

Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie
Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure;
Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie
Band: 6 (2001)
Heft: 1

Artikel: Gefährdungsbilder auf Grund von Gebirgsdrainage beim Untertagebau
und Ausführung von Felsinjektionen als Massnahme im Allgemeinen
und am Beispiel des Schachtes Sedrun (Gotthard-Basistunnel)
Autor: Keller, Franz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-222966>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 30.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Gefährdungsbilder auf Grund von Gebirgsdrainage beim Untertagebau und Ausführung von Felsinjektionen als Massnahme im Allgemeinen und am Beispiel des Schachtes Sedrun (Gotthard-Basistunnel)

mit 12 Figuren und 2 Tabellen

FRANZ KELLER *

Zusammenfassung

Bei tiefliegenden Tunnels werden Injektionen zur Gebirgsverbesserung als bautechnische Massnahme wegen des hohen Aufwandes an Zeit und Kosten nicht im Vordergrund stehen. Auch das dem Tunnel zuströmende Gebirgswasser wird im Regelfall drainiert und abgeleitet werden. Bei den Gefährdungsbildern:

- Oberflächensetzungen infolge Gebirgsdrainage (Beispiele Zeuzier, Gotthardpassgebiet),
- Beeinflussung von genutzten Quellen (Eigentumsrecht),
- Beeinflussung des Bergwasserspiegels (Umwelt, Biosphäre),

sind Injektionen jedoch das einzige Mittel um einen sich abzeichnenden Schaden abzuwenden oder den ursprünglichen Zustand wiederherzustellen.

Bei den geologischen Randbedingungen (Wasserwegsamkeit) bei Injektionen ist zwischen Karstsystemen, Störungen und ungestörtem geklüfteten Gebirge zu unterscheiden. Das Fliessverhalten des Wassers und insbesondere des Injektionsgutes auf Trennflächen (Klüften) ist schwierig zu modellieren und damit zu prognostizieren. Zwar kann der Geologe ein Modell der Trennflächenverhältnisse bilden und statistische Angaben über Klüftflächenabstände und Ausdehnung der Klüfte machen. Aber gerade die massgebenden Faktoren, wie die Klüftweiten, können im Untergrund nicht genügend genau dreidimensional erfasst werden. Auch indirekte Methoden wie die im Talsperrenbau üblichen Wasserabpressversuche erlauben erfahrungsgemäss keine genügend genaue zuverlässige Prognose bezüglich der Injektionen. Diese werden deshalb über den Injektionsvorgang selber gesteuert.

Am Beispiel des Schachtes Sedrun des Gotthard-Basistunnels wird gezeigt, wie ein einfaches pragmatisches Vorgehen (Beobachtung des Wasseranfalls in den Injektionsbohrlöchern) zum Erfolg führte, indem der Wasseranfall auf weniger als 10% reduziert wurde. In diesem speziellen Fall (Pumpkosten während rund 10 Jahren) war der hohe Aufwand (Kosten durch Arbeitsunterbrüche) gerechtfertigt.

1. Einleitung

Beim vorliegenden Artikel handelt es sich um eine überarbeitete Version von zwei Vorträgen, die am TFB Wildeggen an einem Seminar über Einflussfaktoren bei Felsinjektionen gehalten wurde. Er bezieht sich auf tiefliegende Tunnelbauten mit Schwergewicht auf der Durchörterung von Kristallin.

* Dr. Kobel + Partner AG, Lüssirainstrasse 59, 6300 Zug

Bei den geologischen Randbedingungen von Injektionen muss zwischen den für den Vortrieb aus bautechnischen Gründen notwendigen Injektionen (Bauhilfsmassnahmen) und den von aussen her (Umwelt, Schäden Dritter) bedingten Injektionen unterschieden werden.

Falls im Untertagebau bei der Überwindung die üblichen Sicherungsmittel versagen, stehen als Bauhilfsmassnahmen die Injektionen nicht im Vordergrund. So werden sie in einem technischen Bericht zu einem tiefliegenden Tunnel aufgrund der ermittelten Gefährdungsbilder zwar immer, aber erst nach Drainagebohrungen, Spiessen und Rohrschirmen an vierter Stelle genannt.

Gefährdungsbilder und entsprechende Massnahmen während der Bauphase für den TBM- oder konventionellen Vortrieb (aus Technischem Bericht IG-GBTN)						
	Massnahme	Gefährdungsbild				
		Wasser einbruch	hoher Wasserdruck	Niederbrüche	Instabilität Ortsbrust	grosse Deformationen
mögliche Massnahme	Drainagebohrungen					
	Spiesse					
	Rohrschirm (TBM)					
	Injektionen					
	Umgehungsstollen (TBM)					
	Teilausbruch (konv.)					

Tab. 1: Gefährdungsbilder und entsprechende Massnahmen während der Bauphase für den TBM- oder konventionellen Vortrieb (aus Technischem Bericht IG-GBTN).

Dass Injektionen nicht im Vordergrund stehen, hat vor allem mit dem grossen Zeitaufwand und den infolge des Unterbruchs der Vortriebsarbeiten hohen Kosten zu tun. Injektionen sind zwar bei grösseren Projekten aufgrund der ermittelten Gefährdungsbildern vorgesehen und ausgeschrieben, es ist aber in den seltensten Fällen möglich eine zuverlässige Prognose darüber zu erstellen, wann und wo sie in welchem Ausmass zur Anwendung kommen. Auf eine dieser Ausnahmen wird im Kapitel 5 über den Schacht Sedrun eingegangen.

Die Notwendigkeit zu Injektionen kann im Wesentlichen auf zwei Gruppen geologischer Faktoren zurückgeführt werden:

1. Probleme im Zusammenhang mit Bergwasser infolge von:
 - Wassereintrüben mit Schlamm,
 - sehr hohem allgemeinen Wasseranfall,
 - Umweltschutz (Absenkung Bergwasserspiegel, Beeinträchtigung von Quellen),
 - Auswirkungen auf Dritte durch Setzungen infolge der Gebirgsdrainage.

2. Mangelnde Festigkeit des Gebirges bei:

- Störungen,
- kleinstückig zerlegtem Fels oder zerschertem Fels ohne Kohäsion (z.B. Serpentinivorkommen Vereinatunnel),
- Hakenwurf und tiefgreifende Auflockerung in Talflanken (Bergzerreissung nach Stini).

Im Folgenden wird zuerst auf das Gefährdungsbild Gebirgsdrainage und Auswirkung auf Dritte und das damit zusammenhängende Problem Bergwasserspiegel/Grundwasser und auf die geologischen Randbedingungen beim Injizieren eingegangen. Die bautechnisch notwendigen Injektionen werden nur kurz gestreift, da bei diesen die geologisch-geotechnische Notwendigkeit gegeben ist.

2. Durch Gebirgsdrainage verursachte Gefährdungsbilder und Injektionen

2.1 Oberflächensetzungen infolge Gebirgsdrainage

Dass sich grössere Wassereintritte in Untertagebauten unter Umständen gravierend auf Staumauern auswirken können, ist seit dem Fall Zeuzier bekannt. Dort erlitt die Staumauer im Herbst 1978 schwere Schäden nachdem im 1.4 km entfernten und rund 400 m tiefer gelegenen Sondierstollen Rawil erhebliche Karstwassereintritte festgestellt worden sind. Die gemessenen Setzungen im Dammbereich betragen 11 cm. Die Sperrstelle Zeuzier befindet sich in helvetischen Sedimenten mit ihrem Wechsel von kalkigen und durchlässigen mit mergelig-tonigen und schlecht durchlässigen Schichten. Durch den Stollen war ein geschlossenes gespanntes Grundwasserstockwerk angezapft worden.

In der Folge hat der als Experte beigezogene Dr. G. Lombardi (Lombardi 1988, 1999) ein Felsmodell entwickelt, das die Vorgänge bei der Drainage von geklüftetem, elastischem und wassergesättigtem Fels beschreibt (F.E.S.-Modell = Fissured Elastic Saturated Rockmass Model). Mit diesem Modell können die Setzungen und ihr zeitlicher Verlauf simuliert werden.

Das Modell berücksichtigt, dass bei der Drainage eines wassergesättigten geklüfteten Gesteins durch einen Hohlraumbau eine Stauchung senkrecht zu den Klüften erfolgt. Der Wasserdruck in den Klüften hängt bei einem offenen, kommunizierenden System von der Höhe des Gebirgswasserspiegels ab. Durch die Herabsetzung des Kluftwasserdruckes können selbst dann Setzungen entstehen, wenn dem Gebirge durch den Untertagebau keine grossen Wassermengen entzogen werden und der Gebirgswasserspiegel nur unwesentlich oder gar nicht abgesenkt wird. Bei einer Absenkung des Gebirgswasserspiegels erreichen die Setzungen an der Terrainoberfläche jedoch höhere Setzungsbeträge. Dieser Vorgang setzt grössere durch den Untertagebau drainierte Wassermengen voraus. Aufgrund von Simulationsrechnungen erstrecken sich die Deformationen über eine längere Periode.

Publik geworden sind auch die Setzungen im Bereich des Gotthard-Passes (Löw et al. 2000), die eine Grössenordnung von bis zu 10–12 cm erreichten. Festgestellt wurden sie durch eine Wiederholung des Präzisionsnivelements durch die eidgenössische Landestopographie die im Zusammenhang mit der Frage von noch aktiven differenziellen Verstellungen an postglazialen Störungen veranlasst wurde

(Eckardt et al. 1983, Keller 1999). Da der Bau des Gotthard-Strassentunnels in den Zeitraum zwischen den beiden Messkampagnen fällt, aus welchen sich die Setzungen ergaben, wurden die letzteren auf die Drainagewirkung durch den Bau des Strassentunnels zurückgeführt.

Geologische Einheit/Lokalität	Geschwindigkeiten		Höhendiff. Strassentunnel Messpunkt (m)	Setzungen pro 100 m Gesteinssäule (mm)
	1918 - 1970 (mm/y)	1970 - 1999 (mm/y)		
Permokarbon der Urseren-Garvera-Zone/Hospental	0.85	0.535	300	3.0
Paragneise/Chämleten	0.87	0.075	400	5.8
Gamsboden-Granitgneis/Nordgrenze	0.875	-1.1	500	11.5
Gamsboden-Granitgneis/Mätteli	0.88	-2.36	610	15.4
Gamsboden-Granitgneis/Brüggloch-Sustenegg	0.89	-2.95	780	14.3
Gamsboden-Granitgneis/Rodont, Südgrenze	0.91	-1.76	800	9.7
Fibbia-Granitgneis/Gotthardpass	0.94	-0.94	940	5.8
Rotondo-Granit/Gotthardpass	0.94	-0.88	860	6.1
Rotondo-Granit Tremola	0.95	-0.5	790	5.3
Tremola-Serie/Motto di dentro	0.9	-0.01	520	5.1

Tab. 2: Resultate der Wiederholungen des Präzisionsnivelements über den Gotthardpass (Grundlage: Bericht L + T 2000). Setzungen pro 100 m Gesteinssäule aufgrund der Höhendifferenz zwischen Strassentunnel ohne Berücksichtigung der seitlichen Distanz und der Tiefenabhängigkeit der Setzungen. Die Geschwindigkeit 1918–1970 entspricht dem Mass für die normale Alpenhebung.

Die Setzungen sind von der Gesteinseinheit abhängig (siehe Tab. 2). Um die Abhängigkeit von der Höhe der Gesteinssäule auszuschalten, wurden die Setzungen auf 100 m Überlagerung bezogen. Beim Setzungsbetrag ist zu berücksichtigen, dass sich die Punkte ohne Beeinflussung durch den Strassentunnel um 26–29 mm gehoben hätten. Der Gamsboden-Granitgneis hat sich 3–5 mal stärker gesetzt als die übrigen Gesteinseinheiten. Er war auch die im Strassentunnel am stärksten wasserführende Einheit. Sowohl die Grösse der Wasserführung, wie auch die Setzungsbeträge sind auf die gleichen Faktoren zurückzuführen nämlich die Klüftigkeit sowie die Öffnungsweite und Rauzigkeit der Klüftflächen. Diese Faktoren bestimmen auch die Injizierbarkeit. Das heisst, dass sich setzungsempfindliche und sich schlimmstenfalls negativ auswirkende Gesteine auch am besten injizieren lassen.

Ob an der Oberfläche durch solche Setzungen Schäden auftreten oder nicht, hängt einerseits vom Ausmass der Setzungen sowie vor allem der Grösse und der Form der Setzungsmulden ab (Lombardi 1999) und andererseits von der Grösse und Setzungsempfindlichkeit des betrachteten Objektes. Die Setzungen im Gebiet des Gotthard-Passes wurden beispielsweise vor der Wiederholung des Präzisionsnivelements von niemandem bemerkt, weil keine augenfälligen Veränderungen vorhanden sind.

Injektionen der stark wasserführenden Abschnitte im verursachenden Untertagebau sind praktisch das einzige Mittel um schädliche Setzungen zu verhindern, denn der Zusammenhang zwischen hoher Wasserführung im Gamsboden-Granitgneis und Setzungsmass war im Falle des Gotthard-Passes evident.

2.2 Gefährdung von Quellen

Die Beeinflussung von Oberflächenquellen durch tiefliegende Untertagebauten kann nie mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Gefährdet sind in erster Linie Felsquellen oder Folgequellen von Felsquellen. Rechtlich befassen sich die Art. 706 (Abgraben von Quellen - Schadenersatz) und Art. 707 (Abgraben von Quellen - Wiederherstellung) des Schweizerischen Zivilgesetzbuches mit der Frage einer Beeinträchtigung von Quellen durch Bauten (Eigentumsrecht). In einer Plangenehmigung heisst es denn auch: «Das Begehren, wonach im Falle einer Beschädigung oder eines Anbohrens der Quellen der Schaden zu ersetzen sei, wird gutgeheissen. Die Festlegung des Schadenersatzes im Falle der Beeinträchtigung der Quellen fällt in den Zuständigkeitsbereich der Eidgenössischen Schätzungskommission.» Die landläufige Meinung, ein Trockenfallen einer Quelle habe das Einstellen eines Tunnelvortriebes zur Folge, ist somit falsch.

Die Wiederherstellung einer versiegten Quelle durch Abdichtung des Tunnels und Injektion des umgebenden Gebirges wird im oberflächennahen Bereich möglicherweise erfolgreich sein. Dies vor allem dann, wenn ein kausaler Zusammenhang zwischen einer wasserführenden Zone und dem trocken Fallen der Quelle besteht. Bei grosser Überlagerung wird es einerseits wegen der möglichen Umläufigkeiten schwierig sein mit Injektionen den gewünschten Erfolg zu erzielen und andererseits kaum zu ermitteln sein, welche wasserführende Zone den Schaden verursacht hat. Hier wird ein Realersatz oder eine Abgeltung im Vordergrund stehen.

Der Entwurf «Grundwasserschutz» der Arbeitsgruppe Grundwasserschutz 2000 des BUWAL unterscheidet zu wenig zwischen oberflächennahen und tiefliegenden Tunnels und würde gemäss der entsprechenden Tabelle Tunnels im Bereich der Schutzzonen S1–S3 keine Untertagebauten zulassen. Der Bau eines langen tiefliegenden Tunnels wäre bei einer solchen Regelung nicht mehr realisierbar, da selbst im alpinen Raum kaum eine Linienführung gefunden werden könnte, die nicht unter Quellschutzzonen durchführt. Bei einer rechtlichen Beurteilung spielt die Verhältnismässigkeit eine Rolle und es kann eine Güterabwägung vorgenommen werden. Auch ein Basistunnel, der Talschaften vor Immissionen durch den Schwerverkehr schützt, ist ein Schutzgut.

2.3 Beeinflussung des Bergwasserspiegels und des Grundwasserhaushaltes

Im Gewässerschutzgesetz vom 24. Januar 1991 ist unter Art. 43 «Erhaltung von Grundwasservorkommen» festgehalten: «Die Kantone sorgen dafür, dass einem Grundwasservorkommen langfristig nicht mehr Wasser entnommen wird, als ihm zufließt. Kurzfristig darf mehr Wasser entnommen werden, sofern dadurch die Qualität des Grundwassers und die Vegetation nicht beeinträchtigt werden». Das BUWAL setzt in seinem Grundlagenbericht «Grundwasserschutz bei Tunnelbauten» (1998) das im Gebirge in der wassergesättigten Zone gespeicherte Bergwasser dem Alluvialgrundwasser gleich. Bei seichten Tunnels ist die gestellte Forderung, nämlich dass jede Absenkung des Bergwasserspiegels zu vermeiden sei, mit Hilfe von Abdichtungen und Injektionen mit vertretbarem Aufwand erfüllen. In der Wegleitung zur Umsetzung des Grundwasserschutzes bei Untertagebauten (1998) werden bei tiefliegenden Tunnels mit hohen Wasserdrücken die Drainagemassnahmen als Regelfall anerkannt. Im Falle von AlpTransit wurde im Übrigen ver-

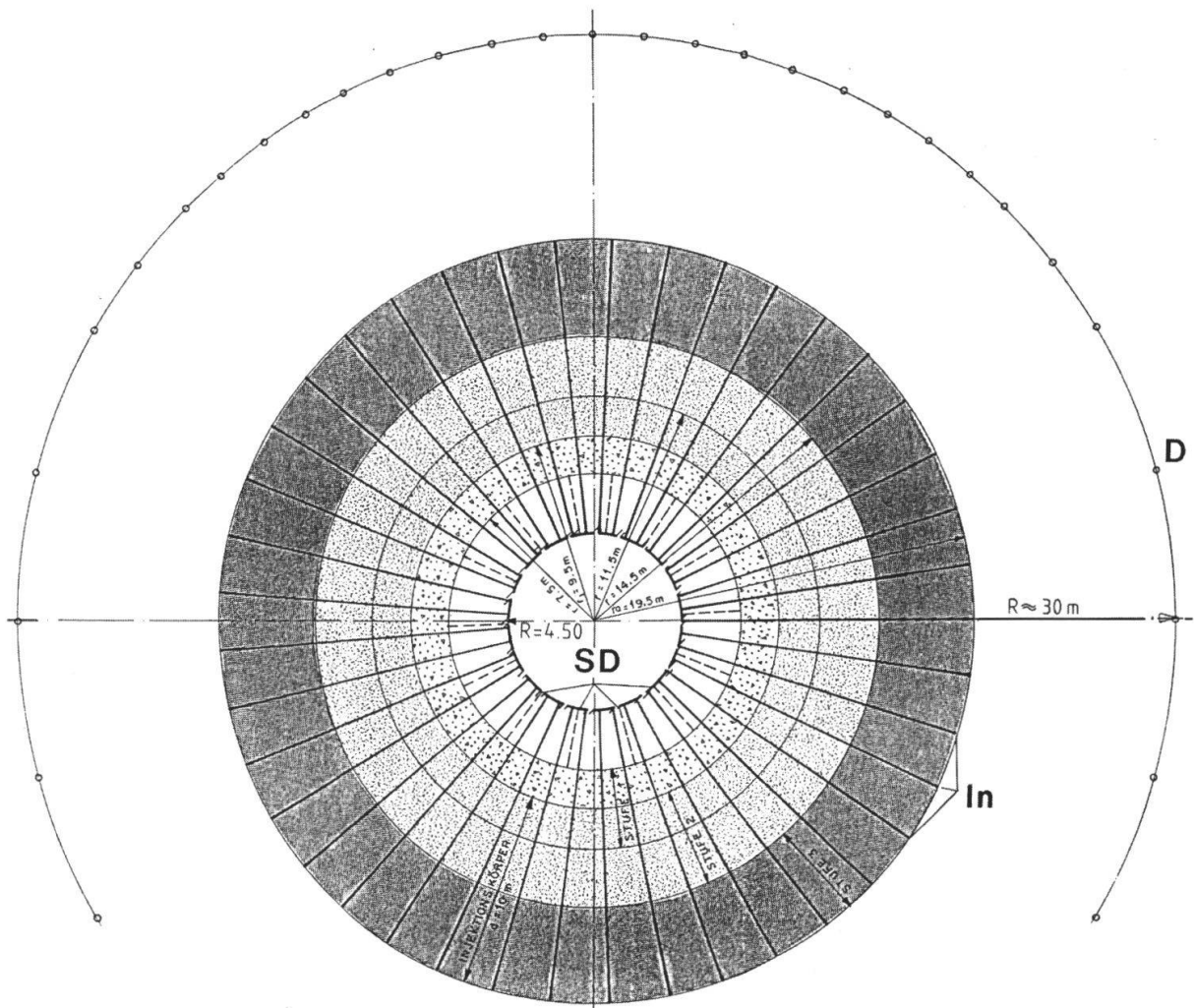


Fig. 1: Schnitt durch einen dreistufigen Injektionskörper. Projektskizze IG-GBTN zur Abdichtung einer Störung. D = primärer Drainageschirm mit 31 Bohrungen um die Injektionen überhaupt zu ermöglichen. In = Injektionsbohrungen (41 Stück); SD = sekundäre Drainage (14 Stück) zur Entlastung des Tunnelgewölbes.

einbart, dass während dem Bau eine vorübergehende Absenkung des Gebirgswasserspiegels zugelassen wird und dann Massnahmemöglichkeiten ins Auge gefasst werden, wenn sich konkrete negative Auswirkungen feststellen lassen.

Umfangreiche Modellierungen (Klemenz et al. 1999) im Falle des tiefliegenden Gotthard Basistunnels haben ergeben, dass im ungestörten Gebirge keine Veränderungen des Bergwasserspiegels im Bereich der Biosphäre zu erwarten sind. Bei einzelnen Sondierbohrungen (Öfital, Teilabschnitt Erstfeld) hat es sich zudem gezeigt, dass der Bergwasserspiegel weit unterhalb der Terrainoberfläche liegt.

Nicht ausschliessen lassen sich negative Auswirkungen im Falle des Anfahrens einer stark wasserführenden Störung. Für einen solchen Fall haben die Ingenieure Szenarien entwickelt, die aufwändige Injektionen und Drainagen zur Entlastung der Tunnelröhre umfassen (Fig. 1). Aus geologischer Sicht ist der Erfolg solcher Massnahmen unsicher, da bei hohen Überlagerungen und hohen Drücken mit Umläufigkeiten gerechnet werden muss, die sich evtl. erst nach Jahren bemerkbar machen.

3. Injektionen zur Reduktion des Wasseranfalls

3.1 Gebirgsdurchlässigkeit oder Wasserwegsamkeit

Während das Grundwasser im Lockergestein in einem mindestens schichtweise homogenem Porenraum gespeichert ist und in diesem fliesst, ist im Fels das Gestein selbst praktisch undurchlässig. Das Wasser zirkuliert entlang von Klüften, Schichtfugen und Störungen, sowie in Karstsystemen. In der Hydrogeologie wird in Felsgesteinen deshalb meistens von Gebirgsdurchlässigkeit oder Wasserwegsamkeit gesprochen.

Eine erhöhte Wasserwegsamkeit weisen die folgenden Zonen und Strukturen auf:

- Karstsysteme;
- Störungen (Kakirite, Mylonite) inklusive stärker zerbrochenes Begleitgestein;
- intensiv zerbrochene und geklüftete Gesteine entlang von Grenzen zwischen Gesteinstypen mit grossen felsmechanischen Unterschieden, oder von spröden Gesteinen zwischen duktilen Gesteinen;
- Zonen mit hydrothermal zersetztem Gestein;
- Zone der Oberflächenverwitterung und Auflockerungszone der Felsoberfläche.

In Bezug auf die geologischen Randbedingungen bei Injektionen ist zwischen Karstsystemen, Störungen und ungestörtem Gebirge zu unterscheiden.

3.2 Karstsysteme

Karstsysteme sind in reinen Kalken, Dolomiten (in den Schweizer Alpen vor allem Schrätkalk, Malmkalke, sowie Kalke des Juras) und bei Gipsvorkommen verbreitet. Im Tunnelbau sind Karstsysteme wegen der hohen Wassermengen die in ihnen fliessen können, gefürchtet. Der mögliche Wasseranfall schwankt ausserordentlich stark. In der Prognose kann deshalb allenfalls eine Grössenordnung abgeschätzt werden. Im ungünstigsten Fall überschreitet die tatsächlich anfallende Wassermenge die Kapazität einer projektierten Rigole. Es wäre aus diesem Grund an und für sich oft wünschenswert Karstwasservorkommen um- respektive wieder ins Gebirge einzuleiten oder durch Injektionen zu verdrängen.

Dass Karstsysteme schwierig zu beherrschen sind soll an einem Beispiel aus dem Seelisbergtunnel erläutert werden (Schneider 1984). Dort wurde beim Abschlag km 121.738 im September 1973 ein wasserführendes Karstloch von 30 cm Durchmesser freigelegt, aus dem unmittelbar nach dem Anfahren 1–2 m³/s Wasser schossen. Das Wasser spülte bis 15 cm grosse Gesteinsbrocken in den Tunnel (vorwiegend Schrätkalk, reichlich Grünsandsteine des Gault und vereinzelt sogar Kristallin!). Das Karstwasser war bereits eine Woche früher mit einer Gasvorbohrung angestochen worden, wobei das Wasser mit grossem Druck austrat.

Die Quelle wurde in einer Nische mit Absetzbecken (Fig. 2) gefasst. Ihre Ergiebigkeit schwankte stark. Von weniger als 100 l/s schwoll die Ergussmenge bei Starkregen innerhalb eines Tages auf 800 l/s an.

Nach dem Auffahren der Seeröhre trat das Wasser aus dem seeseitigen (!) Parament der Seeröhre aus. Nach dem Ausbruch der dortigen Rigole floss die gesamte Niederwasserführung des Karstsystems an dieser Stelle aus. Völlig überraschend drückte das Karstwasser 1976, nach drei Jahren! durch das bereits betonierte see-

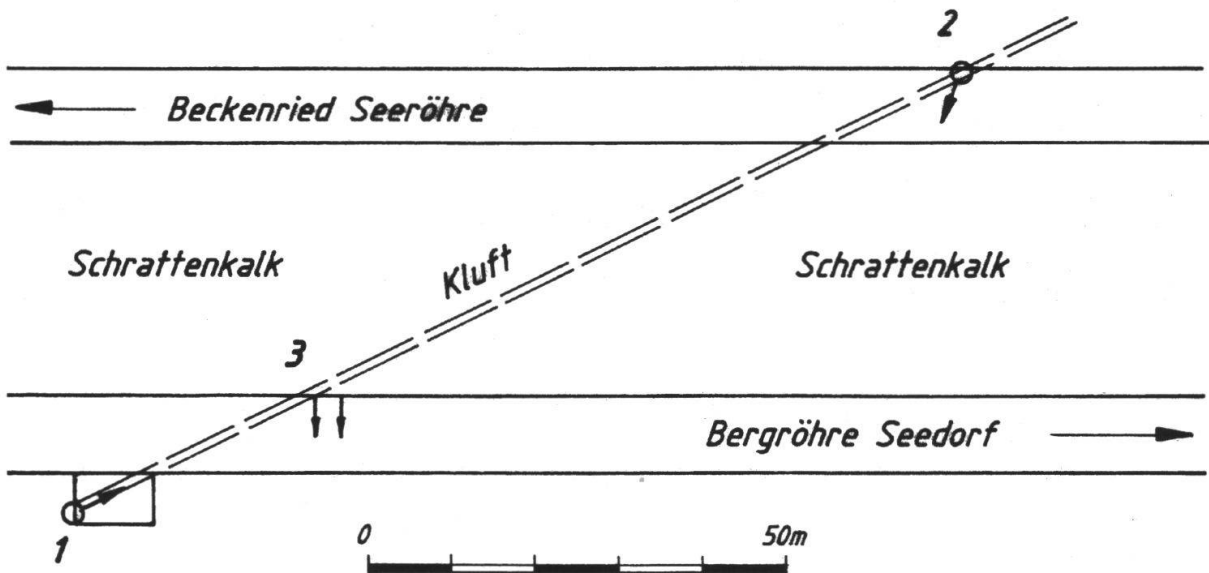


Fig. 2: Karstsystem im Schrattenkalk des Seelisbergtunnels km 121.740 der Bergröhre. 1 = zuerst angefahrener Karstschlauch von 30 cm Durchmesser mit Nische für Absetzbecken; 2 = Austrittsstelle Rigole Seeröhre; 3 = nachträgliches Eindringen Karstwasser im linken Parament der Bergröhre.

seitige Parament der Bergröhre, sodass auch dort eine Fassung ausgebrochen werden musste. Hätte man das Wasser durch Injektionen oder einen Verschluss des Karstloches verdrängt, was ursprünglich diskutiert wurde, so hätte sich der Druck wieder aufgebaut und es wäre später mit grosser Wahrscheinlichkeit an irgend einer anderen Stelle zu Schäden gekommen.

Ob ein wasserführendes Karstsystem mit einem Tunnel oder Stollen angefahren wird oder nicht, ist dem Zufall unterworfen. Mit geophysikalischen Mitteln sind Karstschläuche nicht zu erfassen und auch bei Vorausbohrungen ist es Zufall, ob ein Karstsystem angestochen wird oder nicht. Wie das Beispiel Seelisbergtunnel zeigt könnte bei einer erfolgreichen Injektion an der ursprünglichen Austrittsstelle, das Karstwasser Jahre später einen anderen Weg in den Tunnel finden.

Das Verdrängen von Karstwasser mit Hilfe von Injektionen wird somit in einem Tunnelvortrieb in den meisten Fällen schwierig, aufwändig und von ungewissem Erfolg sein.

3.3 Störungen

Störungen können erhebliche Wassermengen führen, die sich im ungünstigen Fall auch auf den Wasserhaushalt an der Oberfläche auswirken können. Störungen sind sowohl aus diesem Grunde, wie auch aus bautechnischen Gründen ein Kandidat für Injektionen. Denn die Gefahr von Niederbrüchen ist im Bereich von Störungen am Grössten.

Wasserführung und Injektionsfähigkeit hängen vom Charakter der Störungen ab. Der Geologe unterscheidet zwischen durch duktile Verformungen entstandenen Myloniten und durch spröde Bruchvorgänge entstandenen Kakiriten (deshalb auch Bruchbrekzien genannt). Im polymetamorphen Gebirge, wie den Zentalmas-

siven ist oft zu beobachten, dass alte Strukturen bei erneuter Beanspruchung reaktiviert wurden, und dass deshalb beide Typen nebeneinander vorkommen können. Kakirite sind definitionsgemäss Gesteine in denen Gesteinsbruchstücke in einer mehligigen Grundmasse (fault gouge) schwimmen. Bei geringem Anteil an Gesteinsmehl bestehen sie aus bröckeligem, von Klüften und Rutschflächen durchzogenem, Gestein. Sie sind dann kohäsionslos. Verlehmt Störungen besitzen dagegen für den Felsmechaniker eine Kohäsion.

Oft ist die Kernzone einer kakiritischen Störung, die vorwiegend Zentimeter bis Meter mächtig ist, verlehmt. Sie ist in diesem Falle schlecht durchlässig, wenig oder kein Wasser führend und auch schlecht injizierbar. Kakiritische Störungen werden aber häufig von einer breiteren bis Dekameter mächtigen Zone mit stärker zerbrochenem, durchlässigen und deshalb wasserführendem und somit injizierbarem Gestein begleitet.

Da Störungen aus «weichen», verwitterungsanfälligen Gesteinen bestehen sind sie an der Oberfläche nahezu immer von Lockergestein bedeckt. Sie treten morphologisch als Runsen in den Bergflanken oder als schmale, lockergesteinsbedeckte Zonen in Erscheinung, die keinen Rückschluss auf den Aufbau der Störung zulassen. Es ist dementsprechend schwierig zu prognostizieren, welche Durchlässigkeit und Wasserführung sie hat und die entsprechenden Injektionsmassnahmen bezüglich Aufwand und Kosten mit der wünschenswerten Genauigkeit zu planen.

Im Falle des Gotthard Basistunnels wurden umfangreiche Simulationen zur Ermittlung der Wasserführung der Störungen durchgeführt, welche Wassermengen von teilweise mehreren hundert l/s pro Störungen ergaben. Die Berechnungen gehen allerdings von der stark vereinfachenden Annahme einer hydraulisch wirksamen Breite der Störungen von 1 m aus. In einer Diplomarbeit über das südliche

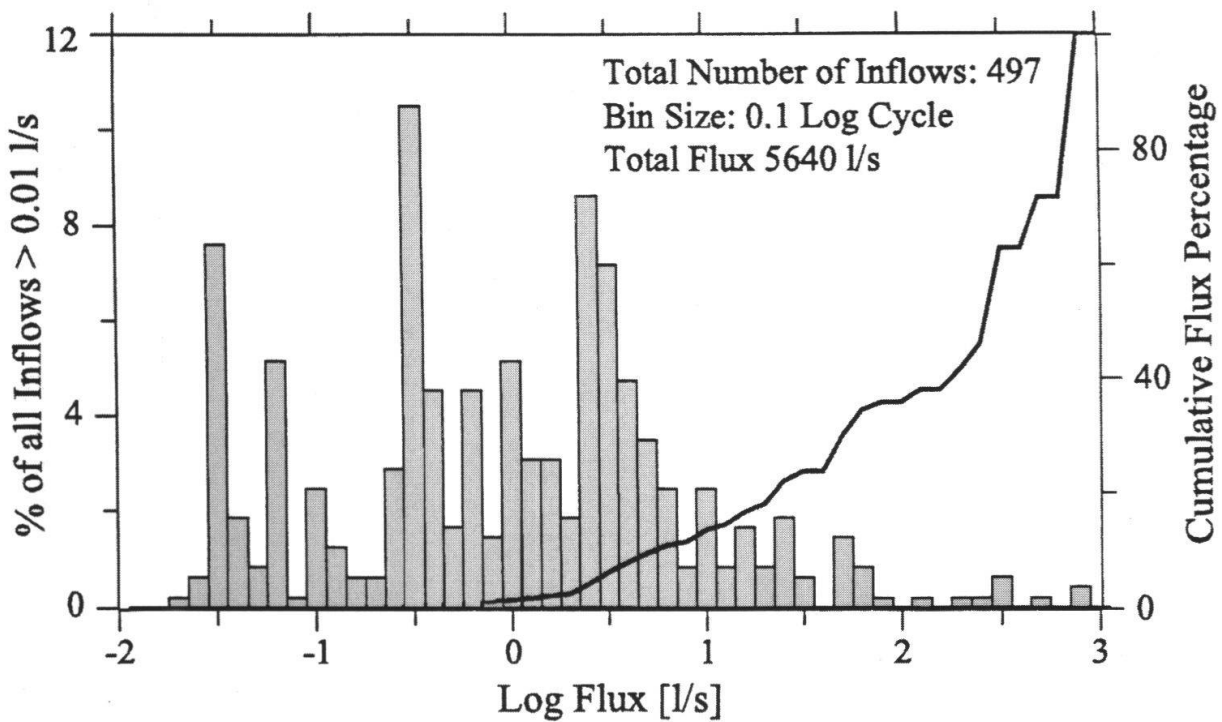


Fig. 3: Prozentualer Anteil aller Zuflüsse zu 130 km Tunnels und Stollen im östlichen Aar- und Gotthard-Massiv. Fig. 5 aus Löw et al. (2000).

Aar-Massiv im Gebiet von Alp Caschlé (Frei 1999, Frei & Löw 2001) wurde die Prognose mit Hilfe von Färbversuchen und den so erhaltenen Fliessgeschwindigkeiten verbessert. Die Berechnungen für die einzelnen Störungen liefern immer noch hohe Werte von 10–190 l/s. Zu bemerken ist, dass Eingabe- und Austrittstellen des gefärbten Wassers über dem Talweg und somit mehr als 1000 m über dem Tunnel liegen und die hohen Werte möglicherweise zumindest teilweise auch auf die oberflächliche Auflockerung der Talflanken zurückzuführen sind. Die Prognose durch Simulationen ist daher als konservativ (pessimistisch) einzustufen. Wie die Fig. 3 aus Löw et al. (2000) zeigt, sind Zuflüsse von mehr als 10 l/s in effektiv ausgeführten Untertagebauten eher selten, liefern aber 85% der kumulierten Wassermenge.

Wird im Bereich einer stark wasserführenden Störung injiziert, so baut sich in einem tiefliegenden Tunnel der Wasserdruck wieder auf, sodass aus felsmechanischen Überlegungen ein massiver Injektionskörper erstellt werden muss. Um das Tunnelgewölbe nicht zu zerstören, ist es zudem mit Drainagebohrungen zu entlasten (siehe Fig. 1).

3.4 Ungestörtes Gebirge

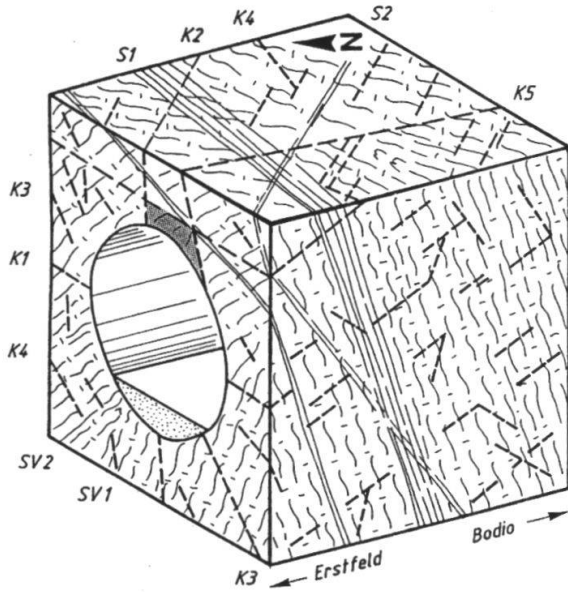
Im ungestörten Gebirge fliesst das Wasser und damit auch das Injektionsgut auf Trennflächen, vor allem auf Klüften. Der Durchfluss in der einzelnen Kluft ist in der dritten Potenz von der Öffnungsweite der Kluft (Sabarly 1968), aber auch von der Kluftaufrichtigkeit (glatt, rauh) und Kluftfüllung abhängig.

Die Wasserwegsamkeit des Gebirges hängt von den Kluftabständen, dem Durchtrennungsgrad (Persistenz) und der Anzahl Kluftsysteme ab. Der Erfolg von Injektionen hängt zudem auch von der Richtung der Injektionsbohrungen bezüglich der einzelnen Trennflächensysteme ab. Im ungestörten geklüfteten Gestein ist die Gebirgsdurchlässigkeit anisotrop, d.h. grösser in Richtung der Schichtung und Schieferung als quer dazu und am grössten in Richtung der Faltenachsen (z.B. Altdorfer Sandstein in Fig. 4d).

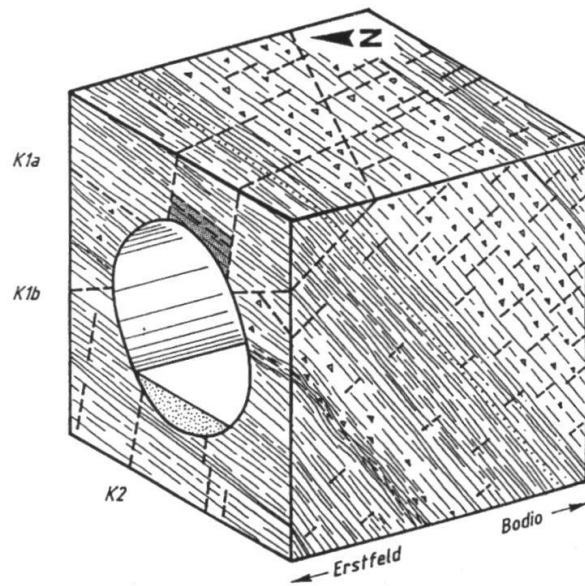
Der Geologe kann anhand von Aufschlüssen an der Oberfläche, bestehenden Untertagebauten und Bohrungen die Orientierung der Trennflächen, die Häufigkeitsverteilung von Abständen und Durchtrennungsgrade ermitteln und Felsmodelle für die verschiedenen vorkommenden Gesteinstypen entwickeln (Fig. 4). Er kann auch eine stereographische Projektion liefern anhand derer die Bohrrichtungen optimiert werden können. Aber die für die Wasserwegsamkeit wichtigste Grösse, nämlich die Kluftweite, wird er in den wenigsten Fällen liefern können. An der Oberfläche sind die Kluftweiten durch die Oberflächenverwitterung und in einem Sprengvortrieb durch die Sprengauflockerung und die Spannungsumlagerungen verändert. In Sondierbohrungen sind zwar Wasserabpressversuche möglich. Diese erfassen aber erstens nur einen geringen Teil des zu durchörternden Gebirgskörpers und zweitens kann eine einzige einige Millimeter geöffnete Kluft einen Druckaufbau verhindern. Im Unterschied zum Talsperrenbau mit den zahlreichen Bohrungen für Dichtungsschleier und Drainageschirm werden zudem für eine Tunnelprognose nur sehr wenige Bohrungen in gesundem, durchlässigem Fels ausgeführt. Ein Scanning in der Bohrung mit optischen oder physikalischen Methoden erfasst die Kluftbreite ebenfalls nicht in der dritten Dimension.

Bei der Prognose zu berücksichtigen ist bei tiefliegenden Tunnels auch die mit stei-

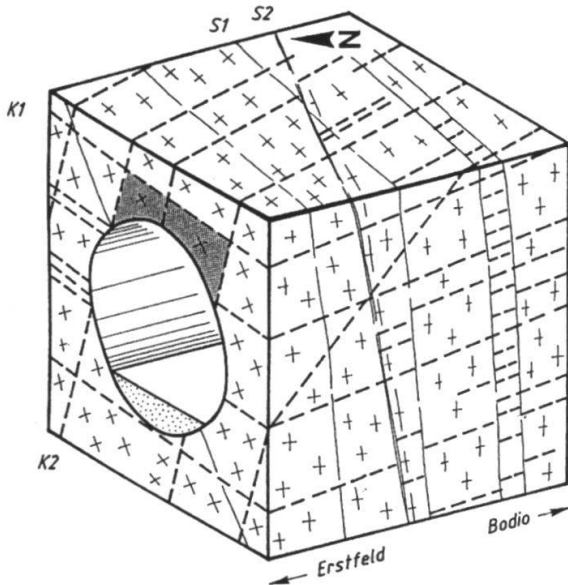
a) *Erstfelder Gneise*



b) *Intschi - Zone*



c) *Zentraler Aare - Granit*



d) *Altdorfer Sandstein*

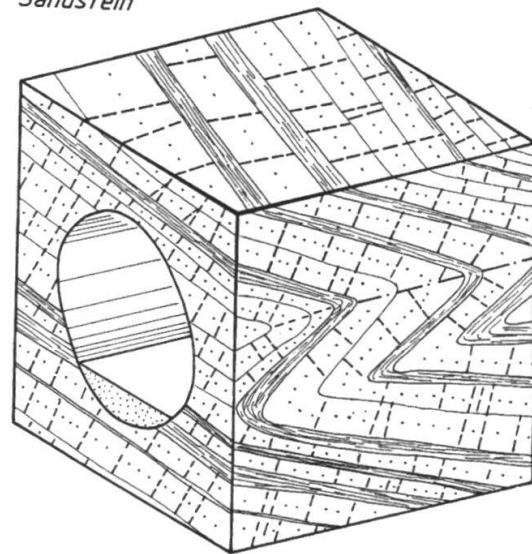


Fig. 4: Felsmodelle für verschiedene Gesteinstypen:
 a) Erstfelder Gneis: migmatitische Gneise, unregelmässig geklüftet, mässige Wasserwegsamkeit.
 b) Intschi Zone, vulkanische metamorphe, z.T. phyllitische Schiefer, schlecht durchlässig, stark anisotrop.
 c) zentraler Aare-Granit, grob geklüftet, kommunizierende Klüfte, erhöhte Wasserwegsamkeit.
 d) Altdorfer Sandstein; Wechsellagerung Sandstein Tonschiefer, starke Anisotropie, Tonschiefer schlecht, Sandsteinbänke gut durchlässig. Grösste Durchlässigkeit in Richtung der Faltenachsen.

gender Überlagerung abnehmende Durchlässigkeit durch Abnahme der Öffnungsweiten der Trennflächen infolge der zunehmenden Spannung. Dieser Effekt kann durch Felderhebungen an der Oberfläche oder oberflächennahe Versuche nicht ermittelt werden.

Die beste Prognosemöglichkeit bietet immer noch der Vergleich der Wasserführung in einen Untertagebau in gleichen oder analogen Gesteinen. Jeder Vortrieb kann als Experiment zur Erfassung der Bergwasserführung aufgefasst werden. Diese «Experimente» zeigen, dass das Gebirge auch innerhalb einer einzelnen Gesteinsserie nicht ein einheitliches zusammenhängendes Grundwasser führt. Strecken die trocken sind, wechseln nämlich auch bei gleichartiger Durchtrennung mit stärker wasserführenden Zonen ab. Vor allem im Kristallin bestehen offensichtlich in ihrer räumlichen Ausdehnung beschränkte Kluftwassernetze, die nicht oder nur an einzelnen Stellen miteinander kommunizieren. Die Tatsache, dass der Druckspiegel von benachbarten nicht miteinander kommunizierenden Kluftwasservorkommen aufgrund der gleichen Vorflutverhältnisse die gleiche Höhe erreichen kann, täuscht oft einen einheitlichen Bergwasserspiegel vor.

Die meisten Modellierungen zur Prognose basieren auf mittleren k -Werten respektive Transmissivitäten und isotropen Verhältnissen, was den natürlichen Gegebenheiten im Fels wenig entspricht. Ein korrektes Modell für das Gebirge zu entwickeln, die das Fließen in den Klüften unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Faktoren wie Kluftöffnungen, Kluftabständen und Kluftlängen berücksichtigt, dürfte sehr aufwändig sein. Eine reine Mittelwertbildung (z.B. Angabe des mittleren Kluftflächenabstandes) bildet die Wirklichkeit schlecht

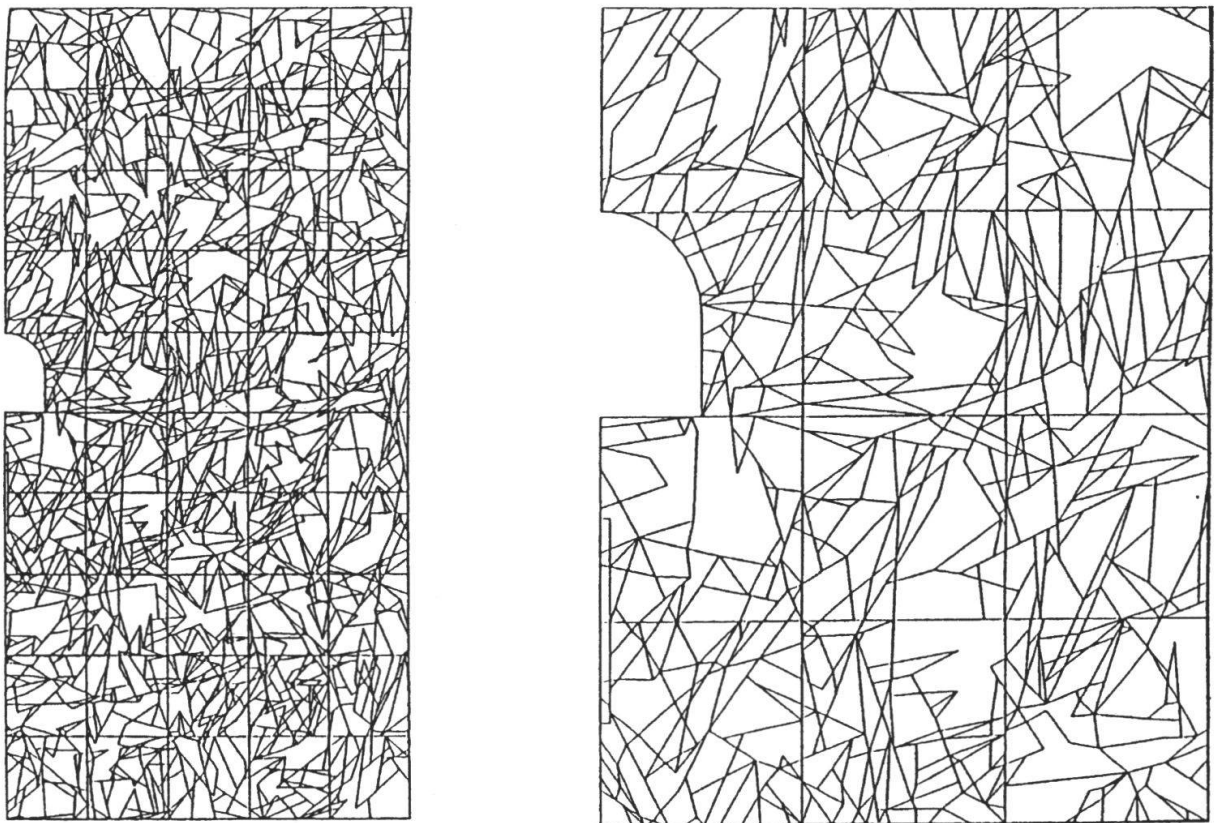


Fig. 5: Stochastisch generiertes Kluftnetz. Bild 5 aus Konietzky et al (1994); links Gesamtmodell, rechts Teildarstellung.

ab. Ansätze für die mathematische Modellierung des Tunnelumfeldes mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen der massgebenden Faktoren sind vorhanden (Konietzky et al. 1994, Fig. 5). Allerdings scheinen die generierten Kluftmodelle gemessen an geologischen Modellvorstellungen (Fig. 4) etwas wirr zu sein.

Angesichts der Tatsache, dass auf der einen Seite der Geologe zwar viele Daten liefern kann, aber die wichtigsten Daten wie Kluftweite und Kluftrauigkeit kaum quantitativ erfassen kann und andererseits aufgrund der Literatur das präzise physikalische Verhalten des Injektionsmaterial beim Injizieren noch nicht mit genügender Genauigkeit bekannt sind, bleibt der Weg über die Erfassung der Parameter und der kybernetischen Steuerung der Injektionsarbeiten während der Injektion selbst (Zettler et al. 1998). Eine weitere Möglichkeit bietet die im Kapitel 5 vorgestellte Beobachtung des Wasseranfalls im Injektionsbohrloch.

4. Injektionen zur Verfestigung des Gebirges

Falls Fels so zerlegt und zerschert ist, dass er zu Verbrüchen neigt, sind die geologischen Voraussetzungen für kurze lokale Injektionen aufgrund der zahllosen Trennflächen gegeben und eine gebräuchliche Bauhilfsmassnahme. Erwähnt sei etwa die Serpentinistrecke im Vereinatunnel (Amberg 1994), wo das Gebirge aus einem linsenförmig zerscherten Gestein mit spiegelglatten Scherflächen bestand und erfolgreich mit injiziertem Epoxidharz verfestigt wurde.

Als weiteres Beispiel sei der Adlertunnel erwähnt, wo tektonisch beanspruchtes, entfestigtes Gestein im Übergang vom Gipskeuper in den Schilfsandstein und die unteren bunten Mergel respektive den Gansinger Dolomit zu Verbrüchen führte und umfangreiche Injektionen mit Zementsuspension aus einem Seitenstollen heraus notwendig machten (Chiaverio et al. 2000).

Als lokale Massnahme bei wasserführendem entfestigtem Gestein haben sich in untiefen Tunnels auch PU-Injektionen bewährt.

5. Injektionsarbeiten beim Gotthard-Basistunnel, speziell im Schacht Sedrun

5.1 Einleitung

Der Teilabschnitt Sedrun nimmt in Bezug auf Injektionen aus drei Gründen eine Sonderstellung ein:

1. Wird der Hauptvortrieb über einen 800 m tiefen Schacht versorgt. Alles anfallende Wasser muss bis zum Durchschlag zu den übrigen Teilabschnitten während Jahren hochgepumpt werden. Während dem Abtiefen muss zudem das im Bereich der Schachtsohle anfallende Wasser mit Kübeln gefördert werden. Die Situation entspricht bis zum Zeitpunkt des Durchschlags jener einer Grube im Bergbau. In der Arbeitsgemeinschaft Schacht Sedrun (A.S.S.) ist eine südafrikanische Schachtbaufirma (Shaft Sinkers International Ltd) beteiligt, die als Unternehmervariante einen sogenannten Cover drill mit Injektionen vorschlug. Die ATG hat diesem Vorschlag zugestimmt.
2. Aus Sicherheitsgründen soll während des Hauptvortriebs die verlangte Pumpenkapazität von 1000 l/s nicht vollständig ausgenutzt werden. Die während der

Vortriebsarbeiten zugelassene Wassermenge wurde deshalb auf 400 l/s begrenzt. Wird sie erreicht oder überschritten, so sind Injektionen zur Abhaltung des Bergwassers vorgesehen. Für den Endzustand wurde eine Wassermenge vorgegeben, die 100 l/s pro Vortriebsrichtung nicht überschreiten soll.

3. Im Bereich des Teilabschnittes Sedrun liegen die Stauhaltungen Nalps, Santa Maria und Curnera. Bei grösserem Wasserandrang im Tunnel, oder falls die sich ins Vorfeld der Sperren erstreckenden geodätischen Messungen tendenzielle Verformungen anzeigen, die zu Schäden an den Staumauern führen könnten, sind Injektionen zur Reduktion des Wasserandrangs vorgesehen.

Daneben sind auch in diesem Teilabschnitt gebirgsverbessernde Injektionen als mögliche Massnahme geplant.

5.2 Geologisch-tektonische Übersicht über den Teilabschnitt Sedrun

Zugangsstollen und Schacht Sedrun liegen im Tavetscher Zwischenmassiv. Die geologisch-tektonische Situation ist aus der Fig. 6 ersichtlich. Eine Beschreibung der regionalen Geologie und ein ausführliches Literaturverzeichnis findet sich in Labhart (1977, 1999).

Das Tavetscher Zwischenmassiv kann im Bereich des Gotthard-Basistunnels sowohl tektonisch als auch bautechnisch zweigeteilt werden in:

- Ein nördliches Tavetscher Zwischenmassivs (TZM-N), das alpin stark bis extrem duktil verformt, d.h. verschiefert ist und in einer späten Phase zudem sprödetektonisch beansprucht wurde und deshalb oft kakiritisiert und von zahlreichen Störungen durchzogen ist. Diese Gesteinsserie ist als geotechnisch ungünstig zu bewerten. Über weite Strecken ist druckhaftes Gebirge zu erwarten. Bautech-

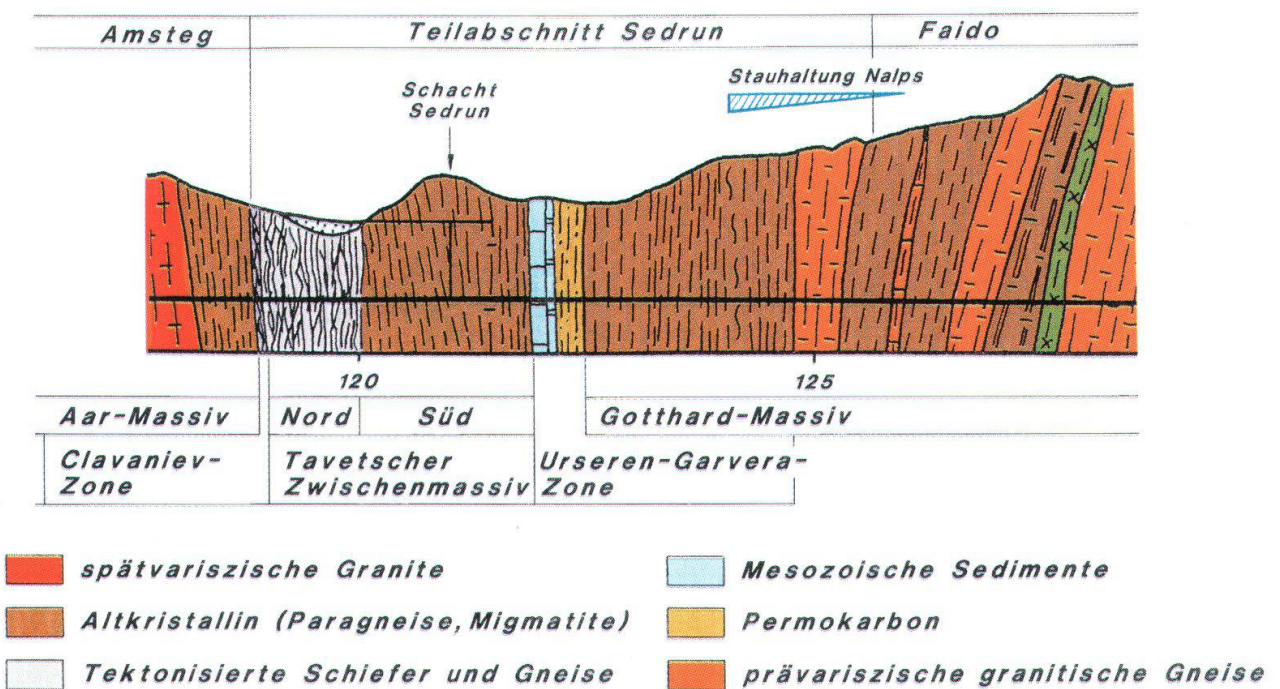


Fig. 6: Geologisch-tektonisches Übersichtsprofil längs dem Basistunnel mit dem Schacht Sedrun im südlichen Tavetscher Zwischenmassiv.

nisch sehr ungünstig ist auch die nördlich anschliessende zum Teilabschnitt Sedrun gehörende Clavaniev-Zone.

- Ein alpin nur teilweise duktil beanspruchtes, von Gneisen und Schiefergneisen dominiertes Südliches Tavetscher Zwischenmassiv (TZM-S), in welchem die variszischen Strukturen teilweise erhalten blieben, mit festeren geotechnisch günstigeren Gesteinen.

Der Schacht des Zwischenangriffes Sedrun wurde bewusst im südlichen und damit bautechnisch relativ günstigen Bereich des Tavetscher Zwischenmassivs positioniert.

5.3 Geologische Verhältnisse im Schacht

Der Schacht durchfuhr hauptsächlich feste, plattige bis grob gebankte Biotit-Muskovitgneise, die oft auffallende quer zur Schieferung angeordnete Hellglimmerpakete führen (sogenannte Quer-Muskovitgneise). Neben geringmächtigen schiefrigen Einschaltungen wurde zwischen Sm 130–240 auch eine Serie angetroffen, die neben reichlich Chlorit/Biotit-Serizitschiefern auch phyllitische Lagen führte und von mehreren verlehnten Störungen (Kakiriten) durchzogen war.

Untergeordnet vorkommende Gesteinstypen waren Linsen aus Pegmatit und ultrabasische Linsen (Ofensteine), die randlich von Talkschiefern begrenzt waren, sowie seltener, basische, hornblendeführende Gneise. Ein petrographisch auffällender, etwa 4–5 m mächtiger Gesteinszug durchsetzte den Schacht zwischen Sm 531 und 560. Das helle felsitische Gestein zeigt im Dünnschliff idiomorphe Quarzeinsprenglinge und leistenförmige Plagioklase, Mineralausbildungen wie sie für Quarzporphyre (subvulkanische Gänge) typisch sind.

Die alpine Hauptschieferung fällt steil gegen SSE (Mittelwert Fallazimut/Fallen: 157/75) und schneidet daher den Schacht sehr spitzwinklig. Daneben ist eine variszische Schieferung erhalten. Diese fällt etwas flacher gegen SE ein (Mittelwert: 142/68). Im unteren Schachtteil dominierten diese variszischen Strukturen streckenweise und das Gestein war in diesem Bereich oft gefältelt.

Die Lage der Kluftflächen streut sehr stark. Anhand der Dichteverteilung der Flächenpole in der stereographischen Projektion wurden 5 Kluftsysteme ausgeschieden. Vier davon stehen steil, eines fällt mittelsteil bis flach gegen Westen ein.

Geringmächtige (< 10 cm), verlehnte, kakiritische Störungen traten wiederholt auf. Daneben wurde bei Sm 181 auch eine Zone mit kakiritisierten Schiefern von bis 3 m Mächtigkeit angetroffen, die von verlehnten Kakiriten begleitet war.

Die Durchtrennung des Gebirges wird im wesentlichen durch die Schieferungsflächen bestimmt. In den dominierenden Gneisen reicht die Spannweite von plattig bis grob gebankt. Der Anteil an schiefrigen Gneisen beträgt rund 10%.

5.4 Bauvorgang Schacht Sedrun

Zunächst wurde der 78 m tiefe Vorschacht mit Sprengvortrieb erstellt. Als Fördermittel war in dieser Phase nur der Notförderkorb in Betrieb. Danach wurden die 5-geschossige und 85 t schwere Abteufbühne sowie die Kübelwinde (2 Kübel à 6 m³, Traglast max. 20 t, $v_{\max} = 11$ m/sec) installiert. Die Windeninstallationen, Umschlagsilo und Schachtklappen sind am Schachtkopf untergebracht.

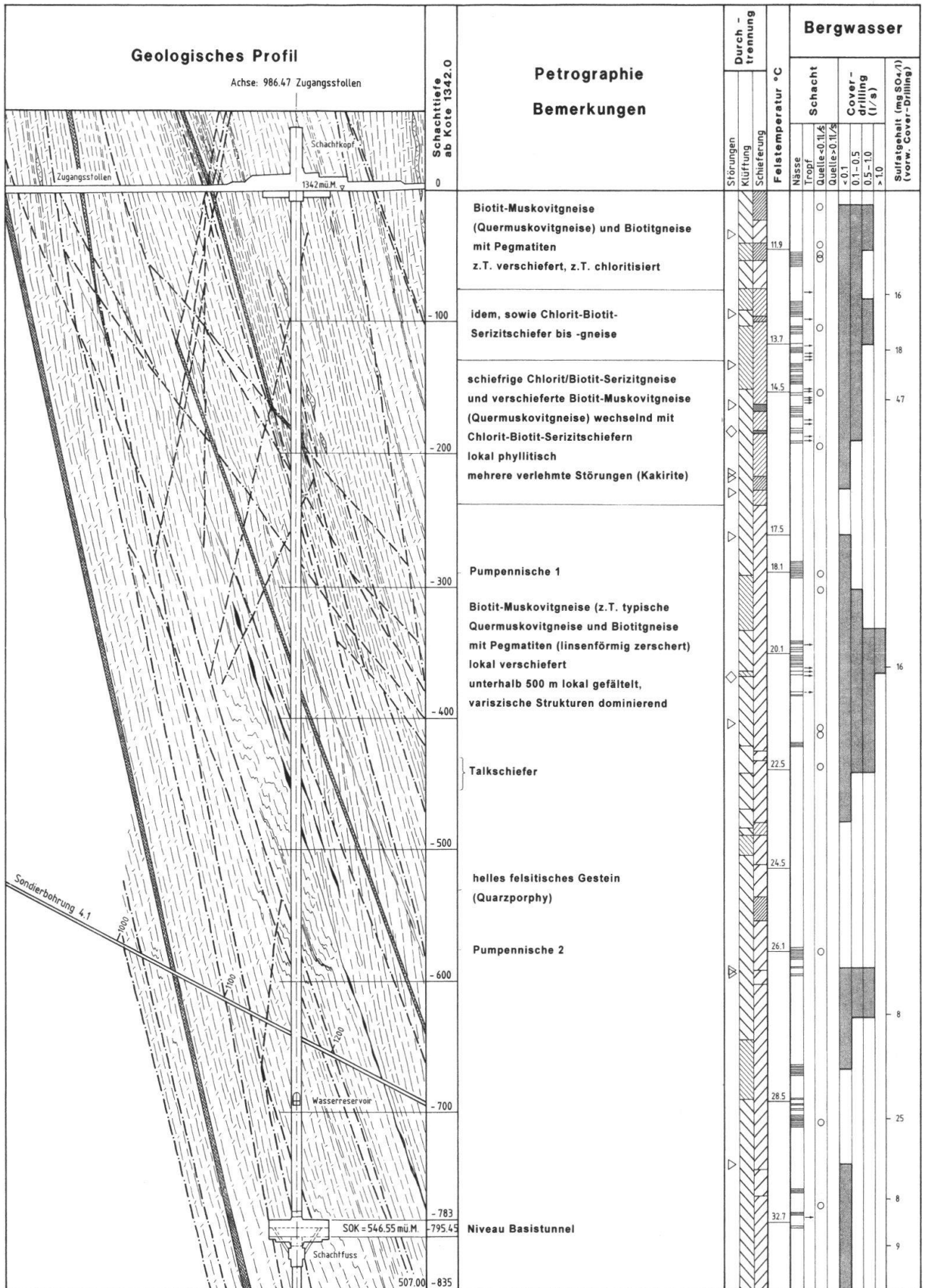


Fig. 7: Geologisches Befundprofil Schacht Sedrun.

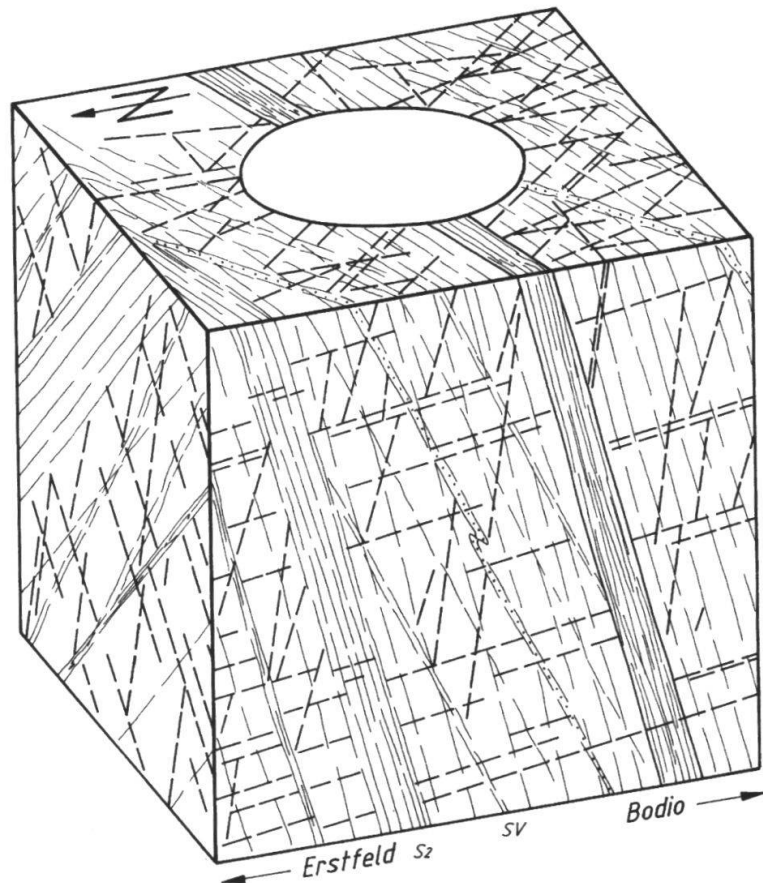


Fig. 8: Schematische Darstellung der Durchtrennung des Gebirgskörpers; s_v = variszische Schieferung, s_2 = alpine Schieferung.

Die durchschnittlich ca. 3 m langen Abschlüge wurden für den Hauptschacht mit einem speziellen 6-armigen pneumatisch betriebenen Schachtbohrjumbo gebohrt. Nach erfolgter Sprengung (spez. Sprengstoffverbrauch $3.5 - 4.0 \text{ kg/m}^3$) wurden etwa 80% des Ausbruchmaterials mit einem Kaktusgreifer in die Kübel geschuttet und zum Schachtkopf transportiert. Als nächster Arbeitsgang folgte die primäre Felssicherung mit einer systematischen Verankerung mit 3 m Swellexankern sowie 5–10 cm Spritzbeton (B35/25, Frühfestigkeit 7 N/mm^2 nach 7 Std.) mit teilweiser Netzarmierung. Nach erfolgter Felssicherung wurde das restliche Ausbruchmaterial geschuttet, sowie die Reinigung der Schachtsohle mittels Druckluft vor dem Bohren des nächsten Abschlages durchgeführt.

Parallel zu den Arbeiten auf der Schachtsohle wurden ab der Abteufbühne in ca. 20 m Abstand der 25–30 cm starke, unarmierte Betoninnenring (B40/30) eingebracht sowie alle Infrastrukturleitungen nachgezogen. Sowohl Spritzbeton als auch Ortsbeton wurden in Falleitungen zum Einbauort transportiert.

5.5 «Cover drill» mit Injektionen Schacht Sedrun

5.5.1. Übersicht

Um Bergwasser möglichst vom Schacht fernzuhalten, wurden alle 36 m systematische Vorausbohrungen (sogenanntes «Cover drill») mit einer Länge von 42 m erstellt. Die 8 Bohrungen sind 10° zur Vertikalen und fächerförmig ausgeführt. Bei Antreffen von Wasser wurde das Gebirge mittels Zementinjektionen abgedichtet.

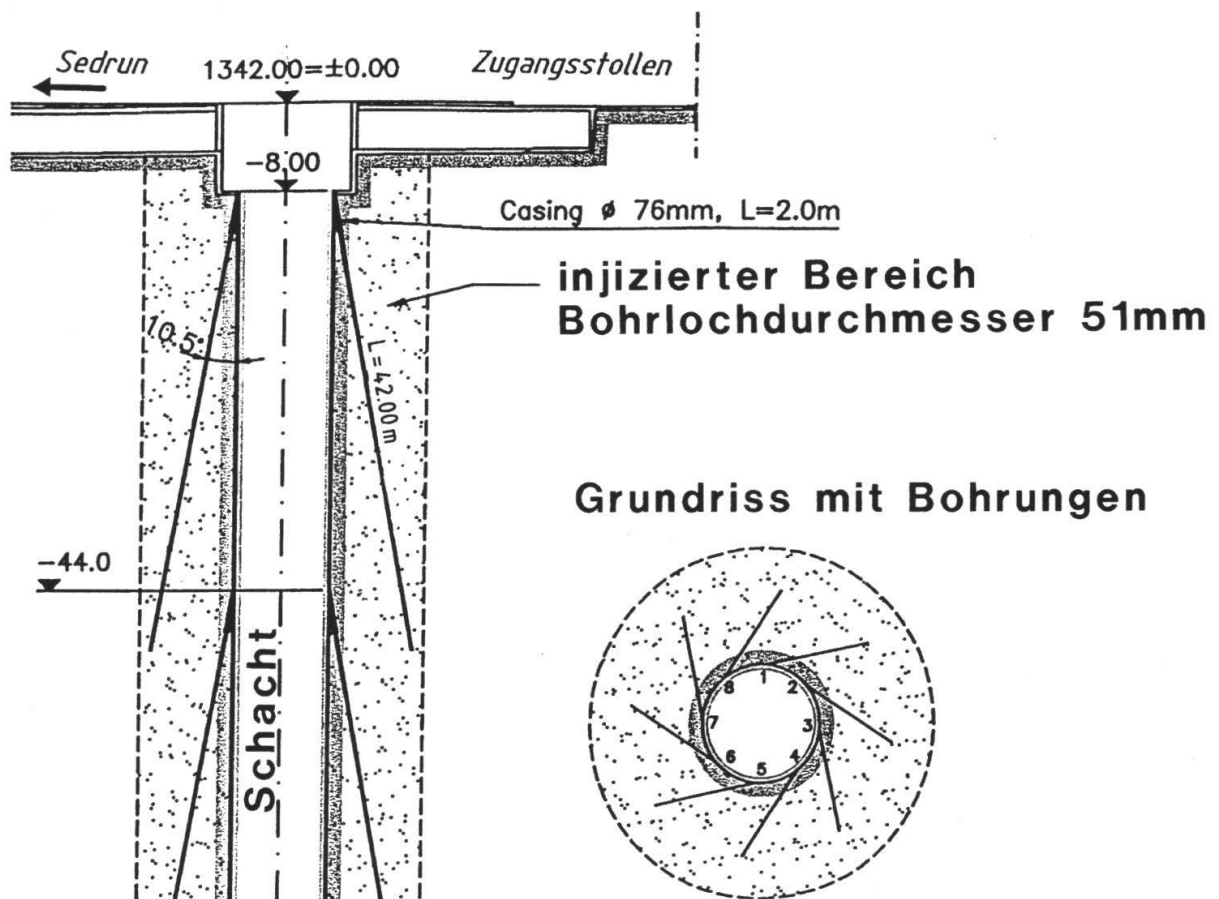


Fig. 9: Schematische Darstellung Cover drill (Quelle IG-GBTS).

5.5.2 Vorgehen bei der Injektion

Das Vorgehen bei den Injektionsarbeiten war sehr einfach: war die Vorausbohrung wasserführend, wurde injiziert, waren die Bohrungen trocken, so wurden keine Injektionen ausgeführt. Die Fig. 10 zeigt beide Fälle, wobei die Bohrungen der Etappe J 9 von allen Etappen am meisten Wasser führte. Grund war eine weiter unten in den Schacht eintretende Störung, die bereits beim Auffahren des Zugangsstollen Wasser führte.

Die Bergwassermengen, die mit den ersten acht Vorausbohrungen ($\varnothing=51$ mm) einer Cover drill Etappe angebohrt wurde, schwankte zwischen 0 und 4.2 l/s. Die wasserführenden Vorausbohrungen wurden mit Zement ausinjiziert, um das angegriffene Bergwasser vom Schachtbereich fernzuhalten. Das Einpressen des Zementes erfolgte im Allgemeinen als Wasser-Zementsuspension jeweils über die gesamte Bohrlochlänge von 42 m. In den Etappen J0 bis J10 wurden dünnflüssige Suspensionen mit Wasser-Zementwerten von 5 : 1 bis 10 : 1 eingesetzt. Ab J11 wurde der Zementanteil erhöht (Verhältnis von 3 : 2 bis 1 : 1). Zementsorten und Mischverhältnis wurde aufgrund von Versuchen bezüglich der Abbindezeit festgelegt.

Der Injektionsdruck lag zwischen 20 und 130 bar. Die hohen Drücke am Ende einer Injektionsetappe wurden für das Verpressen des Bohrloches selbst (sealing) aufgebracht.

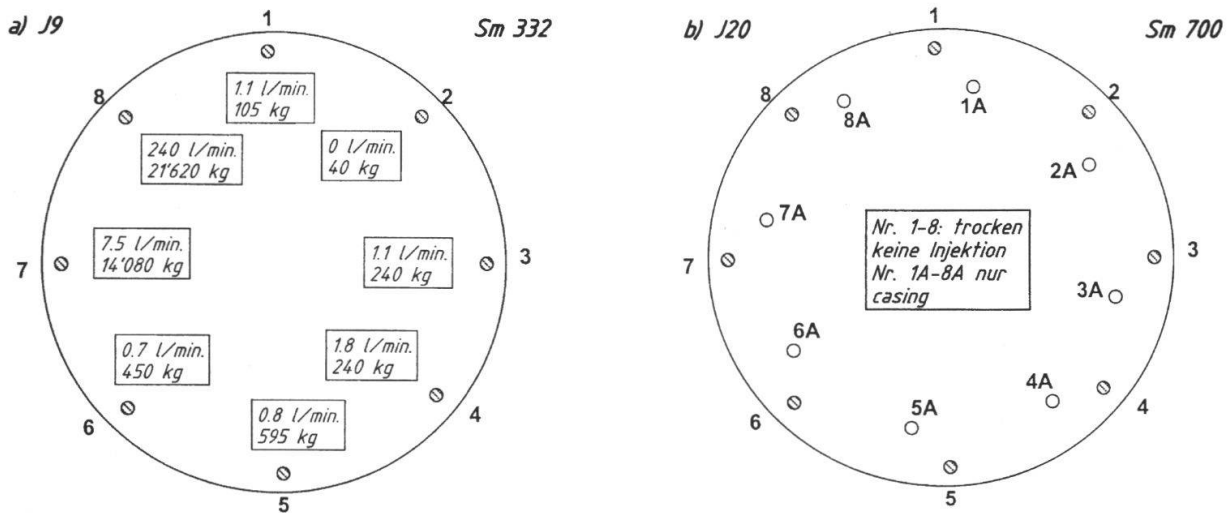


Fig. 10: Wasserführung der Cover drill Etappen J 9 und J 20 mit Wasserführung und injizierten Mengen.

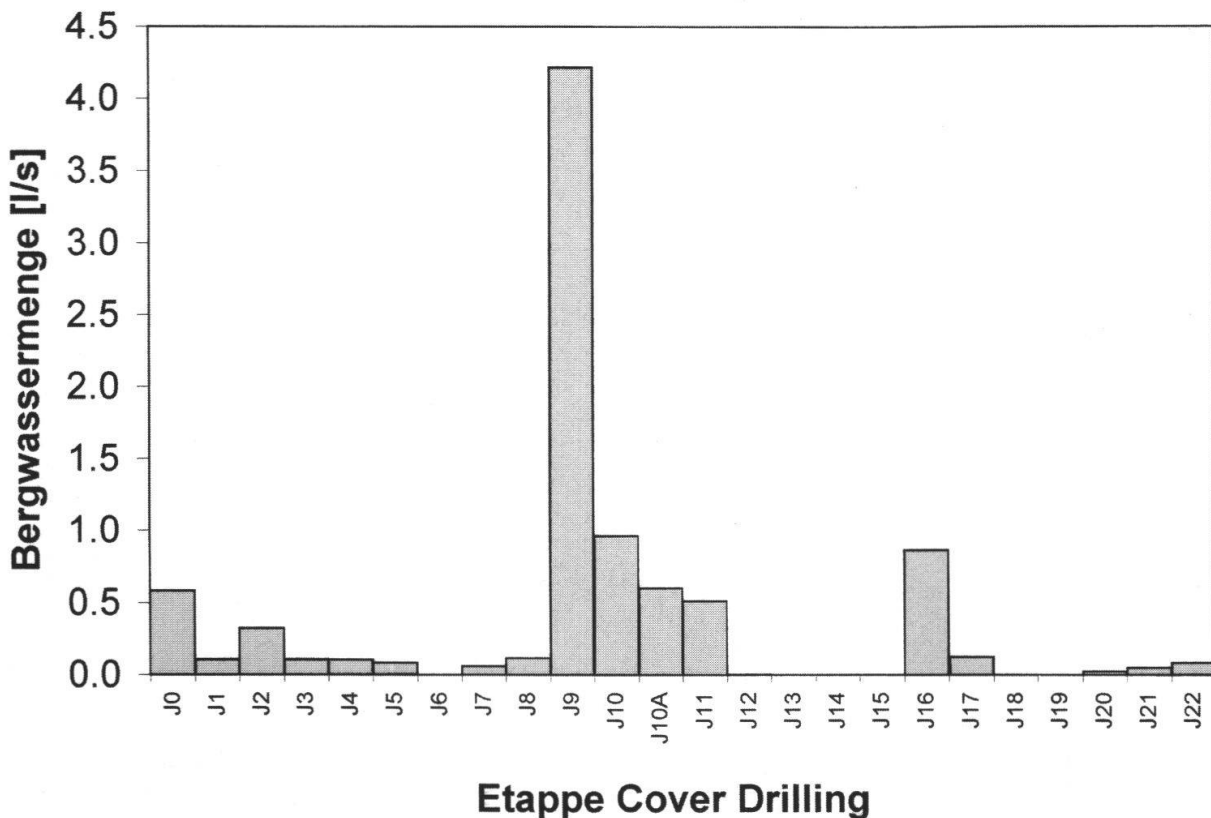


Fig. 11: Bergwasseranfall in den einzelnen Etappen der Cover drill Bohrungen.

Mit Ausnahme der Etappen J 9 bis J11 wurden die Injektionsarbeiten ohne besondere Vorkommnisse durchgeführt. Aus den Cover Drill Etappen J9 bis J11 (vgl. Fig. 11) stammen über 60 % der Bergwassermenge. Das Bergwasser fließt offensichtlich entlang der dort vorkommenden grösseren verlehmtten Störung respektive in deren Begleitgestein. Diese durchquert den Schacht zwischen Sm 368 und 390. Die Störung setzt sich gegen oben bis in den Zugangsstollen Tm 840 fort, wo ebenfalls mehrere Kluftquellen angetroffen wurden. Der in J9 gemessene Druck von 30 bar entspricht ca. der Wassersäule bis Kote Zugangsstollen. Ein Färbversuch in J10

bestätigte zudem die hydraulische Verbindung zum Zugangsstollen, in welchem gefärbtes Wasser festgestellt wurde. Eine Veränderung der Wasserführung der Quellen im Zugangsstollen während den Abteufarbeiten im Schacht konnte jedoch nicht beobachtet werden.

Trotz dem Einsatz von 1250 kg Acryl in der Etappe J10 war die Abdichtung ungenügend, so dass eine zusätzliche Etappe J10a ausgeführt wurde. In dieser wurden 8100 kg Zement, 100 kg PU und 2450 kg Acryl injiziert.

In der Etappe J10A stieg das Injektionsgut entlang des verlehmtten Kakirites hinter der nördlichen Schachtwand hoch und es kam dort unmittelbar über der Teufsohle bei einem Druck von 80–90 bar zum Zerbrechen (hydro-fracturing) von Gesteinsplatten. Das Vorgehen wurde in der Folge der Situation im Schacht angepasst. Um Umläufigkeiten zu verhindern, wurden in den folgenden Etappen zusätzliche Casingrohre in einem inneren Ring versetzt, um nötigenfalls mit zusätzlichen Bohrungen einen dichten Ring unter der Schachtsohle erzeugen zu können. Das war in der Etappe J11 bei 5 Bohrungen der Fall.

5.5.3 Bergwasseranfall beim anschliessenden Abteufen

Wie die Fig. 7 zeigt beschränkten sich die Bergwassereintritte auf kleine Quellen < 0.1 l/s, Feucht- und Tropfstellen. Jene Abschnitte, die bereits in den Cover drills stärker Wasser führten wiesen auch beim Abteufen etwas erhöhte Wasserführung auf (Störung Sm 340–370). In den restlichen Schachtabschnitten war das Bergwasser ausschliesslich an Einzelklüfte oder sehr geringmächtige Schieferhorizonte gebunden.

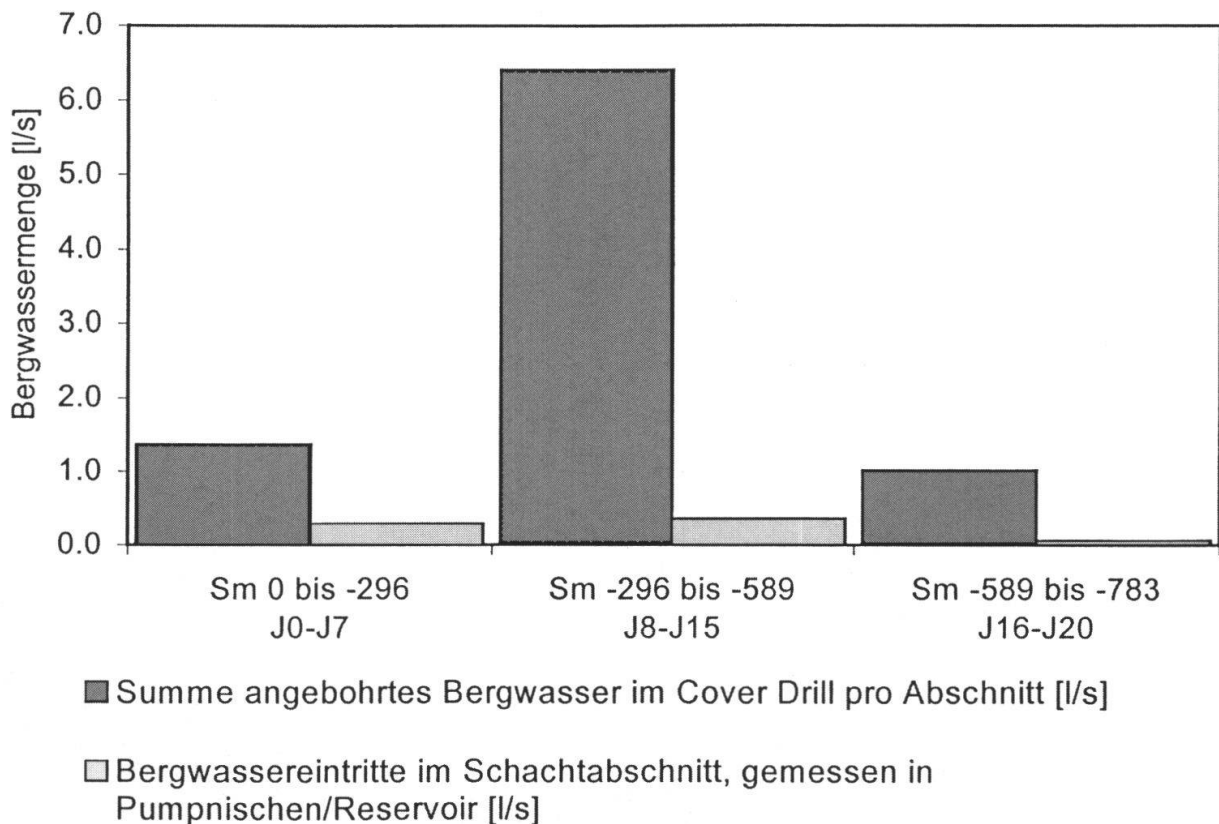


Fig. 12: Vergleich der Bergwassermengen in den Cover drills mit jenen im Schacht.

Der Vergleich der Bergwassermengen in den Cover drills mit jenen in den entsprechenden Schachtabschnitten zeigt, dass die Unternehmervariante zum Erfolg geführt hat. Die anfallende Gesamtwassermenge lag immer unter 0.5 l/s. eine Messung am 6.2.2001 ergab eine Gesamtwassermenge von 0.32 l/s.

5.5.4 Zusammenfassende Schlussfolgerung

Obwohl das Vorgehen bei den Injektionen im Schacht Sedrun einfach und in keiner Weise sophisticated gesteuert war, erwies es sich als zweckmässig und führte zum Erfolg. Selbst wenn man Umläufigkeiten, d.h. ein mehrfaches Anfahren der gleichen wasserführenden Zonen in Betracht zieht, reduzierte sich die anfallende Wassermenge auf höchstens 10%. Es muss aber nochmals betont werden, dass es sich beim Schacht Sedrun um eine spezielle Situation handelte, welche den hohen Aufwand und die Arbeitsunterbrüche für die Injektionen rechtfertigte. Bei einem normalen tiefliegenden Tunnel werden Injektionen die Ausnahme bleiben. Gerade im Teilabschnitt Sedrun ist aber am ehesten mit weiteren Injektionen im Zuge der Hauptvortriebe zu rechnen und zwar sowohl um das Gebirge zu verbessern, wie auch um das Bergwasser zu verdrängen.

Verdankungen

Der Autor dankt dem Schulungszentrum TFB, Wildegg sowie den Herren P. Zbinden, Vorsitzender der Geschäftsleitung AlpTransit Gotthard AG und R. Suter, Leiter Kommunikation ATG, für die Erlaubnis diesen Artikel zu drucken und die Unterlagen und Berichte der ATG AG zu verwenden.

Die Grundlagen für die Publikation stammen teilweise aus Berichten der beiden mit der Projektierung des Gotthard-Basistunnels beauftragten Ingenieurgemeinschaften: IG-GBTN (Gähler und Partner AG, Gruner AG, Rothpletz + Lienhard AG, CES AG) und IG-GBTS (Electrowatt Engineering AG, Amberg Ingenieurbüro AG, Lombardi SA).

Die Daten und Figuren des Kapitels 5 stammen grösstenteils aus dem gemeinsam mit Dr. P. Guntli (SC + H, Chur) verfassten geologischen Schlussbericht zum Bau des Schachtes Sedrun.

Literatur

- AMBERG, R. 1994: Die Bewältigung der Serpentinzone in der Zweispurstrecke Vereinatunnel Nord, Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 44.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) 1998: Grundwasserschutz bei Tunnelbauten, Grundlagenbericht, Schriftenreihe Umwelt Nr. 231.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) 1998: Wegleitung zur Umsetzung des Grundwasserschutzes bei Untertagebauten.
- CHIAVERIO, F., ROTZLER, R., UNRATH, P. & WIELAND C. 2000: Adlertunnel, das Projekt und die Bauausführung, tec 21 Nr. 49–50.
- ECKARDT, P.M., FUNK, H. & LABHART, T.P. 1983: Postglaziale Krustenbewegungen an der Rhein-Rhone-Linie; Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 2/83.
- FREI, B. 1999: Geologie, Hydrogeologie und Geotechnik im Gebiet der Alp Caschlè, Sedrun (GR), unveröffentlichte Diplomarbeit ETH-Z.
- FREI, B. & LÖW, S. 2001: Störzonen im südlichen Aarmassiv. Eclogae geol. Helv. 94/1, 13–28.

- KELLER, F. 1999: Geologie und Geotechnik im Aar-Massiv und Tavetscher Zwischenmassiv Nord. In: LÖW, S. & WYSS, R. (eds.): Vorerkundung und Prognose der Basistunnel am Gotthard und am Lötschberg, A.A. Balkema, Rotterdam.
- KLEMENZ, W., EHRMINGER, B., GILBY, D. & LÖW, S. 1999: Hydrogeologische Prognose Gotthardtunnel. In: LÖW, S. & WYSS, R. (eds.): Vorerkundung und Prognose der Basistunnel am Gotthard und am Lötschberg, A.A. Balkema, Rotterdam.
- KONIETZKY, H; HART, R. & BILLAUX, D. 1994: Mathematische Modellierung von geklüftetem Fels. Felsbau 12, 6.
- LABHART, T.P. 1977: Aarmassiv und Gotthardmasiv. Sammlung geologischer Führer, Band 63; Bornträger, Berlin, Stuttgart.
- LABHART, T.P. 1999: Aarmassiv, Gotthardmassiv und Tavetscher Zwischenmassiv: Aufbau und Entstehungsgeschichte. In: LÖW, S. & WYSS, R. (eds.): Vorerkundung und Prognose der Basistunnel am Gotthard und am Lötschberg, A.A. Balkema, Rotterdam.
- LOMBARDI, G. 1999: Tassements de massifs rocheux au-dessus de tunnel. In: LÖW, S. & WYSS, R. (eds.): Vorerkundung und Prognose der Basistunnel am Gotthard und am Lötschberg, A.A. Balkema, Rotterdam.
- LOMBARDI, G. 1988: Les tassements exceptionnel au barrage de Zeuzier. Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches, N 118.
- LÖW, S, ZIEGLER H.-J. & KELLER, F. 2000: Alptransit: Engineering geology of the world's longest tunnel system; GeoEng 2000 Melbourne, Volume 1, Technomic Publishing Co, Basel.
- SABARLY, F. 1968: Les injections et les drainages de fondation de barrages; Géotechnique.
- SCHNEIDER, T.R. 1984: Geologischer Schlussbericht Seelisbergtunnel, Zusammenfassung; Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, 65.
- ZETTLER, A.H., REICHL, I. & POISEL, R. 1998: Injektionssteuerung auf der Basis von Feld- und Modellversuchen. Mitteilungen für Ingenieurgeologie und Geomechnik, Band I. Technische Universität Wien, Institut für Ingenieurgeologie.