusammen mit den Erkenntnissen aus dem weiteren Vortrieb ergab dies ein neues Bild der geologischen Verhältnisse im Bereich der Tunneltrasse.

### Quartäre Füllung der Doline

Bei der sogenannten Quartärrinne handelt es sich in Wirklichkeit um eine alte, durch Gipsauslaugung im Untergrund erzeugte Einbruchstruktur - hier kurz Doline genannt - welche im Verlaufe der Eiszeit mit Moränenmaterial aufgefüllt worden ist. Über Tage läßt sich die Doline relativ gut eingrenzen: Sie endet wenige 10er Meter westlich der Tunnel-

trasse noch vor einer „Klammstrecke“ des Faulenbaches, wo sich der Bach tief in Raibler Kalke und Sandsteine eingeschnitten hat. Nach Osten ist die Struktur nicht eindeutig abgrenzbar. Insgesamt fügt sich die Doline zwischen Alatssee im Westen und Ober See im Osten in eine ganze Reihe von kleinen Seen bzw. Feuchtgebieten ein, die perlschnurartig durch diesen Teil des Falkensteinzuges entlang der Gipsvorkommen der Raibler Schichten ziehen. Diese Doline liegt an einer Stelle, wo eine große etwa NNW-SSO-verlaufende Störung den Hauptdolomit, die Raibler Schichten und den Wettersteinkalk quert. Ausläufer dieser Störung wurden beim Vortrieb im Bereich der Raibler Schichten noch angetroffen.

Im Zentrum der Doline (Bild 3) befindet sich halbfestes bis festes Lockergestein, das vielfach gekritzte Geschiebe, also gletschertransportierte Komponenten enthält. Dieses Lockermaterial besteht zum Teil aus den umliegenden Gesteinen (Raibler Kalke und Dolomite) und aus Auslaugungsrückständen (Rauhwacke, Ton & Schluff), im oberflächennahen Bereich aber auch aus ortsfremdem Material (Fernmoräne) in Form einer hoch vorbelasteten Grundmoräne. Der Durchmesser der Doline betrug in Tunnelniveau etwa 40 m, ihre Tiefe muß mit mindestens 100 m angegeben werden.

Ein in 50 m Tiefe angetroffenes organisches Material konnte als Bodenbildung mit Landschnecken angesprochen werden. Nach einer  $^{14}\text{C}$ -Datierung ist diese Bodenbildung älter als 40.000 Jahre, was der Grenze der  $^{14}\text{C}$ -Altersbestimmungsmethode entspricht. Dem Erhaltungszustand der Schnecken und des Bodens nach zu urteilen wäre ein Alter von mind. 100.000 Jahren denkbar. Dieser ehemalige Mutterboden ist mit einiger Sicherheit in der Würm-Riß-Warmzeit, d.h. im Interglazial abgelagert worden. Der Boden dürfte sich während seiner Bildung jedoch auf dem Niveau des heutigen Faulenbachtals befunden haben. Damit hätte sich die Doline durch Gipslösung im Untergrund in einem angenommenen Zeitraum von ca. 100.000 Jahren durchschnittlich um überschlägig 0,5 mm pro Jahr eingetieft. Obwohl der Einbruch der Doline in der Anfangsphase relativ schnell oder sogar schlagartig erfolgt sein muß, sind

auch heute Setzungsbewegungen nicht völlig auszuschließen.

Auch aus den mit spiegelnden Harnischen besetzten Kluftflächen, die in dem Moränenmaterial sowohl beim Vortrieb als auch in den Bohrungen angetroffen wurden, läßt sich ablesen, daß tatsächlich noch Setzungsbewegungen in jüngster Zeit stattgefunden haben müssen. Im tieferen Untergrund besteht die Dolinenfüllung aus älterem Moränenmaterial z.T. mit eingeschalteten Konglomeraten mit zersetzten, mürben Dolomitmörnern und aus hochkonsolidierten Auslaugungsrückständen. Diese Ablagerungen sind damit mindestens in die Rißeiszeit einzuordnen und können sogar noch früheren Eiszeiten entstammen.

Charakteristisch ist beispielsweise im Bohrlochtiefsten, daß das Material aus ca 70% Schluff und Ton, und aus nur 30% Grobkorn besteht. Die Komponenten von Kieskorngröße sind charakteristische Rauhwacken. Bei diesem Material, bei dem Fremdkörner fehlen, handelt es sich nur um komprimierte Auslaugungsrückstände ohne Moränenanteil.

Insgesamt lassen die vorliegenden Ergebnisse auf eine sehr alte, möglicherweise mehrere hunderttausend Jahre aktive Doline mit Auslaugung im Untergrund schließen und auf eine mehrfache Verdichtung des Materials durch auflagernde Eismassen bzw. Gletscher. Dabei wurde durch den Gletschertransport das Material - also teilweise Grundmoräne und teilweise Auslaugungsrückstände - bei jedem der möglicherweise zahlreichen Gletschervorstöße sozusagen im „Stopfverfahren“ in die Doline gepreßt und verdichtet. Diese Füllung liegt als wenig wasserundurchlässiger „Korken“ im Faulenbachtal. Die Reaktionen der Pegel legen nahe, daß diese Dolinenfüllung als eigener Grundwasserkörper fungiert und nur wenig Kontakt zum umliegenden, wesentlich stärker durchlässigen Gebirge besitzt.

Beim Vortrieb stellte sich heraus, daß der Bereich dieser Dolinenfüllung weitgehend konsolidiert und trocken war. Insbesondere waren keine aufwendigen Sondermaßnahmen wie z.B. ein Injektions-Rohrschirm zur Durchörterung notwendig.

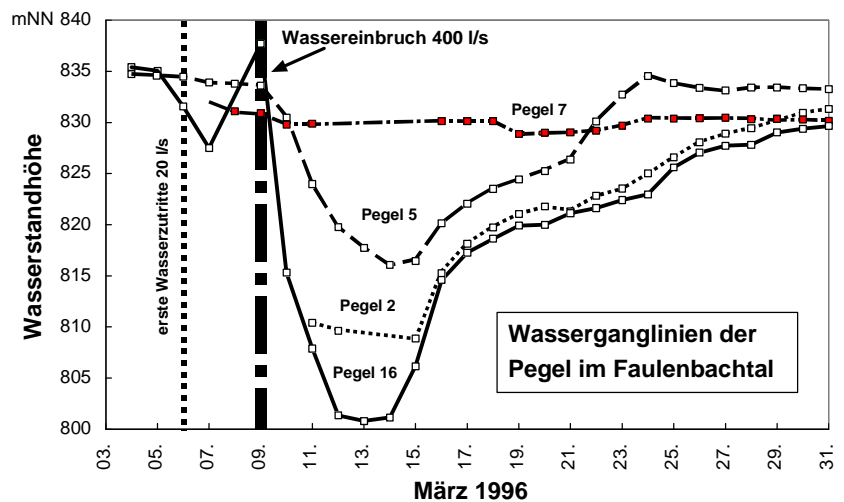
### Trümmersmassen des Dolinen-Randbereichs

Der bereits aufgelockerte und nicht mehr im ursprünglich kompakten Verband befindliche Hauptdolomit grenzt im Tunnel an einer steilstehenden Störung gegen die Gesteine der Raibler Schichten. Die Raibler Kalke und Dolomite lagen nicht als kompakter Fels, sondern in großen, stark zerbrochenen Schollen vor. Im Verlauf des Vortriebs (im Detailprofil Bild 3 von Nord nach Süd) wurden immer kleinere Schollen bzw. Blöcke angetroffen. Dieses korngestützte Haufwerk aus Blöcken wies dabei eine weiche bis steife, bindige Matrix auf. Im weiteren Verlauf des Vortriebs wurden die Blöcke kleiner, die Matrix sandiger und stärker konsolidiert mit einem fließenden Übergang zum Material der Dolinenfüllung. Auffällig war die ständig wechselnde Wasserwegigkeit, die systematische Injektionsmaßnahmen erforderlich machte.

Diese ungewöhnlich starke Zerbrechung des Gebirges läßt sich nur mit den Vorgängen beim Einsturz einer groß angelegten Doline in einem Gipskarst erklären. Die Komponenten bestehen zwar aus Raibler Gesteinen (Kalke, Rauhwacken und veraschte, d.h. mürbe Dolomite), die Entstehung dieser Massen selbst jedoch ist wesentlich jünger, und zwar quartären Alters - also geologisch gesehen sehr jung. Dieses Gebirge läßt sich am besten mit dem Begriff „Trümmersmassen“ umschreiben und gehört zur weiteren Umgebung der Doline.

Die z.T. sehr wenig konsolidierte Matrix der Trümmersmassen bzw. die wesentlich weniger dichte Lagerung läßt sich vermutlich dadurch erklären, daß das Gerüst der blockgestützten Trümmersmassen eine weitere Konsolidierung verhindert hat. Auch könnte die Matrix teilweise durch fließendes Wasser in die Blockzwischenräume gespült worden sein.

Diese Trümmersmassen treten - allerdings in wesentlich geringerer Erstreckung - auch am Südrand der Dolinenfüllung am Übergang zu den Raibler Schichten auf.



**Bild 4** Ganglinien der Pegel im Faulenbachtal während des Wassereintritts. Selbst der auf der anderen Talseite liegende Pegel 7 zeigt eine deutliche Reaktion.  
**Fig. 4** Water levels in the drill-holes at the Faulenbach valley. Even the level indicator No. 7 shows a distinct reaction - lying on the other side of the valley floor.

### Ursachen des Wassereintritts

Der Wassereintritt bei Stat. 480 scheint mit einer Struktur in Zusammenhang zu stehen, die auch über Tage sichtbar ist: Oberhalb der Tunneltrasse ziehen sich mehrere hangparallele Spalten hin, die sich über viele 10er Meter durch den Hang verfolgen lassen. An einer Stelle ist eine der Spalten sogar als kleine Höhle begehbar. Diese Spalten lassen sich nicht als normale Hangbewegungserscheinungen erklären. Vielmehr scheint es so zu sein, daß der Felssporn aus Hauptdolomit durch eine kombinierte Kipp- und Sackungsbewegung auf dem insgesamt plastisch reagierenden Material der Trümmersmassen bzw. der Dolinenfüllung zu liegen kam. Dies würde auch den insgesamt geringen Bewegungsbetrag von 1 bis max. 2 Metern an der Geländeoberfläche erklären und natürlich vor allem die offenen, wassererfüllten Spalten, die bei Stat. 480 angefahren wurden.

Augenfällig bei dem Wassereintritt bei Stat. 480 war das Reagieren der Pegel: Während die Pegel, die in der

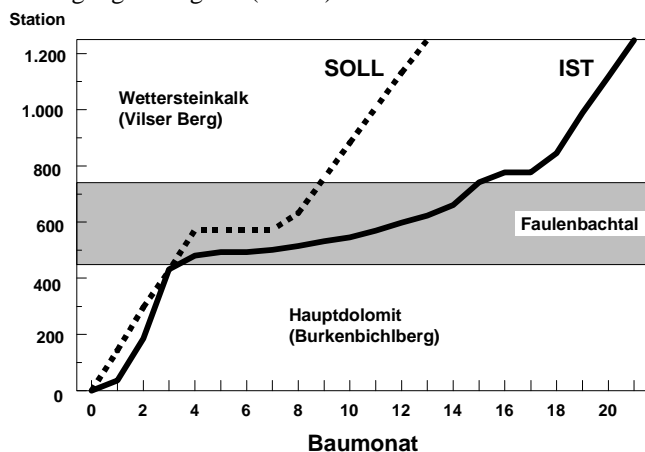
Dolinenfüllung stehen, nicht bis wenig reagierten, sprang ein Pegel (Nr. 7), der in Blockschuttmaterial im Süden an der Grenze zum Wettersteinkalk auf der anderen Talseite steht, deutlich und mit geringer Verzögerung von ca. ¼ Stunde an. Dies spricht für eine Umläufigkeit um den bereits beschriebenen dichten Stopfen der Dolinenfüllung, die durch die Trümmersmassen im Randbereich der Doline verursacht werden dürfte. Eine Umläufigkeit durch den tieferen Untergrund ist äußerst unwahrscheinlich. Ob die großen Wassermassen, die zu dem Wassereinbruch bei Stat. 480 m geführt haben, ursprünglich aus dem Hauptdolomit oder sogar aus dem Wettersteinkalk stammen, kann hier nicht weiter geklärt werden. Denkbar wäre sowohl eine Speisung aus dem Lechgebiet durch den wasserdurchlässigen Bereich der überwiegend NNW - SSO - verlaufenden Störungen als auch eine Speisung aus dem oberstrom gelegenen Alat See.

### Raibler Schichten im Anschluß an die quartäre Dolinenfüllung

Das Gebirge im südlichen Anschluß an die Dolinenfüllung lag als stark geklüfteter bis gestörter Fels vor (Kalke, Dolomite und Sandsteine bzw. Tonschluffsteine der Raibler Schichten). Mit großer Wahrscheinlichkeit steht der Zerkleinerungsgrad des Gebirges noch mit der bereits erwähnten NNW - SSO verlaufenden und eng mit der Dolinenstruktur verknüpften Störung in Zusammenhang. Auch dieser Bereich machte immer wieder Injektionsmaßnahmen erforderlich.

### Gestörter Bauablauf im Faulenbachtal

Die bis dahin unerkannten geologischen Gegebenheiten wurden zum größten Teil erst im Zuge der weiteren Vortriebsarbeiten und zusätzlich in Auftrag gegebener geologischer Untersuchungen erkannt. Ab Station 480 war der weitere Vortrieb nur noch unter wesentlich erschwerten Bedingungen möglich (Bild 5).



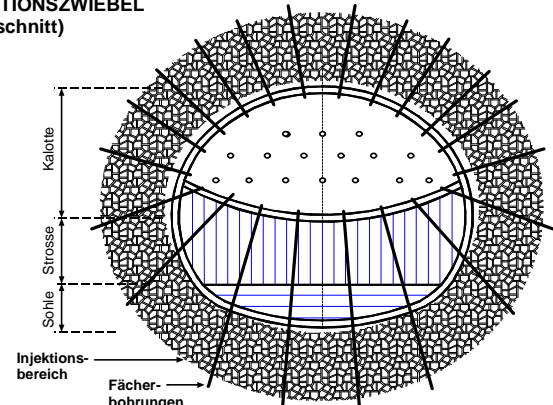
**Bild 5** Soll-Ist-Vergleich im Bauzeitenplan. Deutlich ist die Verlangsamung durch die Injektionsarbeiten im Bereich des Faulenbachtals ersichtlich.

**Fig. 5** Calculated time in comparison with actual construction time. In the Faulenbach valley very clearly construction had been forced to slow down by the injection works.

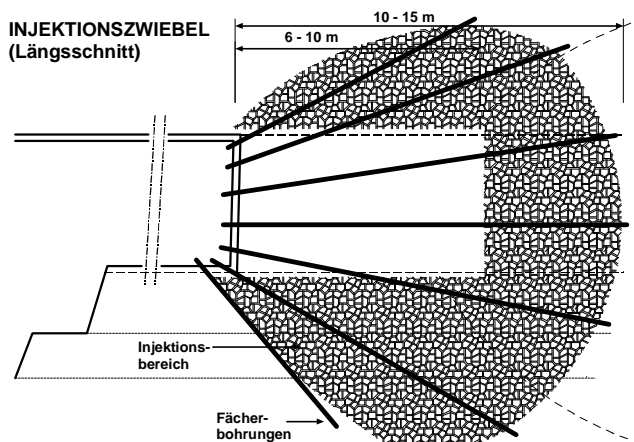
Oberstes Ziel der weiteren Ausbrucharbeiten im gesamten Faulenbachtal war es, nochmalige weiträumige Grundwasserabsenkungen durch vortriebsbegleitende Voraus-Injektionen zu vermeiden. Mit der Ausführung der Injektionsarbeiten wurde die Firma Keller Grundbau beauftragt.

Um einen möglichst raschen Injektionserfolg zu erzielen, erwog man vor Beginn der Arbeiten den Einsatz von PU-Schäumen. Die den zuständigen Wasserrechtsbehörden zur Genehmigung eingereichten Materialien wurden jedoch aufgrund einer nicht auszuschließenden Gefährdung des Grundwassers durch primäre aromatische Amine grundsätzlich abgelehnt. Genehmigt wurde jedoch die Verwendung von Zement-Bentonitsuspensionen unter Beigabe von Natronwasserglas bis max. 15% des Zementgewichtes.

### INJEKTIONSZWIEBEL (Querschnitt)



### INJEKTIONSZWIEBEL (Längsschnitt)



**Bild 6** „Injektionszwiebel“: Schema eines Injektionsschirms im Quer- und Längsschnitt.

**Fig. 6** Pattern of the ahead-of-the-face-groutings in cross and longitudinal section.

Die dafür erforderliche Injektionseinrichtung wurde direkt im Tunnel in der Pannenbucht bei Station 420 installiert und bestand aus einem Injektionscontainer mit hydrostatischen Pumpen, automatischen Registriergeräten (Druck-Mengen-Schreibern), einem „Automatischen Hochfrequenzmischer (AKM)“ sowie Rührwerken und Silos für die Zementlagerung.

Die Injektion selbst erfolgte abschnittsweise mit Packern über Fächerbohrungen. Raster, Länge und Richtung der Bohrungen wurden so gewählt, daß der gesamte Ausbruchquerschnitt vom Kalottenvortrieb aus bis unter die endgültige Aushubsohle auf einer Vortriebslänge von ca. 10-15 m bestrichen wurde. Der so entstehende amorphe Injektionskörper wurde aufgrund seiner Form im weiteren Sprachgebrauch „Injektionszwiebel“ oder einfach „Zwiebel“ genannt (Bild 6). Injektion und Vortrieb erfolgten auf einer Strecke von 220 Vortriebsmetern wechselweise im „Stop&Go“-Betrieb. Insgesamt 26 „Zwiebeln“ mit Wirktiefen von 10 - 15 m ermöglichten jeweils 6 - 10 m Vortrieb. Die injekti-



onsbedingten Vortriebspausen konnten von der Vortriebsmannschaft zur Auffahrung und Fertigstellung des 436 m langen Fluchtstollens sinnvoll genutzt werden.

Vor jedem Injektionsvorgang wurde die Ortsbrust vollflächig mit Baustahlgitter und Spritzbeton gesichert. Der Bohrraster für die Injektionen wurde laufend an die vor Ort angetroffenen Verhältnisse angepaßt. Für die Herstellung der ersten „Zwiebeln“ waren ca. 100 Bohrungen in Tiefenstufen bis zu 15 m erforderlich. Zur Verhinderung von Umläufigkeiten sowohl des druckhaften Bergwassers als auch des unter Druck eingebrachten Injektionsgutes und damit verbundener Überbeanspruchung der Ortsbrustsicherung wurden speziell entworfene Packer mit Haftstrecken bis zu 2 m Länge versetzt.

Die eingebrachten Suspensionen mit einem W/Z-Faktor von 0,6 bis 1,2 wurden bei Pumpraten von 5 bis 15 l/s und Arbeitsdrücken von bis zu 20 bar laufend an die örtlichen Verhältnisse angepaßt. Der Injektionserfolg wurde durch Erkundungsbohrungen sichergestellt. Sofern diese Bohrungen noch Wasser führten, wurden sie zusätzlich injiziert und somit in das Injektionsschema integriert.

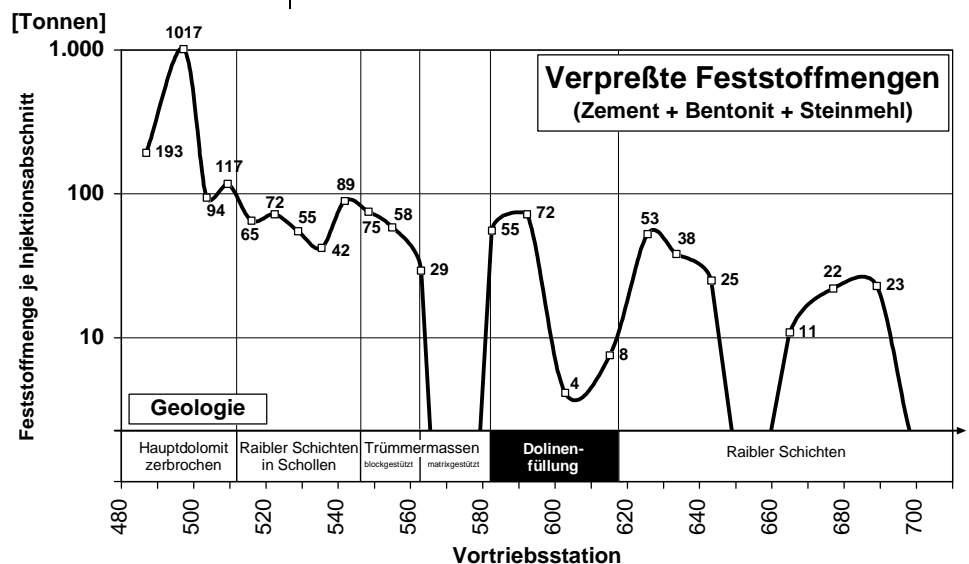
Die Feststoffaufnahmen waren in den ersten Zwiebeln am Übergang des Hauptdolomits zu den Raibler Schichten am größten. Als wenig aufnahmefähig haben sich - trotz Wasserführung - die „Raibler Trümmersmassen“ und das Moränenmaterial der quartären Dolinenfüllung erwiesen. Da aber gerade hier das Gebirge hochgradig wasserempfindlich war, mußte trotz der geringen Aufnahmen der Zutritt von fließendem Wasser durch Injektionen unterbunden werden. Die Injektion hatte somit neben der abdichtenden eine gebirgsverbessernde Wirkung zu erfüllen.

Nachdem in den Raibler Schichten eine Ankerung über den gedachten Injektionsbereich von 4 m um den Hohlraum nicht möglich war, wurde im Kalottenvortrieb ein weitgehend ankerloser, steifer Ausbau mit Tunnelbögen, 30 cm Spritzbeton mit 2 Lagen Baustahlgitter und temporärem Kalottensohlgewölbe gewählt. Vor allem im Bereich der „Trümmersmassen“ wurden aufgrund des unmittelbaren Nebeneinanders von mehreren m<sup>3</sup> großen, festen Dolomitbruchstücken, die zumeist in wassergesättigter, lehmiger Matrix eingelagert waren, äußerst ungünstige Ausbruchverhältnisse angetroffen. Hier war es auch auf Teilstrecken erforderlich, die Ortsbrust der Kalotte in zwei Ausbruchabschnitte zu unterteilen, jeden Abschlag durch vollflächigen Brustverzug und IBO-Brustanker temporär zu sichern und mit IBO-Spießen massiv vorzupfänden. In dieser kritischen Phase wurde intensiv über die Ausführung eines Richtstollens und die Auffahrung eines Gegenvortriebs diskutiert, jedoch sind diese Varianten aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen nicht zur Ausführung gekommen.

Wider Erwarten hat sich das hochverdichtete Moränenmaterial der Doline sowohl in bezug auf die Wasserführung als auch auf das Ausbruchverhalten (gute Standfestigkeit bei Baggervortrieb) als problemlos erwiesen und konnte innerhalb weniger Tage mit geringstem Injektionsaufwand durchörtet werden.

In den Raibler Wechselfolgen zwischen Doline und Wettersteinkalk konnte bald auf das temporäre Kalottensohlgewölbe verzichtet werden. Aufgrund der Wasserzutritte bis zu 12 l/s mußte jedoch auch hier durchwegs vorausseilend injiziert werden. Erst nachdem der Kalottenvortrieb das Faulenbachtal überwunden und den Wettersteinkalk erreicht hatte, wurden Strosse und Sohle mit Sohlschlußdistanzen von maximal 4 m nachträglich aufgefahren. Im Zuge des Strossen- und Sohlenvortriebs konnte der Erfolg der von der Kalotte aus durchgeführten Injektionsmaßnahmen unter Beweis gestellt werden: es waren keine zusätzlichen Injektionsmaßnahmen erforderlich.

Beim Vortrieb im Wettersteinkalk wurden auf einer ca. 90 m langen Tunnelstrecke von Station 940 bis 1030 aber-



**Bild 7** Verpreßte Feststoffmengen in Abhängigkeit der Stationierung bzw. des Gebirges.  
**Fig. 7** Injected quantity of solids in relation to chainage and rock mass.

mals 9 Injektionsabschnitte mit Wirktiefen von 15 m und Vortriebs-Rückweiten von jeweils 10 m ausgeführt. Ansonsten konnte im letzten Vortriebsabschnitt auf vorausseilende Injektionen verzichtet werden.

### Schlußbetrachtung

Die Durchörterung des Faulenbachtals hat über ein Jahr in Anspruch genommen. 70% der Arbeitszeit wurde für Injektionen aufgewandt. Im Jahresschnitt betrug der Baufortschritt lediglich 92 cm je Arbeitstag. Erst im Wettersteinkalk stellten sich wieder „normale“ Vortriebsleistungen ein.

Doch was war - abschließend betrachtet - der wesentliche Grund für diese Verzögerungen. Die eigentliche Füllung der Doline, für die ursprünglich Sondermaßnahmen vorgesehen waren, verhielt sich beim Vortrieb überraschenderweise fast unproblematisch. Vor allem aber die stark aufgelockerten und damit wasserwegigen Felsmassen, die offensichtlich einen - im Vorfeld nicht erkannten - verstürzten Karsthohlraum umgeben, führten zu den geschilderten Problemen beim Vortrieb. Das Ausmaß des Was-

sereinbruches hat alle Beteiligten überrascht und ist auch heute trotz der umfangreichen geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen noch immer nicht befriedigend zu erklären.

Erfahrungen mit Gipskarst liegen bislang überwiegend aus Gebieten mit flachliegenden Schichten und ohne Vergletscherung vor wie dem Großraum Stuttgart. In vorliegendem Fall sind die Verhältnisse ganz offensichtlich ein Resultat aus steilstehender Schichtung, Gipsauslaugung und Vergletscherung. Ob das vorgestellte geologische Gebirgsmodell auf andere Einbruchstrukturen im Alpenbereich übertragbar ist, ist allerdings offen. Dabei sind die Vorgänge sowohl bei der Auslaugung gipsführender und damit ehemals anhydritführender Schichten - als auch die damit gekoppelten Prozesse an der Basis des Gletschers im Detail noch ungeklärt.

Am 17. September 1997 erfolgte der feierliche Durchschlag des Grenztunnels Füssen mit einer Verzögerung von ca. 9 Monaten gegenüber dem ursprünglichen Bauzeitplan. Die Innenausbauarbeiten sollten spätestens im Sommer 1998 abgeschlossen sein.

Trotz der erheblichen Mehrkosten, die die Injektionen und die geänderte Vortriebsweise für den Bauherren mit sich gebracht hat, halten die durchwegs einvernehmlich beschlossenen Maßnahmen einem kritischen Rückblick stand. Erst durch diese aufwendigen Sondermaßnahmen wurde eine im Sinne der wasserrechtlichen Auflagen umweltgerechte und auch für die Zukunft betriebssichere Herstellung des Tunnels gewährleistet. Besonderer Dank gebührt dem Bauherren für das stets sachliche und konstruktive Gesprächsklima, in welchem die technisch notwendigen Entscheidungen gemeinsam getroffen werden konnten.