

# Lötschberg-Basistunnel – zusammenfassender geologischer Schlussbericht



Berichte der Landesgeologie  
Rapports du Service géologique national  
Rapporti del Servizio geologico nazionale  
Reports of the Swiss Geological Survey

Hans-Jakob Ziegler und Alfred Isler



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Verteidigung,  
Bevölkerungsschutz und Sport VBS  
armasuisse

**Bundesamt für Landestopografie swisstopo**

# Lötschberg-Basistunnel – zusammenfassender geologischer Schlussbericht

Berichte der Landesgeologie  
Rapports du Service géologique national  
Rapporti del Servizio geologico nazionale  
Reports of the Swiss Geological Survey

Hans-Jakob Ziegler und Alfred Isler



**Herausgeber**

Landesgeologie

**Empfehlung für die Angabe in einem Literaturverzeichnis**

ZIEGLER, H.-J. & ISLER, A. (2013): Lötschberg-Basistunnel – zusammenfassender geologischer Schlussbericht. – Ber. Landesgeol. 4.

**Umschlagfoto**

© Geologengruppe Lötschberg-Basistunnel

**Auflage**

1500 Expl.

Erhältlich bei swisstopo, Seftigenstrasse 264, CH-3084 Wabern

**Copyright**

© swisstopo, CH-Wabern, 2013

ISSN 1661-9285

ISBN 978-3-302-40085-3



MIX  
Papier  
FSC FSC® C030149

## Vorwort des Herausgebers

Die Neue Alpentransversale NEAT ist wohl als das Jahrhundertprojekt im schweizerischen Alpenraum zu betrachten. Noch nie wurde in den Alpen eine so lange Tunnelstrecke mit einer derart mächtigen Gebirgsüberlagerung realisiert. Der rund 34,5 Kilometer lange Lötschberg-Basistunnel führt von Frutigen im Kandertal (Kanton Bern) nach Raron im Rhonetal (Kanton Wallis) und bildet zusammen mit dem Simplontunnel den westlichen Ast der Neuen Alpentransversalen in der Schweiz.

Geologische Detailkenntnisse über die Beschaffenheit des Untergrundes sind eine zwingende Voraussetzung für die Planung und den Bau grosser Infrastrukturanlagen. Mit dem Vortrieb des Lötschberg-Basistunnels wurde im Juli 2000 in Mitholz begonnen. Insgesamt betrug die Dauer der reinen Ausbrucharbeiten im gesamten Basistunnel knapp 5 Jahre. Der Ausbruch erfolgte teils konventionell im Sprengvortrieb, teils maschinell mit Tunnelbohrmaschinen. Bei der Wahl der Vortriebsmethode wurden unter anderem auch die im Geologischen Bericht der Landeshydrologie und -geologie Nr. 22 (KELLERHALS & ISLER 1998) publizierten geologischen Voruntersuchungen und Prognosen berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass die Prognose – von der unerwarteten Sedimentmulde mit Karbon abgesehen – insgesamt sehr präzise war und dass dort, wo Abweichungen bestanden, diese meistens nicht zu Ungunsten des Projektes ausfielen. Als sehr wichtiger Faktor für das Gebirgsverhalten haben sich die Lage und die Ausbildung der Makrostrukturen (Schieferungs-, Klüftflächen usw.) herausgestellt. Nach wie vor dürfte die Wasserprognose wohl einer der schwierigsten

Aspekte einer geologischen Tunnelprognose sein. Aus den dargelegten Untersuchungen ergeben sich neue Erkenntnisse über den Tiefgang der quartären Tröge im Kander- und im Gasteretal und die in ihrer Lockergesteinsfüllung herrschenden hydrogeologischen Verhältnisse. Weiter wurden wichtige Resultate über die tektonischen Verhältnisse innerhalb des Deckenstapels des Helvetikums mit den verschiedenen Flyscheinheiten erarbeitet. Bedeutende Aussagen konnten auch über das Aar-Massiv, seine autochthone Bedeckung sowie den Jungfrau-Keil gemacht werden. Schliesslich wurden viele Erfahrungen mit den Sicherungsmassnahmen im Sprengvortrieb sowie mit Tunnelbohrmaschinen gesammelt.

Die drei Geologiebüros Kellerhals + Haefeli AG in Bern, Geotechnisches Institut AG in Spiez und Odilo Schmid + Partner AG in Brig haben die geologische Begleitung des Tunnelbaus in direktem Auftrag des Bauherrn, der BLS AlpTransit AG, ausgeführt. Alle im vorliegenden Bericht vorgestellten Resultate wurden von den erwähnten Büros gemeinsam erarbeitet. Die beiden Autoren Hans-Jakob Ziegler und Alfred Isler stellten die zu publizierenden Teilergebnisse zusammen und verfassten den dazugehörigen Text. Es ist uns ein wichtiges Anliegen, der Unternehmensleitung der BLS AlpTransit AG und den beiden Autoren herzlich zu danken.

Für den Inhalt des Textes, der Illustrationen und der Beilagen sind die Autoren allein verantwortlich.

Olivier Lateltin  
Leiter Landesgeologie

## Préface de l'éditeur

La construction des nouvelles transversales alpines NEAT peut être considérée comme le projet du siècle dans l'espace alpin suisse. Jusqu'à ce jour, aucun tronçon de tunnel aussi long n'avait été réalisé dans les Alpes sous une couverture rocheuse aussi importante. Le tunnel de base du Lötschberg, d'une longueur de 34,5 kilomètres, relie Frutigen dans le Kandertal (canton de Berne) à Rarogne dans la vallée du Rhône (canton du Valais) et constitue avec le tunnel du Simplon l'axe occidental des nouvelles transversales alpines en Suisse.

La conception et la construction de grands ouvrages ont impérativement besoin d'informations détaillées sur les propriétés géologiques du sous-sol. Le creusement du tunnel de base du Lötschberg a débuté à Mitholz en juillet 2000. La durée des travaux d'excavation s'est étendue pour l'ensemble du tunnel de base sur une période d'environ 5 ans. L'excavation a été réalisée en partie de façon conventionnelle à l'explosif et également à l'aide de tunneliers. Le choix de la méthode d'excavation a été fortement influencé par les travaux préliminaires et prévisionnels publiés dans le Rapport géologique du Service hydrologique et géologique national Nr. 22 (KELLERHALS & ISLER 1998).

A l'exception de la présence inattendue de sédiments carbonifères, le profil prévisionnel s'est avéré très précis et les surprises géologiques ne sont pas révélées défavorables pour le projet. La position et la nature des macrostructures (schistosité, surfaces fracturées etc.) ont constitué un facteur déterminant du comportement rocheux du massif. La prévision des circulations d'eau dans le massif rocheux a été

un défi majeur du profil prévisionnel géologique. Les investigations ont apporté des informations nouvelles sur la profondeur des surcreusements glaciaires dans le Kandertal et le Gasteretal ainsi que sur les conditions hydrogéologiques des remplissages quaternaires. Elles ont également permis de mieux déchiffrer la structure tectonique complexe des nappes helvétiques et leur imbrication dans les différentes unités de flysch. Par ailleurs, des connaissances nouvelles ont pu être acquises sur le massif de l'Aar, sa couverture autochtone et la zone écaillée de la Jungfrau. Enfin, une grande expérience a été accumulée sur les mesures de sécurité lors de l'excavation à l'explosif ou au tunnelier.

Les trois bureaux de géologues Kellerhals+Haefeli AG à Berne, Geotechnisches Institut AG à Spiez et Odilo Schmid+Partner AG à Brigue ont accompagné les travaux de réalisation du tunnel, sous mandat du maître d'ouvrage BLS AlpTransit AG. L'ensemble des résultats présentés dans ce rapport a été établi par ces bureaux. Les deux auteurs Hans-Jakob Ziegler et Alfred Isler se sont chargés de la collecte de ces résultats partiels et de la rédaction du texte d'accompagnement. Nous profitons de cette occasion pour témoigner à la direction des travaux BLS AlpTransit AG et aux deux auteurs notre profonde reconnaissance pour leur précieuse collaboration.

Les auteurs sont seuls responsables du contenu du texte, des illustrations et des annexes.

Olivier Lateltin  
Responsable du Service géologique national

## Prefazione dell'editore

La costruzione delle nuove trasversali alpine NEAT può essere considerata come il progetto del secolo nello spazio alpino svizzero. Sino ad oggi, nessun tratto di galleria altrettanto lungo era stato realizzato nelle Alpi sotto una copertura rocciosa così importante. Il tunnel di base del Lötschberg, con una lunghezza di 34,5 chilometri, congiunge Frutigen nella Kandertal (Canton Berna) a Raron nella valle del Rodano (Canton Vallese) e, insieme alla galleria del Sempione, costituisce l'asse occidentale delle nuove trasversali alpine svizzere.

La concezione e la costruzione di grandi opere necessitano imperativamente di informazioni dettagliate sulle proprietà geologiche del sottosuolo. La perforazione del tunnel di base del Lötschberg è iniziata a Mitholz nel luglio del 2000. La durata dei lavori di scavo per l'insieme del tunnel di base si è protratta per un periodo di circa 5 anni. Lo scavo è stato realizzato sia in modo convenzionale con l'esplosivo che con l'ausilio di frese meccaniche a piena sezione. La scelta del metodo di perforazione è ampiamente influenzata dai lavori preliminari e previsionali pubblicati nel Rapporto geologico del Servizio idrologico e geologico nazionale Nr. 22 (KELLERHALS & ISLER 1998).

Eccetto la presenza inaspettata di sedimenti carboniferi, il profilo geologico previsto si è dimostrato preciso e le sorprese non si sono rivelate sfavorevoli al progetto. La posizione e la natura delle macrostrutture (scistosità, superfici fratturate ecc.) sono state determinanti per il comportamento roccioso del massiccio. La previsione delle circolazioni d'acqua del massiccio roccioso è stata una sfida maggiore

rispetto alla realizzazione del profilo geologico previsionale. Le indagini hanno fornito nuove informazioni sulla profondità delle sovraescavazioni glaciali nella Kandertal e nella Gasteretal e sulle condizioni idrogeologiche dei riempimenti quaternari. Esse hanno permesso inoltre di decifrare con maggiore precisione la struttura tettonica complessa delle falde elvetiche e il loro intreccio con le diverse unità di flysch. Sono infatti state acquisite nuove conoscenze sul massiccio dell'Aar, sul suo ricoprimento autoctono e sulla zona a scaglie della Jungfrau. Infine, è stata accumulata una grande esperienza sulle misure di sicurezza da adottare in caso di scavo con l'esplosivo o con la fresa meccanica a piena sezione.

I tre studi di geologia Kellerhals+Haefeli AG a Berna, Geotechnisches Institut AG a Spiez e Odilo Schmid+Partner AG a Briga hanno accompagnato i lavori di realizzazione del tunnel, su mandato della committenza BLS AlpTransit AG. I risultati presentati in questo rapporto sono stati forniti dagli studi summenzionati. I due autori Hans-Jakob Ziegler e Alfred Isler si sono occupati della raccolta dei risultati parziali e della stesura del testo di accompagnamento. Cogliamo l'occasione per rivolgere alla direzione lavori BLS AlpTransit AG e ai due autori la nostra profonda riconoscenza per la preziosa collaborazione.

Gli autori sono unici responsabili del contenuto del testo, delle illustrazioni e degli allegati.

Olivier Lateltin  
Responsabile del Servizio geologico nazionale

## Foreword from the editor

The construction of the new NEAT alpine transversals may be considered as the project of the century within the Swiss Alps. Until today, no other stretch of tunnel of such length and beneath such a thick overburden of mountains has been achieved. The Lötschberg Base Tunnel, with a length of 34.5 kilometers, links Frutigen in the Kander Valley (Canton of Berne) with Raron in the Rhone Valley (Canton of Valais) and, together with the Simplon Tunnel, comprises the western branch of the new alpine transversals in Switzerland.

Detailed information about subsurface geological features is crucial for the design and the building of major infrastructures. Construction of the Lötschberg Base Tunnel began in Mitholz in July 2000. The excavation along the entire length of the base tunnel lasted about 5 years. This work was accomplished through the combined use of conventional explosives and bore machines. The choice of excavation method was strongly influenced by the results of the preliminary work and prognoses, which are published in the Geological Report Nr. 22 of the Swiss Hydrological and Geological Survey (KELLERHALS & ISLER 1998).

With the exception of the unexpected presence of carboniferous sediments, the predicted profile proved to be very accurate, and the geological surprises had no negative impact on the project. The position and the nature of the macrostructures (schistosity, fractured surfaces etc.) were identified as a major factor in the behavior of the massif. Forecasting the circulation of water within the rock mass

was a major challenge in predicting the geological profile. The investigations provided new information on the depth of glaciation in the Kander and the Gastern Valleys as well as on the hydrogeological conditions of the Quaternary fill. They also allowed to better interpret the complex tectonic structure of the Helvetic nappes and the imbrication in various flysch units. In addition, important new knowledge about the Aar massif, its autochthonous cover and the “Jungfrau wedge” was acquired. Finally, experience was gained regarding security measures during excavation with explosives and bore machines.

Under the mandate of the builder BLS AlpTransit AG, the three geological offices Kellerhals+Haefeli AG in Bern, Geotechnisches Institut AG in Spiez and Odilo Schmid+Partner AG in Brig performed the geological supervision during tunnel construction. All the results presented in this report have been prepared by these offices. The two authors Hans-Jakob Ziegler and Alfred Isler are responsible for the collection of these partial results and the drafting of the accompanying text. We take this opportunity to express our deep appreciation for the valuable collaboration of BLS AlpTransit AG and the two authors.

The authors are solely responsible for the content of the text, illustrations and annexes.

Olivier Lateltin  
Head of the Swiss Geological Survey

# Inhaltsverzeichnis

|   |    |   |    |
|---|----|---|----|
| 1. Einleitung .....   | 10 | 5. Geotechnik .....   | 47 |
| 1.1 Beschreibung des Bauwerkes .....  | 10 | 5.1 Gesteinstypen und -kennziffern .....  | 47 |
| 1.2 Organisation der geologischen Baubegleitung .....                               | 11 | 5.2 Konvergenzen .....  | 51 |
| 1.3 Dank .....  | 11 | 5.3 Quellen/Schwellen, Sohlgewölbe .....  | 54 |
| 2. Geologischer Überblick .....   | 12 | 5.4 Bergschlag, Spannungsverhältnisse .....   | 54 |
| 2.1 Durchquerte Einheiten .....   | 13 | 5.5 Wiederverwendbarkeit .....  | 56 |
| 2.2 Änderungen der Trasseeführung .....   | 14 | 6. Übrige Parameter .....   | 58 |
| 3. Tektonische und lithostratigraphische Einheiten .....                            | 15 | 6.1 Gebirgstemperatur .....   | 58 |
| 3.1 Portalzone Nord .....   | 15 | 6.2 Gasführung .....  | 59 |
| 3.2 Helvetischer Deckenstapel inkl. Flysch .....                                    | 15 | 6.3 Radioaktivität .....  | 60 |
| 3.2.1 Taveyannaz-Serie und Flysch unbekannter<br>Herkunft .....                     | 15 | 6.4 Asbest .....  | 62 |
| 3.2.2 Mélange und Schuppen .....  | 15 | 6.5 Rezente Bewegungen .....  | 62 |
| 3.2.3 Wildhorn-Decke .....  | 16 | 6.6 Oberflächendeformation Staumauer Ferden .....   | 63 |
| 3.2.4 Gellihorn-Decke .....   | 16 | 7. Vorauserkundung .....  | 64 |
| 3.2.5 Doldenhorn-Decke .....  | 17 | 7.1 Systematische Vorausbohrungen .....   | 64 |
| 3.3 Aar-Massiv .....  | 18 | 7.1.1 Zerstörende Bohrungen mit dem Bohrjumbo<br>oder einem anderen Bohrgerät .....                                 | 64 |
| 3.3.1 Autochthon nördlich des Gastern-Granits .....                                 | 18 | 7.1.2 Zerstörende Bohrungen mit dem Bohrjumbo<br>oder einem anderen Bohrgerät und<br>einfacher Gestängebremse ..... | 65 |
| 3.3.2 Lauterbrunnen-Kristallin .....  | 20 | 7.1.3 Zerstörende Bohrung ab TBM .....  | 65 |
| 3.3.3 Gastern-Granit .....  | 21 | 7.1.4 «Packerbohrungen» .....   | 66 |
| 3.3.4 Autochthon zwischen Gastern-Granit<br>und Lötschental .....                   | 22 | 7.2 Vorauserkundung des Karsts .....  | 66 |
| 3.3.5 Altkristallin südlich des Gastern-Granits .....                               | 26 | 7.3 Vorauserkundung Trias Raron .....   | 68 |
| 3.3.6 Zentraler Aare-Granit .....   | 28 | 7.4 Vorauserkundung Sedimenteinschuppungen/<br>Jungfrau keil .....  | 69 |
| 3.3.7 Baltschieder-Granodiorit .....  | 29 | 7.5 Vorauserkundung Karbon/Kristallin .....   | 69 |
| 3.3.8 Autochthon südlich des Zentralen<br>Aare-Granits .....                        | 30 | 7.6 Vorauserkundung Phyllitzone Dornbach, Karbon<br>von Ferden und Phyllitzone Faldumbach .....                     | 70 |
| 3.4 Portalzone Süd .....  | 31 | 7.7 Vorauserkundung bei Spezialfragen .....   | 71 |
| 3.5 Trennflächen im Basistunnel .....   | 31 | 7.7.1 Tastbohrungen .....   | 71 |
| 3.5.1 Trennflächen in der Wildhorn-Decke .....                                      | 31 | 7.7.2 Drainagebohrungen .....   | 71 |
| 3.5.2 Trennflächen in der Doldenhorn-Decke .....                                    | 33 | 8. Besondere Massnahmen .....   | 72 |
| 3.5.3 Trennflächen im Kristallin .....  | 33 | 8.1 Querung der Bergstrecke in Frutigen .....   | 72 |
| 3.5.4 Trennflächen im Autochthon Gampel-<br>Baltschieder .....                      | 34 | 8.2 Abdichtungsinjektionen .....  | 75 |
| 3.6 Vergleich Prognose-Befund .....   | 34 | 8.2.1 Karst bei km 26 .....   | 75 |
| 3.6.1 Einleitung .....  | 34 | 8.2.2 Sedimenteinschuppungen / Jungfrau keil .....  | 76 |
| 3.6.2 Lithologie .....  | 35 | 8.3 Querung des Karbons von Ferden .....  | 78 |
| 3.6.3 Störungen und Kluftzonen .....  | 36 | 8.4 Querung der Phyllitzone Dornbach .....  | 79 |
| 4. Hydrogeologie .....  | 37 | 8.5 Trias Raron .....   | 80 |
| 4.1 Wasserführung, Wasserdrücke und Fliesspfade<br>in den einzelnen Einheiten ..... | 37 | 9. Besondere Vorkommnisse .....   | 81 |
| 4.1.1 Gesamtwasserführung auf der Nordseite .....                                   | 37 | 9.1 Karbontrog nördlich des Gastern-Granits .....   | 81 |
| 4.1.2 Einzelwasserzutritte auf der Nordseite .....                                  | 37 | 9.2 Setzungen St. German .....  | 81 |
| 4.1.3 Wasserzutritte im Dienststollen<br>(Sondierstollen) .....                     | 39 | 10. Erfahrungen .....   | 85 |
| 4.1.4 Einzelwasserzutritte im Bereich Ferden .....                                  | 39 | 10.1 Allgemein .....  | 85 |
| 4.1.5 Einzelwasserzutritte auf der Südseite .....                                   | 40 | 10.2 Sprengvortrieb .....   | 85 |
| 4.1.6 Gesamtwasserführung auf der Südseite .....                                    | 42 | 10.3 TBM-Vortrieb .....   | 86 |
| 4.2 Wasserchemie .....  | 42 | 10.4 Blockbildungen in der Brust im TBM-Vortrieb .....  | 88 |
| 4.3 Wasserfassungen .....   | 44 | 11. Mineral- und Fossilfunde .....  | 89 |
| 4.4 Versinterung .....  | 45 | 12. Dokumentation .....   | 91 |
| 4.5 Quellmessungen und Beeinträchtigungen .....                                     | 45 | 12.1 Daten, Berichte .....  | 91 |
| 4.6 Vergleich Prognose-Befund .....   | 46 | 12.2 Handstücksammlungen, archivierte Bohrkerne .....   | 91 |

## Verzeichnis der Textfiguren, Tabellen und Tafeln

### Textfiguren

|   |    |  |    |
|---|----|--|----|
| Fig. 1-1: Vortriebsschema des Lötschberg-Basistunnels mit Ausbruchmethoden . . . . .                          | 10 | Fig. 5-3: Konvergenzen im Karbon (Oströhre km 30,500, nach 63 Tagen) . . . . .   | 51 |
| Fig. 2-1: Geologisch-tektonische Übersicht mit Lage des Lötschberg-Basistunnels . . . . .                     | 12 | Fig. 5-4: Verbogene Stahlbögen im Karbon (Oströhre km 30,421) . . . . .  | 52 |
| Fig. 2-2: Optimistische und pessimistische Variante des ersten Prognoseprofils (Ausschnitt) . . . . .         | 13 | Fig. 5-5: Extensometermessungen in den Palfris-Schiefern in der Sohle des Spurwechsels Südwest (km 22,615) . . . . .                   | 53 |
| Fig. 3-1: Steilstehende Taveyannaz-Serie (Oströhre km 15,017) . . . . .                                       | 16 | Fig. 5-6: «Quellkurven» verschiedener Gesteine . . . . .   | 54 |
| Fig. 3-2: Hohgant-Schiefer . . . . .  | 16 | Fig. 5-7: Zusammenstellung der im Bereich des Lötschberg-Basistunnels durchgeführten Spannungsmessungen . . . . .                      | 56 |
| Fig. 3-3: Basisüberschiebung der Doldenhorn-Decke . . . . .   | 18 | Fig. 6-1: Vergleich der gemessenen mit den prognostizierten Gebirgstemperaturen . . . . .  | 59 |
| Fig. 3-4: Kontakt Basissandstein / Quarten-Formation . . . . .  | 19 | Fig. 6-2: Resultate der Gasüberwachung und die daraus abgeleiteten Gaszonen . . . . .  | 60 |
| Fig. 3-5: Pinitnester im Lauterbrunnen-Kristallin . . . . .   | 21 | Fig. 6-3: Radioaktivitätsmessungen zwischen Mitholz und Raron . . . . .  | 61 |
| Fig. 3-6: Permische Verwitterung des Lauterbrunnen-Kristallins . . . . .                                      | 21 | Fig. 6-4: Asbest . . . . .   | 62 |
| Fig. 3-7: Tektonische Brekzie im Gastern-Granit . . . . .   | 22 | Fig. 7-1: Übersicht über die durchgeführten Vorauserkundungen . . . . .  | 65 |
| Fig. 3-8: Feldspatporphyroblasten (Randzone des Gastern-Granits) . . . . .                                    | 22 | Fig. 7-2: Einfache Gestängebremse . . . . .  | 66 |
| Fig. 3-9: Ausschnitt aus Blatt Lötschental des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25 000 . . . . .              | 23 | Fig. 7-3: Für die Karstvorauserkundung eingesetzte mobile Bohranlage der kanadischen Firma Morisette . . . . .                         | 67 |
| Fig. 3-10: Horizontalschnitt im Bereich Jungfrau- keil- Sedimenteinschuppungen . . . . .                      | 24 | Fig. 7-4: Zur Erkundung des Jungfrau- keils eingesetzte Untertagebohranlage der Firma Stump Foratec SA . . . . .                       | 68 |
| Fig. 3-11: Schematische Darstellung der Korrelationen im Gebiet des Jungfrau- keils . . . . .                 | 25 | Fig. 7-5: Eingesetzte Preventeranlagen . . . . .   | 69 |
| Fig. 3-12: Verschütteter Dumper im Karbon von Ferden . . . . .  | 26 | Fig. 7-6: Scanneraufnahmen und dazugehörige Struktur- auswertung . . . . .   | 70 |
| Fig. 3-13: Schollengneis . . . . .  | 28 | Fig. 8-1: Ansicht der Pfahlwand beim Portal Frutigen . . . . .   | 72 |
| Fig. 3-14: Gneisscholle im Zentralen Aare-Granit (Oströhre km 45,420) . . . . .                               | 29 | Fig. 8-2: Vortrieb im Schutz eines Rohrschirmes (Unter- querung der BLS-Bergstrecke beim Portal Frutigen) . . . . .                    | 72 |
| Fig. 3-15: Migmatischer Gneis (Oströhre km 46,253) . . . . .  | 29 | Fig. 8-3: Geologischer Befund in der Oströhre beim Rohr- schirmvortrieb unter der BLS-Bergstrecke . . . . .                            | 73 |
| Fig. 3-16: Schematische Darstellung der Synkline- entwicklung südlich des Baltschieder-Granodiorits . . . . . | 30 | Fig. 8-4: Abfolge der einzelnen Vortriebsphasen . . . . .  | 73 |
| Fig. 3-17: Störung Rote Kuh - Gampel, mit grünlichem Kataklastit (Oströhre km 46,261) . . . . .               | 31 | Fig. 8-5: Horizontalschnitt mit Erkundungsbohrungen und abgedichteter Störungszone im Bereich der Talquerung bei Eggeschwand . . . . . | 74 |
| Fig. 3-18: Geologisches Profil durch die Trias-Schuppen- zone . . . . .                                       | 32 | Fig. 8-6: Hydrogeologisches Modell der verkarsteten Überschiebungszone bei km 26 . . . . .   | 74 |
| Fig. 3-19: Portal Raron (Hanganschnitt im Bereich der Zufahrt) . . . . .                                      | 33 | Fig. 8-7: Wasserführung und Injektionsmengen in der verkarsteten Zone bei km 26 . . . . .  | 75 |
| Fig. 4-1: Gesamter Bergwasseranfall an den Portalen (Additionskurve) . . . . .                                | 38 | Fig. 8-8: Hydrogeologisches Modell Jungfrau- keil / Sedimenteinschuppungen . . . . .   | 76 |
| Fig. 4-2: Ganglinien der Wassereintritte in den Karstwasser- abschnitten der Doldenhorn-Decke . . . . .       | 39 | Fig. 8-9: Schema der Injektionsbohrungen der Etappen 1 und 2 im Zugangs- und Lüftungstollen . . . . .                                  | 77 |
| Fig. 4-3: Karstloch (Weströhre km 26,904) . . . . .   | 40 | Fig. 8-10: Doppelbohrinstallation im Basistunnel; ausinjizierte Bohrungen . . . . .  | 78 |
| Fig. 4-4: Ganglinien des Wasserzuflusses im Zugangsstollen . . . . .  | 41 | Fig. 8-11: ZLS, Etappe 2: Injektionsschema im ersten Ring . . . . .  | 78 |
| Fig. 4-5: Ganglinien der Wasserführung im Autochthon Gampel-Baltschieder . . . . .                            | 42 | Fig. 8-12: ZLS, Etappe 2: Wasserführung im zweiten Ring . . . . .  | 78 |
| Fig. 4-6: Übersichtsprofil mit ausgewählten chemischen Parametern des Bergwassers . . . . .                   | 43 | Fig. 8-13: Kontakt Altkristallin / Karbon; Durchörterung des Karbons: Einbau Sohlsprenger . . . . .                                    | 79 |
| Fig. 4-7: Kalkausscheidung . . . . .  | 45 |  |    |
| Fig. 5-1: Spaltzug- / Druckfestigkeit der altkristallinen Gneise . . . . .                                    | 49 |  |    |
| Fig. 5-2: Cerchar Abrasivität Index auf natürlichen und gesägten Gesteinsflächen . . . . .                    | 50 |  |    |

|  |    |
|--|----|
| Fig. 8-14: Kalottenvortrieb bei km 48,480; Stross- und Sohlenabbau bei km 48,481 .....   | 79 |
| Fig. 9-1: Schäden an den Sicherungen im Karbon .....   | 81 |
| Fig. 9-2: Wasserzutritte in die Drainagebohrung und in den Tunnel Ost, mit Vortriebsstand und dem Verlauf der Setzung von ausgewählten Punkten ..... | 82 |
| Fig. 9-3: Grundbuchplan von St. German (Ausschnitt) mit Nivellementpunkten .....   | 82 |
| Fig. 9-4: Schematisches hydrogeologisches Profil durch das Dorf St. German .....   | 83 |
| Fig. 10-1: Blockbildung in der Ortsbrust .....   | 87 |
| Fig. 11-1: Pflanzenfunde aus dem Karbon nördlich des Gastern-Granits .....   | 89 |
| Fig. 11-2: Beispiele von Mineralien aus dem Lötschberg-Basistunnel .....   | 90 |
| Fig. 11-3: Einzelkristall von Pyrrhotin .....  | 90 |

## Tabellen

|  |    |
|--|----|
| Tab. 3-1: Überblick über die Deutungsmöglichkeiten der dunklen Schiefer, Silt- und Sandsteine im Autochthon nördlich des Gastern-Granits. .... | 20 |
| Tab. 3-2: Mittlere Lage der Schieferungsflächen im Kristallin. ....  | 34 |
| Tab. 3-3: Lage der Schicht- und Schieferungsflächen im Autochthon Gampel-Baltschieder. ....  | 35 |
| Tab. 5-1: Gesteinstypen (TBM- und Sprengvortrieb). ....  | 47 |
| Tab. 5-2: Gesteinskennziffern Sedimente. ....  | 48 |
| Tab. 5-3: Gesteinskennziffern Kristallin. ....   | 48 |
| Tab. 5-4: Versuchsergebnisse einaxiale Druckfestigkeit .....   | 49 |
| Tab. 5-5: Klassierung der beobachteten Bergschlagphänomene. ....   | 55 |
| Tab. 5-6: Haupt-Normalspannungen im Bereich des Fusspunkts Ferden. ....  | 55 |
| Tab. 5-7: Haupt-Normalspannungen im Bereich der Verzweigung Lötschen. ....   | 55 |
| Tab. 5-8: Verteilung der Wiederverwendbarkeitsklassen bezogen auf die jeweilige Streckenlänge. ....  | 57 |
| Tab. 6-1: Massnahmenplan für die verschiedenen Asbestgefahrenstufen. ....  | 63 |
| Tab. 7-1: Schema der systematischen Vorauserkundung. ....  | 64 |
| Tab. 8-1: Zusammenstellung der Injektionen im Bereich der Sedimentsteinschuppungen und des Jungfraukeils. ....                                 | 77 |
| Tab. 10-1: Zusammenstellung der Sicherungsmassnahmen im Sprengvortrieb (SPV) der Oströhre. ....  | 86 |
| Tab. 10-2: Zusammenstellung der Sicherungsmassnahmen im TBM-Vortrieb der Oströhre. ....  | 86 |

## Tafeln (in separater Mappe)

|  |
|--|
| Tafel I: Stratigraphische Sammelprofile                        |
| Tafel II: Geologisches Befundprofil 1: 20 000 Basistunnel Nord |
| Tafel III: Geologisches Befundprofil 1: 20 000 Basistunnel Süd |
| Tafel IV: Legende zu Tafel II und III                          |

# 1. Einleitung

## 1.1 Beschreibung des Bauwerkes

Der rund 34,5 Kilometer lange Lötschberg-Basistunnel führt von Frutigen im Kandertal nach Raron im Rhonetal und bildet zusammen mit dem Simplontunnel den westlichen Ast der Neuen Alpentransversalen durch die Schweizer Alpen. Das Nordportal in Frutigen befindet sich etwas südlich des Bahnhofs bei km 14,543 (Weströhre, Koord. 616.139/158.660) bzw. km 14,562 (Oströhre, Koord. 616.133/158.610, Höhe SOK 776,69 m ü. M.). Im Süden befindet sich das Portal auf der rechten Rhoneseite, direkt unter der Strasse nach St. German, bei km 49,092 (Weströhre, Koord. 630.220/128.726) bzw. km 49,088 (Oströhre, Koord. 630.271/128.727, Höhe SOK 654,44 m ü. M.). Vor dem Ausbruch des Basistunnels wurden auf der Nordseite der Sondierstollen Frutigen-Kandersteg mit dem Fensterstollen Mitholz und auf der Südseite der Fensterstollen Ferden, der Fensterstollen Steg sowie der Pilotstollen Trias in Raron erstellt. Auf diese Vorarbeiten, die zum grösseren Teil schon im Prognosebericht KELLERHALS & ISLER (1998) dargestellt wurden, wird im Folgenden nicht mehr im Detail eingegangen.

Der Lötschberg-Basistunnel wurde von 7 Angriffspunkten her ausgebrochen (Fig. 1-1):

- ab dem Portal Frutigen mit der Unterquerung der bestehenden Berglinie
- ab dem Fusspunkt Mitholz in Richtung Norden und in Richtung Süden
- ab dem Fusspunkt Ferden in Richtung Norden und in Richtung Süden
- ab dem Fensterstollen Steg in Richtung Norden
- ab dem Portal Raron in Richtung Norden

Mit dem Vortrieb des Lötschberg-Basistunnels wurde im Juli 2000 in Mitholz begonnen. Wenig später wurden die Vortriebsarbeiten auch bei den anderen Angriffspunkten aufgenommen (Portal Frutigen im Juni 2002, Ferden im September 2000, Steg Basistunnel ab Verzweigung Lötschen im Juni 2001, Portal Raron im November 2000). Der Hauptdurchschlag zwischen Mitholz und Ferden erfolgte in der Weströhre am 15. März 2005 bei km 31,647, derjenige der Oströhre am 28. April 2005 bei km 31,828. Insgesamt ergibt sich somit eine Dauer der reinen Ausbrucharbeiten im gesamten Basistunnel von knapp 5 Jahren.

Der Ausbruch erfolgte teils konventionell (Sprengvortrieb), teils maschinell mit Tunnelbohrmaschinen (Fig. 1-1). Bei der Wahl der Vortriebsmethode wurden unter anderem auch geologische Gründe berücksichtigt. So wurde zum Beispiel von Anfang an von geologischer Seite empfohlen, die Doldenhorn-Decke wegen der vorhandenen Karstgefahr konventionell aufzufahren.

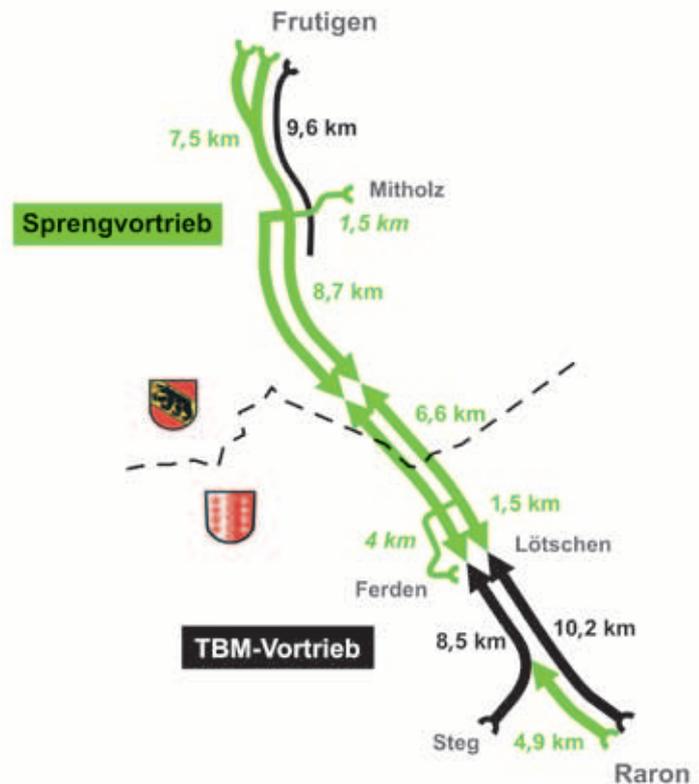


Fig. 1-1: Vortriebsschema des Lötschberg-Basistunnels mit Ausbruchmethoden.

Mit Ausnahme der Strecke zwischen der Verzweigung Adelrain (km 15,5) und dem Fusspunkt Mitholz (km 22,043) wurden zwei Tunnelröhren ausgebrochen. Bahntechnisch ausgerüstet wurden beide Röhren aber nur zwischen dem Spurwechsel Ferden (km 35,600) und dem Portal in Raron. Zwischen Ferden und Mitholz verbleibt die Weströhre vorläufig im Rohbau. Sie übernimmt in der ersten Betriebsphase die Funktion eines Rettungstollens für die im Betrieb stehende Oströhre.

Die Ausbruchquerschnitte der Tunnelröhren liegen zwischen 65 und 75 m<sup>2</sup>, und der Normalabstand der beiden Tunnelröhrenachsen beträgt 40 m. Pro Kilometer sind die beiden Röhren über drei Querverbindungen miteinander verbunden.

Neben den Tunnelröhren wurden noch mehrere Spezialbauwerke ausgebrochen. Im Einzelnen handelt es sich dabei um:

- die Betriebszentralen in Mitholz, Ferden und Lötschen mit jeweils je einer Kaverne für die West- und Oströhre
- die Nothaltestellen in Mitholz und in Ferden

- das Abluftsystem bei der Nothaltestelle Ferden, mit Lüftungsschacht Fystertälle
- den Spurwechsel in Mitholz und in Ferden
- die Spaltungsweiche Adelrain und Verzweigung Löttschen
- die Relaisräume West und Ost bei km 29,375 bzw. km 29,425

## 1.2 Organisation der geologischen Baubegleitung

Die geologische Baubegleitung des gesamten Baus des Löttschberg-Basistunnels wurde durch die Geologengruppe Löttschberg-Basistunnel in direktem Auftrag des Bauherrn, der BLS AlpTransit AG, ausgeführt. Es handelt sich dabei um die gleiche Arbeitsgemeinschaft der drei Geologiebüros Kellerhals+Haefeli AG (K+H) in Bern, Geotechnisches Institut AG (GI) in Spiez und Geologiebüro Odilo Schmid+Partner AG (OS) in Brig, wie sie schon für die gesamten Voruntersuchungen bestand. Die geologischen Arbeiten standen unter der Leitung von H.-J. Ziegler (K+H). Als stellvertretender Leiter wirkte A. Isler (K+H). Folgende Mitarbeiter waren vor Ort als Baustellengeologen tätig: P. Arnold (†), R. Hänni, R. Kropf, M. Lengacher, R. Wagner, P. Zwahlen (alle GI); A. Henzen, R. Murer, R. Ottiger, M. Pesendorfer, S. Rust, S. Vögeli (alle K+H); P. Amos, U. Burchard, B. Dräyer, F. Giovanoli, S. Schneider (alle OS). Die Herren R. Hänni, R. Ottiger und F. Giovanoli sind zu-

dem die Verfasser der Schlussberichte der einzelnen Basistunnelabschnitte, die als Grundlage für den vorliegenden zusammenfassenden Schlussbericht dienen.

Alle im vorliegenden Bericht vorgestellten Resultate wurden von den erwähnten Mitarbeitern gemeinsam erarbeitet. Die beiden Autoren H.-J. Ziegler und A. Isler stellen lediglich die zu publizierenden Teilresultate zusammen, bestimmten die Art der Darstellung und verfassten den dazugehörigen Text.

Die Zeichnerarbeiten für die Figuren und Tafeln führte D. Baccalà aus.

## 1.3 Dank

Die ganzen Ausbrucharbeiten waren geprägt vom grossen Verständnis der Unternehmensleitung der BLS AlpTransit AG für die Geologie. Es ist uns deshalb ein wichtiges Anliegen, dem Unternehmensleiter P. Teuscher und den beiden Abschnittsleitern P. Stähli und E. Lambrigger herzlich zu danken. Dank gebührt auch den beiden Oberbauleitungen (Nord: P. Hufschmied, U. Blatter; Süd: F. Vuillemier, M. Aeschbach und G. Seingre) sowie den örtlichen Bauleitungen und ihren Mitarbeitern für ihr Verständnis für die geologischen Arbeiten.

Für den Druck dieser Publikation in der Schriftenreihe der Geologischen Berichte der Landesgeologie sind wir swisstopo zu Dank verpflichtet.

## 2. Geologischer Überblick

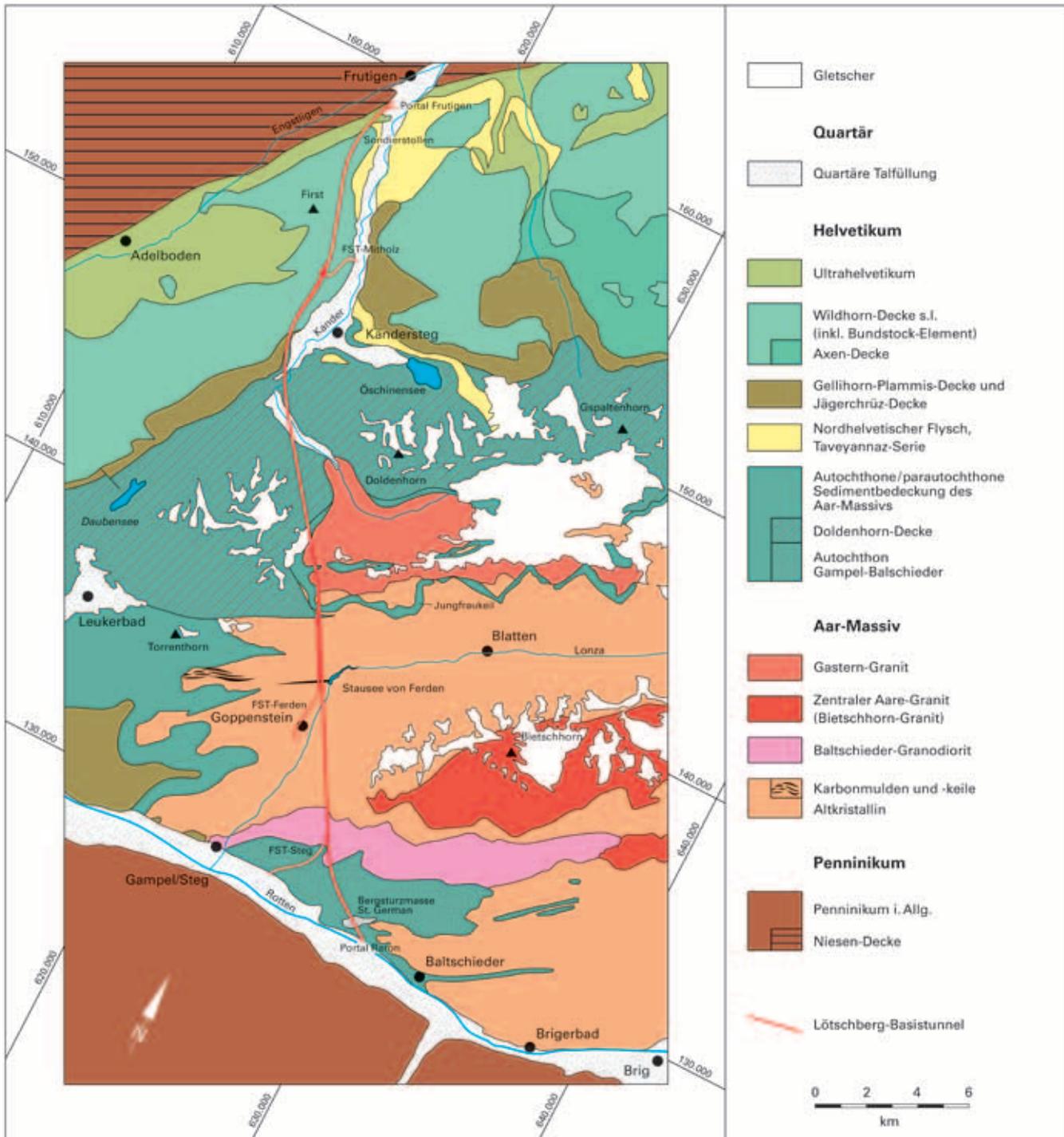


Fig. 2-1: Geologisch-tektonische Übersicht mit Lage des Lötschberg-Basistunnels. Grundlage für die Figur ist die Tektonische Karte der Schweiz 1:500 000 (BWG 2005).

## Prognoseprofile 1992

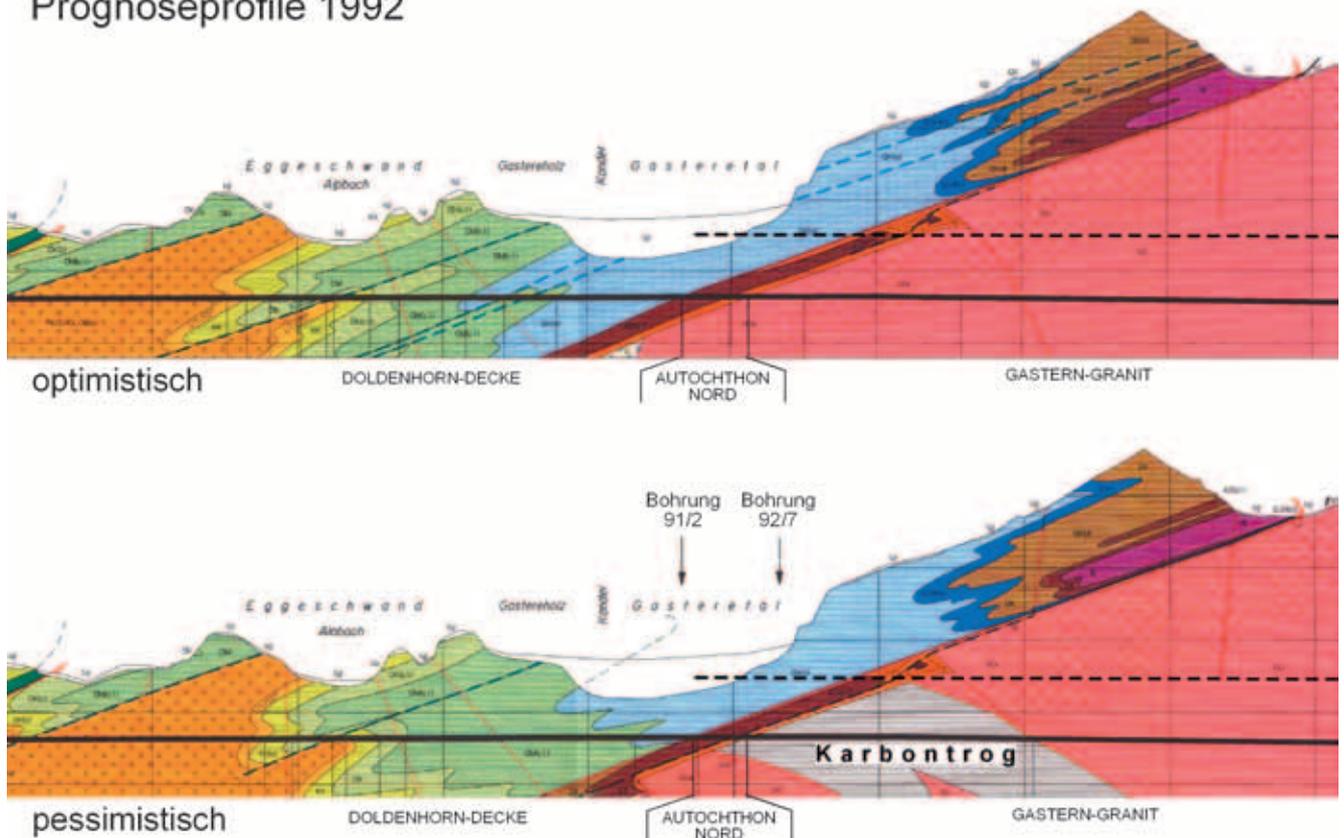


Fig. 2-2: Optimistische und pessimistische Variante des ersten Prognoseprofils (Ausschnitt).

### 2.1 Durchquerte Einheiten

Vom Nordportal in Frutigen bis rund km 28,5 unter dem Gasteretal quert der Lötschberg-Basistunnel den ganzen helvetischen Deckenstapel inkl. der dazugehörigen Flysch-einheiten. Danach verbleibt er bis zum Südportal bei Raron im Aar-Massiv samt seiner autochthonen Sedimenthülle (Fig. 2-1).

Die mit dem Tunnel durchfahrenen geologischen Einheiten können entsprechend dieser Zweiteilung wie folgt kurz beschrieben werden (Taf. I, II):

#### *Helvetischer Deckenstapel inkl. Flysch*

Auf der nördlichen knappen Hälfte des Tunnels wurden die folgenden Einheiten durchfahren (von Nord nach Süd und nicht der tektonischen Stellung entsprechend):

- **Flysch (FU) und Tavayannaz-Serie (TAV):** Sie bilden die Unterlage der über sie hinweggeschobenen Wildhorn-Decke. Eine eindeutige Zuordnung (z.B. zum süd- oder ultrahelvetischen Flysch) ist nicht möglich.
- **Mélange (MEL)** (bzw. Schuppenzone an der Basis der Wildhorn-Decke): Damit wird eine intensiv tektonisierte Schieferzone mit zahlreichen darin «schwimmenden» Kalk- und Sandsteinblöcken bezeichnet.
- **Wildhorn-Decke (WD):** Sie besteht aus einem oberen verfalteten Stockwerk (mit der sehr einfach gebauten Golitsche-Synklinale) und einem unteren, stark ver-

schuppten Stockwerk. Der Tunnel verläuft ausschliesslich im unteren Stockwerk, das vom oberen Deckenteil überfahren und dabei aufgeschuppt wurde. Es lassen sich vier Schuppen abgrenzen, die in der Regel eine Kreideserie mit Palfris-Schiefern, Sichel-Kalk und Kieselkalk sowie z.T. Drusberg-Schichten und Schratte-kalk umfassen. Aus tektonischen Gründen fehlen lokal einzelne Schichten dieser stratigraphischen Abfolge. Die Palfris-Schiefer führen Erdgas.

- **Gellihorn-Decke (GD):** Im Bereich von km 24 wurden Öhrli-Mergel und eingeschuppter Sichel-Kalk und Lithothamnienkalk angetroffen, die mit oberflächlichen Aufschlüssen der Gellihorn-Decke in Verbindung gebracht werden können.
- **Flysch der Doldenhorn-Decke:** Er umfasst eine mächtige, stark verfaltete Serie von Kalk- bis Tonschiefern mit untergeordneten Sandsteineinschaltungen. Lokal sind zudem eingebettete Kalk-, Sandstein- und Kristallinblöcke vorhanden.
- **Doldenhorn-Decke (DD):** Zwischen Kandersteg und dem Gasteretal wird eine aus mehreren Gleitbrettern bestehende, liegende Grossfalte gequert. Sie umfasst vorwiegend Kalke sowie Mergelkalke und -schiefer des Mesozoikums. Die Kalke sind lokal stark verkarstet und Wasser führend. Die Basisüberschiebung der Doldenhorn-Decke besteht aus einer stark tektonisierten, mittelsteil nach NW einfallenden Zone mit einem bis zu 3 m mächtigen Kakirit.

## **Aar-Massiv**

Mit dem Lötschberg-Basistunnel wurden folgende Einheiten des Aar-Massivs und seiner Sedimentbedeckung gequert:

- **Autochthon nördlich des Gastern-Granits:** Es stellt die ursprüngliche, stark gestörte Sedimentbedeckung des Aar-Massivs dar und besteht aus zwei Trias-Schuppenzonen und Dogger sowie der von ca. km 30,0–30,6 durchqueren Permokarbonmulde (Spätes Karbon, Perm).
- **Lauterbrunnen-Kristallin** (inkl. Karbonspan): Es handelt sich um einen migmatischen Gneiskomplex mit zahlreichen Fremdgesteinseinschlüssen.
- **Gastern-Granit:** Er verkörpert einen überwiegend massigen, wenig wasserdurchlässigen Granitkörper am Nordrand des Aar-Massivs. Randlich wird er durch eine Injektions-/Assimilationszone begrenzt, die Gneisschollen und zahlreiche Gänge aufweist (= nördliche und südliche Randzone).
- **Autochthon zwischen Gastern-Granit und Lötschental:** Dazu gehören der ins Altkristallin eingespiesste und eingeschuppte Jungfraukeyl, die Sedimenteinschuppungen (Fig. 3-10) sowie das Karbon von Ferden (inkl. Permokarbon und Linse mit Trias/Lias).
- **Altkristallin südlich des Gastern-Granits:** Dieses wurde während der alpinen Gebirgsbildung intensiv zerschert und z.T. aufgeschoben. Es umfasst schiefrige bis massige Gneise sowie kristalline Schiefer, die steil nach SE–SSE einfallen. In der ganzen Abfolge treten unregelmässige Einschaltungen von Amphiboliten und Amphibolgneisen sowie Ganggesteinen auf.
- **Zentraler Aare-Granit:** Er verkörpert einen erst östlich des Tunneltrassees an die Oberfläche tretenden massigen, wenig durchlässigen Granitkörper im Zentrum des Aar-Massivs und variiert bezüglich des Gehaltes an dunklen Mineralen, Körnigkeit und Textur sehr stark.
- **Baltschieder-Granodiorit:** Dieser umfasst Granodiorite und migmatische Gneise und ist vom weiter nördlich liegenden Zentralen Aare-Granit – entgegen den Aufschlüssen an der Oberfläche – im Basistunnel nicht durch altkristalline Gneise getrennt. Längs seiner nördlichen Grenze ist er porphyrisch, im Süden lokal etwas kataklastisch ausgebildet.
- **Autochthon Gampel-Baltschieder:** Diese Sedimente sind Teil der ursprünglichen Sedimentbedeckung des Aar-Massivs. Die Abfolge wird von massigem Malm-Kalk,

sandigen Dogger-Kalken und -Mergeln, «Aalénien-Schiefern», spätigen und sandigen Lias-Kalken, feinblättrigen, stark verfalteten und oft verschuppten Lias-Schiefern und Gesteinen der Trias (Kalke, Dolomite, Phyllite) aufgebaut. Eine stärkere Wasserführung und Verkarstungen wurden vor allem in den Karbonatserien angetroffen. Die schiefrigen Serien dagegen wirkten normalerweise als Wasserstauer.

Die südlich des Lauterbrunnen-Kristallins angefahrne Permokarbonmulde stellte die einzige bedeutende geologische Überraschung beim Bau des Lötschberg-Basistunnels dar. Die Prognoseprofile (Fig. 2-2) umfassten ursprünglich zwar eine pessimistische Variante mit einer unter der Doldenhorn-Decke gelegenen Karbonmulde, in Analogie zu der weiter im Westen unter der Morcles-Decke aufgeschlossenen Karbonmulde von Salvan. Da die im Folgenden auf der Südseite des Gasteretals abgetieften Tiefbohrungen keinerlei Hinweise auf die tatsächliche Existenz einer solchen Karbonmulde lieferten und auch an der Oberfläche und im Scheiteltunnel diesbezügliche eindeutige Hinweise fehlten, wurde dieses Szenario jedoch von der Fachkommission Geologie Alp-Transit (FKGA) und den Projektgeologen als wenig wahrscheinlich eingestuft und für die Submission, in der ja eine wahrscheinliche Prognose dargestellt wird, als zu pessimistisch beurteilt und nicht mehr berücksichtigt.

## **2.2 Änderungen der Trasseeführung**

Gegenüber der Trasseeführung, wie sie im Bericht von KELLERHALS & ISLER (1998) dargestellt ist, erfolgten für das Bauprojekt Optimierungen, die geringe Verschiebungen der Tunnelachse zur Folge hatten. Dies betrifft insbesondere den Abschnitt im Aar-Massiv. So liegt der nun erstellte Basistunnel im Bereich Ferden deutlich westlicher als ursprünglich geplant. Auch zwischen dem Portal Raron und der Verzweigung Lötschen erfolgten geringe Anpassungen der Trasseeführung. Hinzu kamen noch weitere Optimierungen während der Ausführung, wie zum Beispiel die Verschiebung der Nothaltestelle Ferden nach Süden, um die grossen Kavernen und die zusätzlichen Belüftungsanlagen in bautechnisch möglichst günstigen Gesteinen ausbrechen zu können.

## 3. Tektonische und lithostratigraphische<sup>1</sup> Einheiten

### 3.1 Portalzone Nord

Zwischen dem Portal Frutigen und km 15,3 wurden hauptsächlich Gesteine der Taveyannaz-Serie durchörtert. Anschliessend folgten Flyschschiefer und -sandsteine, in die weitere, stark zerbrochene Lamellen von Taveyannaz-Sandstein eingeschuppt sind (Taf. II).

### 3.2 Helvetischer Deckenstapel inkl. Flysch

#### 3.2.1 Taveyannaz-Serie und Flysch unbekannter Herkunft

##### *Taveyannaz-Serie*

Diese zum Flysch zählende Einheit (Fig. 3-1) umfasst miteinander wechsellagernde Sandsteine, Silt-/Sandsteine und «Dachschiefer», die vor ca. 40 Mio. J., d.h. im Eozän, abgelagert wurden. Obwohl die Sandsteine in der Regel gut abgegrenzte Bänke bilden, sind durch die Variation der Korngrösse des detritischen Materials kontinuierliche Übergänge zwischen den einzelnen Schichten möglich.

- Bei den Dachschiefern handelt es sich um plattige, laminierte, braungraue Siltsteine bis siltige Mergelschiefer mit einem Sandanteil von bis zu 30%. Die Mergelschiefer sind den kalkigen Flyschschiefern und den Globigerinenschiefern recht ähnlich.
- Die Silt-/Sandsteine sind im mm- bis cm-Bereich rhythmisch geschichtet und enthalten Tonminerale, Karbonat und Quarz. Die einzelnen Lagen zeichnen sich durch unterschiedliche Korngrösse und wechselnde Quarz- und Tongehalte aus.
- Der Taveyannaz-Sandstein ist grünlich und in seiner typischen Ausbildung gefleckt. Die einzelnen Bänke sind in der Regel bis zu mehrere dm, in Ausnahmefällen gar bis zu 2 m mächtig. Sie werden durch dünne «Dachschieferlagen» voneinander getrennt. Der Übergang vom Sandstein zum «Dachschiefer» ist meist fließend. Der Sandstein besitzt eine chloritisch-karbonatische Matrix und ist unregelmässig geklüftet und durchadert. Er enthält ca. 10–20% Quarz und als weitere harte Minerale reichlich Feldspat und vereinzelt Hornblende, die vulkanischen Ursprungs ist.

Die Taveyannaz-Serie ist im Bereich der Portalzone nur schwach metamorph. Die Flüssigkeitseinschlüsse und Illitkristallinitätsbestimmungen deuten auf Temperaturen um 200 °C hin (RAHN & MULLIS 1999).

##### *Flysch unbekannter Herkunft*

- Die Flyschschiefer bestehen aus plattigen bis blättrigen, schwarzen, ton- oder kalkreichen Mergelschiefern mit cm- bis dm-mächtigen Sandsteinlagen, deren Anteil von 0 bis 20% variieren kann. Die Schiefer wurden ausschliesslich spröde verformt. Als Folge davon sind die Sandsteinbänke oft zerrissen und schwimmen als Sandsteinlinsen bis -boudins in einer schiefrigen Matrix.
- Die Flyschsandsteine verkörpern meist graue, feinkörnige, massige Sandsteine mit variablem Quarzgehalt. Die kalkige Matrix enthält wenig bis reichlich Feldspäte und Gesteinsbruchstücke. In den Bohrkernen fanden sich häufig deutlich sichtbare Gradierungen. Bei km 15,573 wurde ein kompletter normal gelagerter Turbidizyklus (Feinkonglomerat bis Siltstein) beobachtet. Sichere Belege für eine grossräumige verkehrte Lagerung wurden dagegen keine gefunden.

Aufgrund obiger Beobachtungen ist zu vermuten, dass der Flysch nicht von oben unter die überlagernde Wildhorn-Decke (s. Taf. II) eingewickelt, sondern von derselben in normaler Lagerung überfahren worden ist. Der Flysch ist dabei, zusammen mit der Taveyannaz-Serie, intern aufgeschuppt oder als kleinere Schuppen an der Basis der vorrückenden Decke mitgerissen worden. Mit einer Ausnahme (s. unten) liess sich das Alter bzw. die Herkunft der Flyschablagerungen nicht genauer bestimmen.

#### 3.2.2 Mélange und Schuppen

Als Mélange wird eine innige, tektonisch bedingte Durchmischung unterschiedlichster Gesteine bezeichnet, wie sie vielerorts im Übergangsbereich zwischen überschoberer Decke und dem Unterliegenden auftritt. Ein im Liegenden der Wildhorn-Decke ausgebildetes Mélange wurde im Basistunnel zwischen km 19,240 und 20,300 durchfahren und umfasste Megablocke und -linsen von Sichel-Kalk, Kieselkalk, Hohgant-Sandstein, Lithothamnienkalk, Palfrischiefern und Globigerinenschiefern. Die Beschreibung dieser der Wildhorn-Decke entstammenden Gesteine ist der Tafel I zu entnehmen.

Besonders erwähnenswert ist die zwischen km 16,300 und 16,780 innerhalb des Flysches gelegene Schuppe mit Fleckenmergeln und Hohgant-Schiefern. Die Fleckenmergel sind bräunlich-beige bis schwarze, laminierte bis flecki-

<sup>1</sup> Anmerkung des Herausgebers: Die Bezeichnungen der lithostratigraphischen Einheiten im vorliegenden Bericht entsprechen weitgehend den im Prognosebericht zum Lötschberg-Basistunnel (KELLERHALS & ISLER 1998) verwendeten. Die aktuelle und von der Landesgeologie empfohlene Nomenklatur ist dem Lithostratigraphischen Lexikon der Schweiz (LLS, o.J.) zu entnehmen.



Fig. 3-1: Steilstehende Taveyannaz-Serie (Oströhre km 15,017).

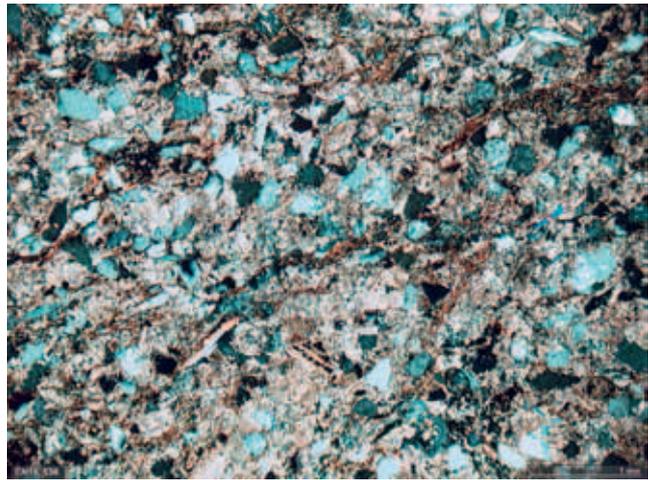


Fig. 3-2: Hohgant-Schiefer (Dünnschliffaufnahme).

ge Kalke und Kalkmergel, die plattig bis schwach verschiefert sind und dem süd- bzw. ultrahelvetischen Faziesraum (KELLERHALS & ISLER 1998) entstammen dürften. Die Hohgant-Schiefer bestehen aus plattigen, harten, monotonen, siltig-sandigen Kalkmergeln (Fig. 3-2). Sie sind schwach gedert und von auffällig bräunlich-schwarzer Farbe. Die im Dünnschliff bestimmte Mikrofauna ergab ein tertiäres Alter. Die Hohgant-Schiefer gehören zur Wildstrubel-Formation und stellen ein zeitliches Äquivalent des Hohgant-Sandsteins dar (MENKVELD-GFELLER 1993).

Die oberflächlich an der Talflanke innerhalb der Taveyannaz-Serie von ADRIAN (1915) beschriebenen Blöcke von Couches rouges und Wildflyschn konnten weder im Sondierstollen noch im Basistunnel beobachtet werden. Dies dürfte mit der geringen Grösse der Blöcke und Schuppen zusammenhängen. Auch die oben beschriebenen Fleckenmergel und Hohgant-Schiefer konnten im nur 30 m von der Haupttröhre entfernten Sondierstollen nicht mehr beobachtet werden.

Die Kontakte des Mélange und der beschriebenen Schuppen zur Wildhorn-Decke bzw. zum unterliegenden Flyschn sind scharf und wenig spektakulär.

### 3.2.3 Wildhorn-Decke

Der Lötschberg-Basistunnel durchquerte zwischen km 20,3 und 23,9 das untere, verschuppte Stockwerk der Wildhorn-Decke mit Kreide und Tertiär der helvetischen Schichtreihe. Die lithologische Beschreibung der durchörterten Einheiten ist dem Sammelprofil auf der Tafel I zu entnehmen. Im Folgenden wird nur noch ergänzend auf einige Besonderheiten eingegangen:

- Die Grenze zwischen dem Schratzenkalk und der Mergelschiefer-Kalk-Abfolge der Drusberg-Schichten wird normalerweise bei der obersten Mergelschieferlage gezogen. Da an der Ortsbrust diese Abgrenzung nicht mit Sicherheit vorgenommen werden konnte, wurde die Kalk-Mergel-Wechselfolge bei km 21,400–21,570 vollständig zu den Drusberg-Schichten gestellt.
- Der Kieselkalk war an der Ortsbrust zum Teil nur schwierig vom Sichel-Kalk und von kalkigem Hohgant-Sand-

stein zu unterscheiden. Bei km 18,916 waren im oberen Teil des Kieselkalks vereinzelte rötliche und grünliche Tonlagen vorhanden, die als siderolithische Infiltrationen interpretiert wurden. Im Dünnschliff zeigt sich der Kieselkalk als Glaukonit führender Spatkalk (Biopelsparit) mit 10% detritischem Quarz, 20–40% feinstkörniger bis amorpher Verkieselungssubstanz in der Matrix, wenig Phosphat und Pyrit sowie z.T. verkieselten Echinodermenbruchstücken und vielen Tönhäuten.

- Die Kieselkalkschiefer an der Basis des Kieselkalkes blättern im Unterschied zu den ähnlichen Palfris-Schiefern nicht auf und enthalten keine Kalkbänke. Zudem ist der Quarzgehalt leicht höher. Bei normalstratigraphischen Abfolgen ist der Übergang von den Kieselkalkschiefern zum Kieselkalk kontinuierlich (z. B. in der Oströhre bei km 22,800).
- Beim Sichel-Kalk handelt es sich um einen quarzarmen, schwach verkieselten Biopelsparit bis -mikrit mit vielen mikritisierten Foraminiferen, fraglichen Spongienquerschnitten, Rindenkörnern, Algenfragmenten, Bryozoen sowie authigenem Albit. Zwischen km 18,887 und 18,898 waren rötlich verfärbte Tonlagen vorhanden, die ebenfalls als siderolithische Infiltrationen interpretiert wurden.

Die Palfris-Schiefer führten zum Teil reichlich Methan, das einige Male zu Nachbränden im Haufwerk führte. Im Abschnitt zwischen km 23,060 und 23,265 (Oströhre) bzw. km 23,060 und 23,305 (Weströhre) waren die Palfris-Schiefer im Vergleich zu den übrigen Abschnitten etwas kalkiger und ruhiger gelagert. Im Gegensatz zu den Schiefern des Flyschns der Doldenhorn-Decke ist in den Palfris-Schiefern kaum Glimmer vorhanden, und der Sandgehalt ist generell niedriger. In den Dünnschliffen konnten etwas Pyrit und vereinzelte benthonische Kleinforaminiferen beobachtet werden.

### 3.2.4 Gellihorn-Decke

Die im Bereich von km 24 durchquerten Öhrli-Mergel mit eingeschupptem Sichel-Kalk und Lithothamnienkalk (Kreide, Tertiär) werden mit den oberflächlichen Aufschlüssen der Gellihorn-Decke in Verbindung gebracht.

Die Öhrli-Mergel umfassen dunkelgraue bis schwarze Kalkmergel bis Mergelschiefer mit dünnen Kalkbänken. Sie sind lokal stark zerschert, verfälscht und tektonisiert (viele Calcitäderchen, Scherzonen, graphitische bis spiegelige Schieferungsflächen) und führten lokal Methan. Im Dünnschliff präsentieren sie sich als Kalkmergel mit wenig Silt und zahlreichen Tonhäuten sowie reichlich Pyrit. Teilweise sind sie feinsandig (Quarzgehalt ca. 10%) und führen kleine Pellets. Im Sondierstollen sind diese Öhrli-Mergel noch als Palfris-Schiefer der Wildhorn-Decke interpretiert worden.

Beim Sichel-Kalk handelt es sich um grauen, stark geaderten, massigen Kalk mit Stylolithen und Tonfasern. Da die sonst für den Sichel-Kalk typischen Mergelzwischenlagen und Silexknollen fehlen, war dieser Abschnitt kaum geschichtet. Die Dünnschliffe zeigen einen quarzarmen, rekristallisierten Pelmikrosporit mit späten Bereichen.

Der Lithothamnienkalk, ein hellgrauer, massiger und stark geadeter Kalk, wies eine regelmässige, steile Klüftung, jedoch ebenfalls keine deutliche Bankung auf.

Inwieweit die Taveyannaz-Serie ebenfalls zur Gellihorn-Decke zu rechnen ist, ist noch nicht abschliessend geklärt. Sie kann auch als selbständiges tektonisches Element aufgefasst werden.

### 3.2.5 Doldenhorn-Decke

Nach mehr als einem Kilometer im Flysch der Doldenhorn-Decke trat der Basistunnel in den kalkigen Kern dieser Decke ein. Die Befunde im Tunnel bestätigen die von SCHLÄPPI (1980) vertretene Auffassung, dass es sich nicht um eine überkippte, einfache Deckfalte, sondern um übereinandergeschobene Gleitbretter mit vorgeschobenem und aufgestauchtem Flyschmantel handelt. Die Herkunft bzw. «Wurzel» dieser Decke wird in Kapitel 3.3.4 diskutiert.

Die rund drei Kilometer lange Kalkstrecke der Doldenhorn-Decke zeichnete sich durch ihre Verkarstung aus. Umfangreiche Vorauserkundungsmassnahmen sowie die aufwendige Injektion eines verkarsteten Bereichs erforderten ein schrittweises Vorgehen und führten zu längeren Vortriebsunterbrüchen, die jedoch bedeutend kürzer ausfielen als erwartet.

Die Schiefer des Flysch der Doldenhorn-Decke variieren zwischen Kalkschiefern vom Typ «Leimeren-Kalk» und tonigen Mergelschiefern mit graphitisch-spiegeligen Schieferungsflächen. Als boudinierte Härtlinge wurden Kalke, Sandsteine und polygene Brekzien gefunden. Der Quarzgehalt beträgt ca. 10–20%. In den Dünnschliffen wurden unter anderem auch Glimmer führende, stark siltig-sandige Mikrite mit Globigerinen- und Lithothamnienbruchstücken beobachtet. Daneben fanden sich auch Schiefer mit zahlreichen Tonhäuten, eingestreuten Quarzkörnern und Feldspäten sowie Kalkfragmenten. In den beiden Basistunnelröhren sind nur wenige Blöcke aufgetreten, während im auf der Ostseite des Kandertals gelegenen Ridschuk-Tunnel der BLS-Bergstrecke zahlreiche grössere Sandsteinblöcke angetroffen wurden.

Der Öhrli-Kalk ist im Unterschied zum späten Betlis-Kalk nicht verkieselt, weniger geadert, fossilreicher sowie quarzärmer und führt Tonlagen und Stylolithen. In den

Bohrkernen neigt er zur Scheibenbildung. Im Dünnschliff ist der Öhrli-Kalk typischerweise ein Mikrosporit mit Peloiden und Echinodermenbruchstücken. Als Bioklasten treten darin aber auch Schalenbruchstücke und Korallenfragmente auf. Der Quarzgehalt ist gering und der Quarz meist in Siltfraktion vorhanden. Es sind praktisch durchwegs Anzeichen duktiler Deformation zu erkennen, mit Verzwilligung und Subkornbildung in grösseren Calcitkristallen.

Der Öhrli-Kalk weist immer wieder Abschnitte mit erhöhtem Mergelgehalt auf bis hin zu einem Biomikrit, wobei der Mikrit häufig zu Mikrosporit rekristallisiert ist. Grundsätzlich sind in der Doldenhorn-Decke vom typischen Öhrli-Kalk bis hin zum Quinten-Kalk sämtliche lithologischen Mischformen, z.B. in Form von Wechsellagerungen, vorhanden.

Die Öhrli-Mergel sind an ihrer Obergrenze schwach tektonisch beansprucht, und die Untergrenze zum Quinten-Kalk ist ebenfalls tektonisch überprägt und möglicherweise nicht überall stratigraphisch. Weil die Öhrli-Mergel gegen Norden hin grundsätzlich immer kalkiger werden, ist die Abgrenzung zum Öhrli-Kalk unscharf, d.h. es treten bisweilen auch Mischformen in Form von dunklerem, verschiefertem Öhrli-Kalk auf. Im Dünnschliff sind die Öhrli-Mergel Pyrit führende Mikrite mit wenig biogenen Komponenten und wenig Quarz. Tonhäute sind häufig.

Der Quinten-Kalk weist häufig Anzeichen von Drucklösung auf und ist durch ein penetratives Parallelgefüge charakterisiert. Dieses bewirkte, dass das Ausbruchsmaterial feinstückig und plattig anfiel. Die Schichtung war im Vortrieb nur in Ausnahmefällen zweifelsfrei erkennbar. Vereinzelt konnten Scharniere von Isoklinalfalten beobachtet werden. Es wird vermutet, dass der Quinten-Kalk wesentlich stärker verfaltet ist als dies wegen der penetrativen Schieferung den Anschein macht. Anzeichen einer duktilen Deformation sind z.B. in Form verfalteter Adern allgegenwärtig.

Als Varietät tritt ein «Flammenkalk» mit einem auffällig fleckigen Muster mit bis zu mehreren cm grossen, scharf begrenzten Schlieren bis eckigen, flammenförmigen Flecken auf. Die Flecken heben sich durch ihre helle Farbe von der dunkleren Matrix ab. Die Farbunterschiede basieren auf unterschiedlichen Mikritkörnungen, wobei der stärker rekristallisierte und damit etwas grobkörnigere Mikrit als heller Fleck in einer dunkleren Matrix erscheint. Dolomit-Rhomboeder wurden sowohl in den hellen als auch in den dunklen Bereichen festgestellt.

Eine weitere, als Tros-Kalk interpretierte Varietät besteht aus einem dunklen, mikritischen Kalk mit wolkigen, vollständig rekristallisierten hellen Flecken, die stark rekristallisierte Korallen darstellen dürften. Eine scharfe Abtrennung vom mikritischen Quinten-Kalk war wegen des wiederholten Auftretens solcher Horizonte nicht möglich. Die Grenze zwischen Öhrli-Kalk und Quinten-Kalk wurde beim ersten derartigen Troskalk-Horizont gezogen.

Die Basis der Doldenhorn-Decke besteht aus einem 1–2 dm mächtigen, dynamisch rekristallisierten, hellgrauen Kalkmylonit (Typ Lochseiten-Kalk, Fig. 3-3).



Fig. 3-3: Basisüberschiebung der Doldenhorn-Decke.

### 3.3 Aar-Massiv

Dieses Kapitel umfasst den Abschnitt des Aar-Massivs im Lötschberg-Basistunnel mit dem altkristallinen Lauterbrunnen-Kristallin, dem Gastern-Granit (inkl. der Randzonen), dem eigentlichen Altkristallin (inkl. der Schollengneise), dem Zentralen Aare-Granit sowie dem Baltschieder-Granodiorit in den Vortrieben Mitholz (Süd), Ferden und Raron zwischen km 28,56 (Ost) und dem Südportal in Raron bei km 49,088. Dazu gehören auch die autochthone Sedimentbedeckung sowie die in diese kristallinen Gesteine nördlich und südlich des Gastern-Granits eingeschalteten Sedimentabfolgen (Autochthon Nord, internes Autochthon mit Dogger, Trias und Permokarbon, Jungfrau keil, Sedimenteinschuppungen südlich des Jungfrau keils, Karbon von Ferden sowie Autochthon Gampel-Baltschieder).

Das Aar-Massiv wird aus einer Gneis- und Schieferhülle mit darin steckenden Granitstöcken aufgebaut. Diese Gneis- und Schieferhülle besteht aus präkambrischen bis paläozoischen polymetamorphen Gesteinen, dem Altkristallin. In dieses Altkristallin intrudierten im späten Karbon verschiedene granitische Schmelzen – der Zentrale Aare-Granit und der Gastern-Granit. Der Baltschieder-Granodiorit mit seinen migmatischen Gneisen und dessen Granodioritstöcken nimmt dabei eine besondere Stellung ein. Er ist etwas älter als der Zentrale Aare-Granit, und der intrusive Charakter ist deutlich weniger ausgeprägt. Möglicherweise wurde die Schmelze nur wenig mobilisiert. Offen bleibt die Frage des Alters der granitischen Gneise (Schollengneise). Auf Grund des deutlich ausgeprägten Intrusivcharakters lässt sich vermuten, dass die Schollengneise jünger sind als das restliche Altkristallin (vielleicht sogar herzynisch).

#### 3.3.1 Autochthon nördlich des Gastern-Granits (Autochthon Nord; internes Autochthon mit Permokarbon, Trias und Dogger)

Als Autochthon wird diejenige Sedimentbedeckung des kristallinen Grundgebirges verstanden, die sich noch heute an ihrem ursprünglichen Ablagerungsort auf dem Kristallin befindet. Im Falle des Aar-Massivs sind dies ins Altkristal-

lin eingespiesste Permokarbonmulden sowie mesozoische Sedimentreste (hauptsächlich Trias). Letztere stellen die zurückgebliebenen Reste der nach Norden überschobenen helvetischen Decken dar.

Die mit dem Basistunnel zwischen Doldenhorn-Decke und Lauterbrunnen-Kristallin durchhörterte Abfolge ist auf Tafel I schematisch dargestellt.

#### *Karbonspan im Lauterbrunnen-Kristallin*

Kurz vor km 29,800 wurden in der Oströhre im Lauterbrunnen-Kristallin schwarze Tonschiefer angefahren. In der Weströhre fehlten dieselben. Es wird vermutet, dass es sich um eingespiesstes Karbon handelt, doch wurden keine Fossilien gefunden. Die innerhalb der Trias nördlich des Lauterbrunnen-Kristallins angetroffene Anthrazitlinse (s. unten) kann als eingeschupptes Karbon interpretiert werden und mit dem erwähnten Karbonspan in Verbindung gebracht werden.

#### *Trias nördlich des Lauterbrunnen-Kristallins*

Die dem Lauterbrunnen-Kristallin im Norden aufliegende Trias-Schuppenzone enthält lokal eine Anthrazitlinse. Diese dürfte zusammen mit dem oberen Teil der Schuppenzone von weiter südlich überschoben worden sein. Der untere Teil liegt mit weitgehend ungestörtem Kontakt dem rot-grün verfärbten Lauterbrunnen-Kristallin auf. Die Basis besteht aus typischem Basissandstein. Die Körner dieses Quarzsandsteines sind schlecht gerundet und zeigen häufig undulöse Auslöschung. Die Matrix besteht überwiegend aus feinkörnigem Serizit, der nur vereinzelt parallel eingeregelt ist. Die akzessorischen Pyritkörner sind z.T. zerbrochen und weisen Druckschatten auf. Insgesamt scheint der Sandstein aber nur wenig deformiert; er verhielt sich tektonisch wie ein Teil des Kristallins.

#### *Trias südlich des Lauterbrunnen-Kristallins*

Nach der Durchörterung von rund 800 m Lauterbrunnen-Kristallin wurde bei km 29,850 (Oströhre) bzw. km 29,875 (Weströhre) erneut Trias angetroffen. Diese ist lithologisch gleich ausgebildet wie jene auf der Nordseite, ist tektonisch aber eindeutig weniger überprägt. Besonders ausgeprägt war die rot-grüne Verfärbung des unterliegenden Kristallins, die als permische Verwitterung des Kristallins gedeutet wird. Darüber folgen mit weitgehend ungestörtem Kontakt der Basissandstein, die Quarten-Formation und eine Anhydrit-Dolomit-Wechselfolge (Fig. 3-4). Die Dolomitlagen bestehen häufig aus Dolomitboudins in einer vollständig rekristallisierten Anhydritmatrix. Die Dünnschliffe zeigen ein vollständig dynamisch rekristallisiertes, mylonitisches Anhydritgefüge mit gelängten und eingeregelteten Kristallkörnern ( $\varnothing$  100–200  $\mu$ m). Einzelne Dolomitbruchstücke weisen Anzeichen einer Sprödeformation auf und sind in die Schieferung einrotiert. Der Kontakt zur Quarten-Formation ist zwar tektonisch, doch ist diese höchstens geringfügig abgeschert worden.

#### *Dogger*

Die Trias wird südlich und nördlich des Lauterbrunnen-Kristallins von einer gleichartigen Wechselfolge von dunkel-

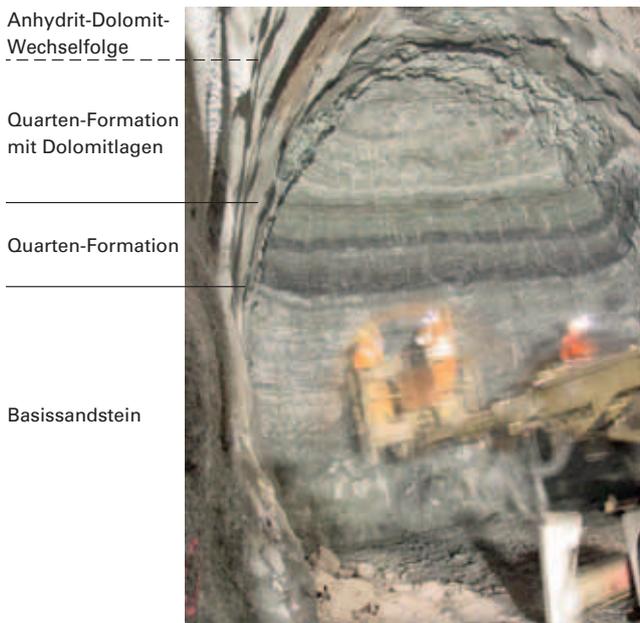


Fig. 3-4: Kontakt Basissandstein / Quarten-Formation.

grauen bis schwarzen Sandsteinen bis Feinbrekzien, Siltsteinen und Tonschiefern überlagert (Taf. I). Der Kontakt ist tektonisch. Im Dünnschliff wiesen etliche der Sandsteine einen bedeutenden Karbonatgehalt auf. Das Karbonat liegt dabei als karbonatische Matrix, als sekundäre Spickelfüllungen und untergeordnet auch als detritische Karbonatkörner vor. Lokal wurde auch ein eigentlicher Dolomikrit sowie eingelagerte Dolomitlinsen beobachtet. Besonders erwähnenswert sind zudem einige kohlige Einschaltungen nahe der Basis, die auf der Nordseite erbohrt wurden. An Fossilien fand sich spärliches Pflanzenhäcksel sowie fragliche Echinodermenreste. Zudem wurden in den im Gasteretal abgeteuften Tiefbohrungen 94/19 und 94/20 (KELLERHALS & ISLER 1998) Dinoflagellatenzysten festgestellt, die gemäss P. Hochuli (unpubl. Expertise) auf einen marinen Ablagerungsraum und auf ein postmitteltriassisches Alter hindeuten. Dieses Alter konnte allerdings an den im Tunnel gewonnenen Proben nicht bestätigt werden.

Die scheinbare Mächtigkeit dieser Abfolge beträgt im Norden rund 300 m und im Süden rund 110 m. Die Schichten fallen mit 10–30° nach Südosten ein und unterscheiden sich klar von den anschliessenden permischen Gesteinen.

Das Alter dieser Schichten wurde nach der Durchörterung nochmals eingehend diskutiert, obwohl keine neuen Fossilfunde vermeldet werden konnten. Die Tabelle 3-1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die in Erwägung gezogenen Zuordnungen und die Argumente, die dafür oder dagegen sprechen.

Die Deutungen als Dogger oder Karbon scheinen am wahrscheinlichsten, doch blieben sich die Geologen der Geologengruppe Lötschberg-Basistunnel in dieser Frage uneins. Im nachfolgenden Text und im Befundprofil werden diese Schichten als Dogger bezeichnet. Den Ausschlag dazu gaben vor allem die von P. Hochuli in der Tiefbohrung 91/2 beobachteten Dinoflagellatenzysten, die auf ein postmittelliasisches Alter und ein marines Milieu hindeuten.

Braun- und Steinkohle entsteht dagegen, unabhängig von ihrem Alter, nicht in marinem Milieu, sondern in festländischen Sümpfen. Eine Analyse der Isotopen der im Basistunnel aufgefundenen Kohle haben leider ebenfalls zu keinen schlüssigen Altersdaten geführt (WILLIAMS et al. 2008).

Künftige Detailuntersuchungen an den im Archiv der Geologischen Informationsstelle der Landesgeologie hinterlegten Bohrkernen und Handstücken vermögen die Frage, ob es sich nicht doch um Karbon handelt, möglicherweise definitiv zu klären.

Die tektonisch stark beanspruchten schiefrigen Dogger- und Trias-Sedimente führten teilweise zu beträchtlichen Konvergenzen.

### *Frühes Perm*

An die erwähnte Störungszone schliesst eine flach liegende, höchstens mit bis zu 10° nach Südosten einfallende, hellgrau gefärbte Schichtserie an. Diese wird von Sandsteinen und Siltsteinen dominiert, mit untergeordneten Tonschiefern. Typisch ist eine durchgehende leichte Karbonatführung, d.h. die Gesteine brausen beim Beträufeln mit konzentrierter Salzsäure auf. Dies ist beim Kohle führenden Karbon nicht der Fall. Gemäss einer röntgenographisch untersuchten Einzelprobe handelt es sich beim Karbonat hauptsächlich um Ankerit sowie etwas Dolomit. Dieser Ankerit könnte von einem verwitterten Kristallinrücken ins angrenzende Sedimentationsbecken eingeschwemmt worden sein. Bei den in diesen Schichten gefundenen, vereinzelt Pflanzenresten, die am Naturhistorischen Museum Bern bearbeitet worden sind (mündl. Mitt. B. Hostettler), handelt es sich um Durchläufer, die sowohl im Perm wie auch im Karbon verbreitet waren. Die palynologische Bearbeitung konnte ebenfalls keine genaueren Altersangaben liefern. Da rote und grüne Farben fehlen und Karbonsedimente üblicherweise kein Karbonat führen, wurden diese Schichten dem frühen Perm zugeordnet. Vergleichbare, datierte Schichten sind aus der Nagra-Bohrung Weiach bekannt. Die auffallend flache Lagerung und das Fehlen von Verfaltungen belegt zudem eindeutig, dass dieses Gesteinspaket nur wenig deformiert bzw. ausgequetscht worden ist.

Da die Siltsteine mit Sandsteinen vergesellschaftet sind, konnte die ganze, rund 400 m lange Strecke mit Perm im Profiltyp 3, also ohne Stahleinbau, beherrscht werden.

### *Spätes Karbon*

Das Karbonat führende Perm grenzt bei km 30,240 (Oströhre) und km 30,280 (Weströhre) mit einer steilstehenden Störung an eine knapp 300 m (Oströhre) bzw. 370 m (Weströhre) lange Karbonstrecke mit Pflanzen führenden Steinkohleflözen. Die versteinerten Pflanzenreste erlaubten BROUSMICHE DELCAMBRE & MENKVELD-GFELLER (2007) eine Datierung dieser Schichten als Spätes Karbon (Westphalien B [international: Grenzbereich Moscovien/Kasimovien]). Die Gesteinsabfolge ist aus Sandsteinen, Siltsteinen, Tonschiefern und Anthrazitlagen aufgebaut, die in unterschiedlichen Anteilen miteinander kombiniert auftreten.

Bei den Sandsteinen handelt es sich um dunkelgraue bis schwarze, mittel- bis grobkörnige, graue, harte, unreife

Tab. 3-1: Überblick über die Deutungsmöglichkeiten der dunklen Schiefer, Silt- und Sandsteine im Autochthon nördlich des Gastern-Granits.

| Deutung als                        | Übereinstimmungen   | Abweichungen   | Befund |
|------------------------------------|---|--|--------|
| Flysch                             | Überwiegend klastische Sedimente  | Matrix durchwegs karbonatisch. Organisches Material unterscheidet sich deutlich von demjenigen des Karbons.  | –      |
| Unterer Dogger (inkl. oberer Lias) | Untere Bommerstein-Formation: Wechsel-lagerung von dunklen Mittel- und Grobsandsteinen mit z.T. calcitisch-ankeritischer Matrix<br>Mols-Member: dunkle, siltig-sandige Tonsteine, Karbonatgehalt $\leq 5\%$ , keine Fossilien | Nur Echinodermenreste, nirgends Echinodermenbrekzien.<br>Im hinteren Gasteretal kalkig ausgebildet.<br>Mit Silt- und Sandsteinen durchsetzt.<br>Keine Kohle im helvetischen Dogger | ++     |
| Lias                               | Im oberen Lias z.T. mächtige Tonschiefer  | Unterer Lias sandig-kalkig.<br>Keine Ähnlichkeit mit dem Lias südl. des Lötschbergs.<br>Lias oft Fossilien führend.  | –      |
| Rhät                               | Marine Ablagerung mit post-Mitteltrias-Alter  | In den benachbarten Profilen (z.B. am Mutthorn) kalkig-mergelig und geringmächtig.<br>Fossilien führend (z.T. mit <i>Avicula contorta</i> ).                                       | –      |
| Trias-Sandsteine (Schilfsandstein) | Pflanzenhäcksel und Kohleschmitzen führende Sand- und Siltsteine  | Meist nur geringmächtig und mit Mergeln assoziiert. Fluviale und lakustrische Ablagerungen.  | –      |
| Perm                               | Klastische, silikatische Sedimente  | Keine bunten Farben. Das angrenzende, als (frühes) Perm eingestufte Schichtpaket ist klar anders ausgebildet.  | –      |
| Karbon                             | Gleiche Lithologie (nur klastische Sedimente), kohlehaltig  | Karbonatführung ungewöhnlich für Karbon.<br>Generell nichtmarin, d.h. unvereinbar mit den marinen Dinoflagellatenzysten  | +      |

Quarzsandsteine mit eckigen Komponenten. Der Anteil Quarzkörner beträgt 40–60%. Als weitere Komponenten treten Karbonatkörner, Glimmer und Opake auf. Die quarzreiche Matrix ist häufig Serizit führend. Die Sandsteine bilden sowohl cm-dicke Lagen wie auch mehrere Meter mächtige, massige Bänke.

Die Siltsteine lassen sich von den Sandsteinen und Schiefeln nicht immer eindeutig abtrennen. Sie sind dunkelgrau bis schwarz und bilden mit den etwas helleren feinsandigen Lagen mächtige, gebänderte Schichtpakete.

Die Schiefer umfassen blättrige, vielfach graphitische, schwarze Tonschiefer mit spiegelglänzenden Schieferungsflächen. Sie enthalten Glimmer und Quarzkörner der Sand- und Siltfraktion sowie organische Beimengungen. Die Schiefer weisen lokal zwar starke Deformationserscheinungen bis hin zu Isoklinalfalten auf, doch sind die Pflanzenreste über weite Strecken nicht oder nur wenig deformiert.

Die Anthrazitlagen sind stets mit Schiefeln assoziiert und bis 1 m mächtig. Der glänzende, schwarze Anthrazit weist einen relativ hohen Tongehalt und dadurch eine schlechte Brennbarkeit auf. Die Anthrazitlagen führten zu zahlreichen Ablösungen im Firstbereich und machten, zusammen mit den starken Konvergenzen, einen schweren, deformierbaren Stahleinbau notwendig. Der Einbau musste wegen der grossen Deformationen streckenweise wiederholt saniert werden. Beim Abbau der Anthrazitlagen entstand zudem sehr viel Staub.

Der Übergang zum Kristallin der nördlichen Randzone des Gastern-Granits besteht aus einer von einzelnen Siltlagen durchsetzten Grauwacke mit eckigen, bis cm-grossen, grau-grün-schwarzen Gesteinsbruchstücken und aufgearbeitetem granitischem Material.

Gesamthaft gesehen stellt die zwischen Lauterbrunnen-Kristallin und Gastern-Granit durchhörte Sedimentzone ein ehemaliges, vermutlich durch steile Brüche begrenztes Permokarbonbecken dar. Dieses wurde beim alpinen Zusammenschub des Aar-Massivs mitsamt seiner mesozoischen Bedeckung durch die nach Norden vordringenden Decken aufgestaucht und von dem sich verformenden Nordrand des Gastern-Granits überdeckt.

### 3.3.2 Lauterbrunnen-Kristallin

Im Gebiet zwischen dem Gastern- und dem Lauterbrunnental wird der Nordrand des Aar-Massivs durch das Lauterbrunnen-Kristallin gebildet. Es handelt sich um einen migmatischen Gneiskomplex (OLSEN et al. 2000) mit zahlreichen, unterschiedlich grossen Fremdgesteinsschollen (HÜGI et al. 1988). Letztere bestehen hauptsächlich aus Biotitgneisen in allen Stadien der Auflösung. Charakteristisch sind bis cm-grosse, grüne Pinitflecken (= umgewandelter Cordierit, Fig. 3-5). Das Lauterbrunnen-Kristallin wurde nur dort als separate Einheit ausgeschieden, wo es



Fig. 3-5: Pinitester im Lauterbrunnen-Kristallin.

sich in einem grösseren Bereich problemlos vom ursprünglichen Altkristallin abtrennen liess.

Das Kristallin besteht aus granitisch-granodioritischen Gneisen mit generell schwach ausgeprägter Schieferung. Diese zeigen verschiedentlich ein migmatitisches, häufig mittelkörniges und lokal porphyrisches Gefüge. Der Biotit ist stets unterschiedlich stark chloritisiert und die Feldspäte z.T. vollständig serizitisiert. Abschnittsweise treten auch helle, massige Biotitgneise auf, die eine starke Ähnlichkeit zum Gastern-Granit aufweisen.

Das mit dem Basistunnel durchquerte Lauterbrunnen-Kristallin (s. Taf. II) bildet einen von autochthoner Trias und autochthonem Dogger bedeckten Rücken unter dem Gasteretal. Die obersten Meter dieses Kristallins zeigen eine auffällige rot-grüne Verfärbung (Fig. 3-6). Dies belegt, dass die Oberfläche dieses Rückens im Perm der Verwitterung ausgesetzt war. Ebenfalls auffällig ist der hohe, vermutlich mit der nahen Trias zusammenhängende Gehalt an Pyrit. Dieser ist grösstenteils sekundär auf Klüftflächen gewachsen.

Die Gneise des Lauterbrunnen-Kristallins weisen ein Alter von  $445 \pm 2$  Mio. J. auf (SCHALTEGGER 1993). Der Zeitpunkt der partiellen Aufschmelzung ist noch nicht eindeutig geklärt. Die Migmatisierung ist aber mit Sicherheit zumindest etwas älter als der Gastern-Granit, da derselbe im hinteren Gasteretal intrusiv ins Lauterbrunnen-Kristallin eingedrungen ist.

### 3.3.3 Gastern-Granit

Beim Gastern-Granit handelt es sich um einen grau-weißen, massigen, gleichkörnig-mittelkörnigen Biotitgranit mit einer mittleren Korngrösse von 2–3 mm. Vereinzelt treten feinkörnige felsische Xenolithe von meist nur wenigen cm Durchmesser auf. Entlang von Klüften sind z.T. biotitfreie, cm-breite Säume ausgebildet, die hydrothermalen Ursprungs sind. Die Plagioklase sind meist polysynthetisch verzwillingt und körnig bis subidiomorph, die Kalifeldspäte oft porphyrisch und leicht korrodiert. Quarz ist mit 20–40% vertreten und zeigt meist undulöse Auslöschung, Subkornbildung und in tektonisierten Zonen auch Trümmerstruk-



Fig. 3-6: Permische Verwitterung des Lauterbrunnen-Kristallins.

tur. Bei km 31,620 (Weströhre) wurde eine tektonische Brekzie beobachtet (Fig. 3-7). Der genaue Verlauf und die Bedeutung dieser Störungszone blieben allerdings unklar.

### Nördliche Randzone

Ab km 30,590 (Weströhre) bzw. km 30,550 (Oströhre) wurde nach der Durchörterung des Anthrazit führenden Karbons über rund 600 m Kristallin aufgefahren, das im Prognoseprofil Injektions- und Assimilationszone des Gastern-Granits genannt wurde. Im vorliegenden Schlussbericht wird diese Zone als Nördliche Randzone des Gastern-Granits bezeichnet.

Wie RUTISHAUSER (1973) zeigte, besteht im Gebiet des hinteren Gasteretals randlich des eigentlichen Gastern-Granits eine breite Zone mit partiell aufgeschmolzenen Gneisen des Altkristallins. Der Gastern-Granit ist mit diesen anatektischen Gneisen stofflich eng verwandt, unterscheidet sich mit seiner massigen Textur aber deutlich von diesen. In der vom Karbon aus ins Kristallin vorgetriebenen, 471 m langen horizontalen Erkundungsbohrung wie auch im späteren Tunnelvortrieb wechselten mehr oder weniger massige, granitische Intervalle mit unterschiedlich stark aufgeschmolzenen Paragneis-Intervallen (mehrheitlich ehemalige Sandsteine). Bräunliche und rötliche Scholleneinschlüsse mit diffusen Rändern waren häufig.

Gemäss RUTISHAUSER & HÜGI (1978) ist der Gastern-Granit aus vollständig aufgeschmolzenem und homogenisiertem Altkristallin entstanden. Er wäre demnach praktisch vor Ort entstanden und nicht, wie von anderen Bearbeitern angenommen, aus grösserer Tiefe aufgestiegen. Auf dem Befundprofil wird die «Mischzone», die Altkristallin, Lauterbrunnen-Kristallin und granitische Partien enthält, vereinfachend mit zum Gastern-Granit gezählt.

Eindeutige Intrusivkontakte wurden im Basistunnel keine beobachtet. Das Gefüge wird vielfach von zerbrochenen Feldspatkörnern und dynamisch rekristallisierten Quarzkörnern dominiert. Vereinzelt sind auch Epidotminerale vorhanden, die nach der Deformation gewachsen sind. Auf die Frage, ob diese Deformationen der variszischen oder der alpinen Orogenese zuzuordnen seien, konnte keine sichere Antwort gefunden werden. Der Granit ist



Fig. 3-7: Tektonische Brekzie im Gastern-Granit.

mehrheitlich recht stark geklüftet. An Gängen fanden sich geringmächtige Aplite sowie Quarz- und Granitporphyre.

#### **Südliche Randzone**

Die südliche Randzone (s. Taf. III) wird durch fein- bis grobkörnige, lagenweise stark vergneiste Granite mit wechselndem Biotitgehalt gebildet. Die feinkörnige Varietät ist oft hornfelsartig und z.T. porphyrisch. Auch die mittel- bis grobkörnigen Granite wiesen z.T. bis cm-grosse Feldspatporphyroblasten auf (Fig. 3-8). Die Grenze zum Altkristallin wurde bei km 36,69 gezogen, wo zum ersten Mal eine dünne Lage Hornfels auftritt.

Rb-Sr-Datierungen an Biotiten ergaben für den Gastern-Granit ein Mindestalter von  $271 \pm 11$  Mio. J. und die Bestimmung an Zirkonen ein Bildungsalter von  $303 \pm 4$  Mio. J. (SCHALTEGGER 1993).

#### **3.3.4 Autochthon zwischen Gastern-Granit und Löttschental (Permokarbon, Trias, Jungfrau keil, Sedimenteinschuppungen, Karbon von Ferden)**

##### **Permokarbon**

Bei km 36,875 und km 36,878 (Oströhre) bzw. km 36,881 und km 36,888 (Weströhre) sind dunkle Phyllite (nur Oströhre), Tonschiefer, stark quarzhaltige, schiefrige Gneise bis Quarzite und Metakonglomerate in die altkristallinen Gneise eingeschaltet. Aus lithologischen Gründen wird vermutet, dass es sich um Permokarbon handeln könnte. Fossilien wurden jedoch keine gefunden.

##### **Autochthon mit Trias/Lias**

Im Zugangs- und Lüftungsstollen (ZLS) wurden bei Tm 475–480 (entspricht ca. km 36,958 in der Weströhre) dunkle Kalke und Kalkschiefer, stark geschieferte, bräunliche, pyrit-haltige Sandsteine sowie schwach kalkhaltige, grünliche Tonschiefer durchörtert. Es handelt sich zweifelsfrei um wenig metamorphe Sedimente, wobei die Tonschiefer an die Quarten-Formation erinnern (in den Basistunnelröhren wurden keine derartigen Sedimente angefahren). Sie werden als Reste der autochthonen Sedimentbedeckung des Gasternrückens interpretiert (Kap. 3.3.1).

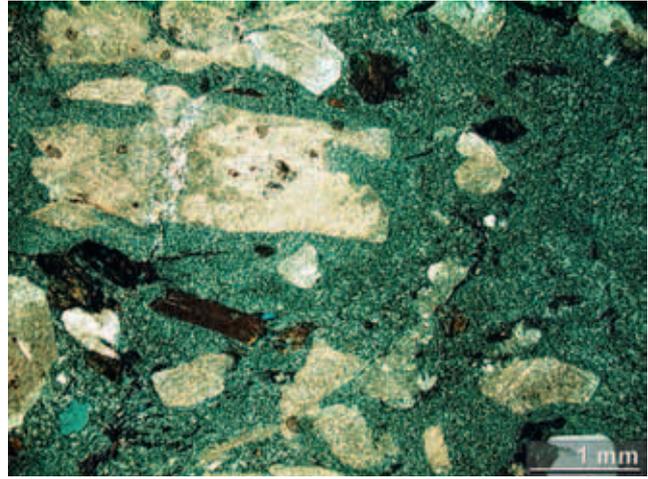


Fig. 3-8: Feldspatporphyroblasten (Randzone des Gastern-Granits).

#### **Jungfrau keil**

Der Jungfrau keil stellt einen tief ins Kristallin hinunter reichenden, zerschuppten Überrest der mesozoischen Sedimentbedeckung dieses Gebietes dar (Fig. 3-9). Er wurde mit dem Basistunnel zwischen km 36,955 und km 36,995 (Oströhre) bzw. km 36,971 und km 37,015 (Weströhre) durchörtert. Im Zugangsstollen zur Weströhre (ZLS) wurde er ebenfalls angetroffen.

Der Jungfrau keil ist auf Basistunnelniveau wesentlich anders zusammengesetzt als auf Niveau des Scheiteltunnels. Es sind zwar ebenfalls zwei mit Trias einsetzende, invers gelagerte Schichtpakete vorhanden. Doch fehlt dem südlichen Paket im Basistunnel der Lias, der im Scheiteltunnel zwischen Trias und der Echinodermenbrekzie des Doggers eingeschaltet ist. Im nördlichen Paket ist im Basistunnel Trias und Lias, im Scheiteltunnel dagegen Trias, Dogger und Malm vorhanden.

Die Existenz der zwei südlich des Jungfrau keils gelegenen Sedimenteinschuppungen wurde erstmals mit der vor dem Bau ausgeführten Sondierbohrung Bärsol nachgewiesen. Diese durchquerte die beiden Einschuppungen rund 200 m oberhalb des Basistunnels.

Die nördlichere der beiden Sedimenteinschuppungen wurde zwischen km 37,173 und km 37,192 (Oströhre) bzw. km 37,198 und km 37,215 (Weströhre) gequert und die südlichere zwischen km 37,230 und km 37,263 (Oströhre) bzw. km 37,234 und km 37,277 (Weströhre). Beide wurden auch mit dem ZLS (Fig. 3-10) durchörtert. Die aufgefahrene Sedimentabfolge (Taf. I) umfasst Basissandstein, Anhydritmarmor, Dolomit und Tonschiefer (Trias), Kalk- und Tonschiefer, Kalke und Sandkalke sowie feinkörnige Sandsteine (Lias) und Tonschiefer (Dogger: Aalénien). Die zeitliche Zuordnung erfolgte durch den Vergleich mit den von SCHLÄPPI (1980) publizierten Profilen. Fossilien wurden keine gefunden. Wie aus dem Horizontalschnitt (Fig. 3-10) ersichtlich ist, keilen die einzelnen Einheiten sehr unregelmässig aus.

Am Südrand der südlichen Sedimenteinschuppung (= Sedimenteinschuppung 1) ist am Kontakt zwischen Trias und Altkristallin stellenweise der Basissandstein erhalten geblieben. Dies beweist, dass dieses Triaspaket invers gelagert ist.

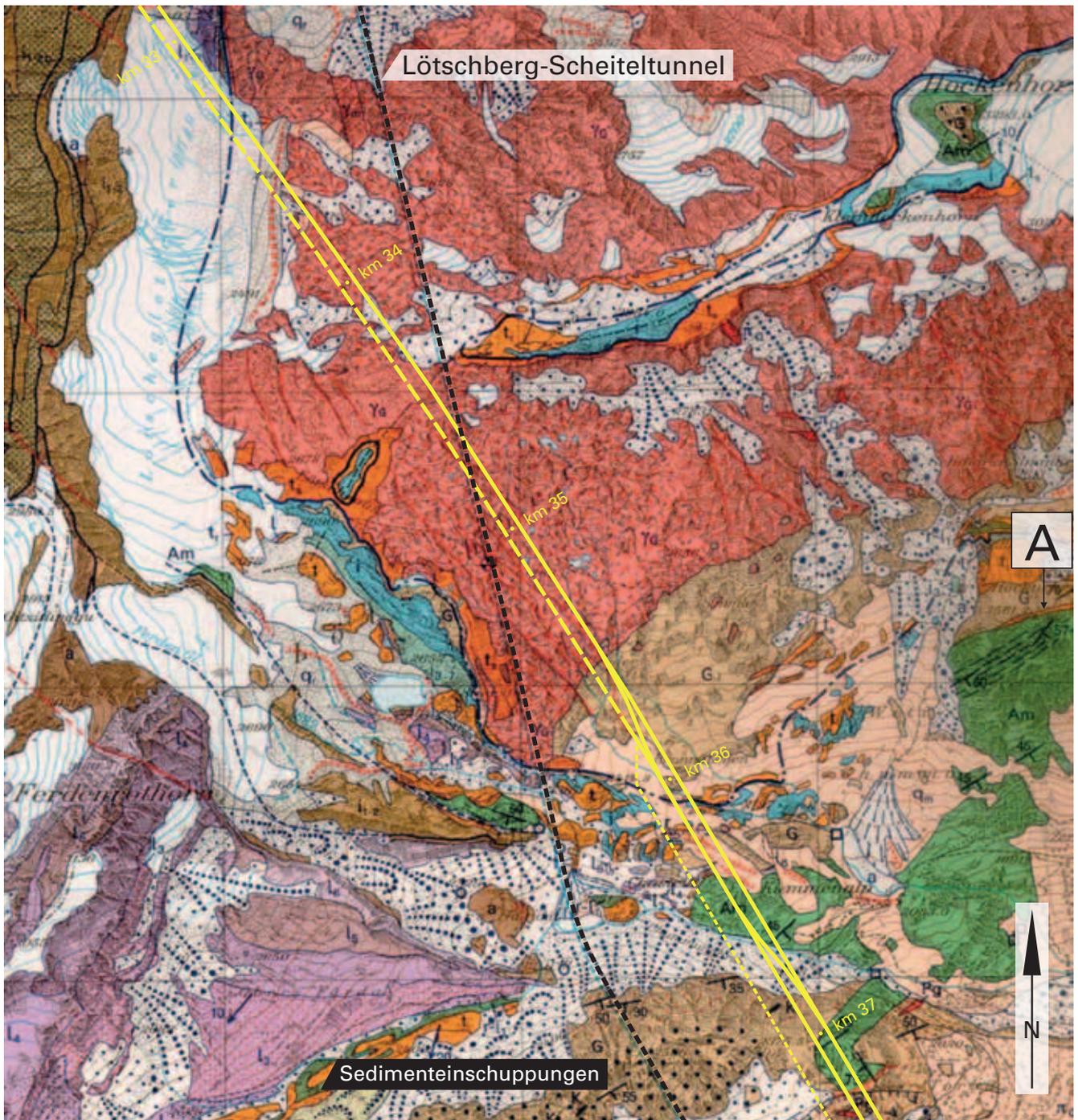


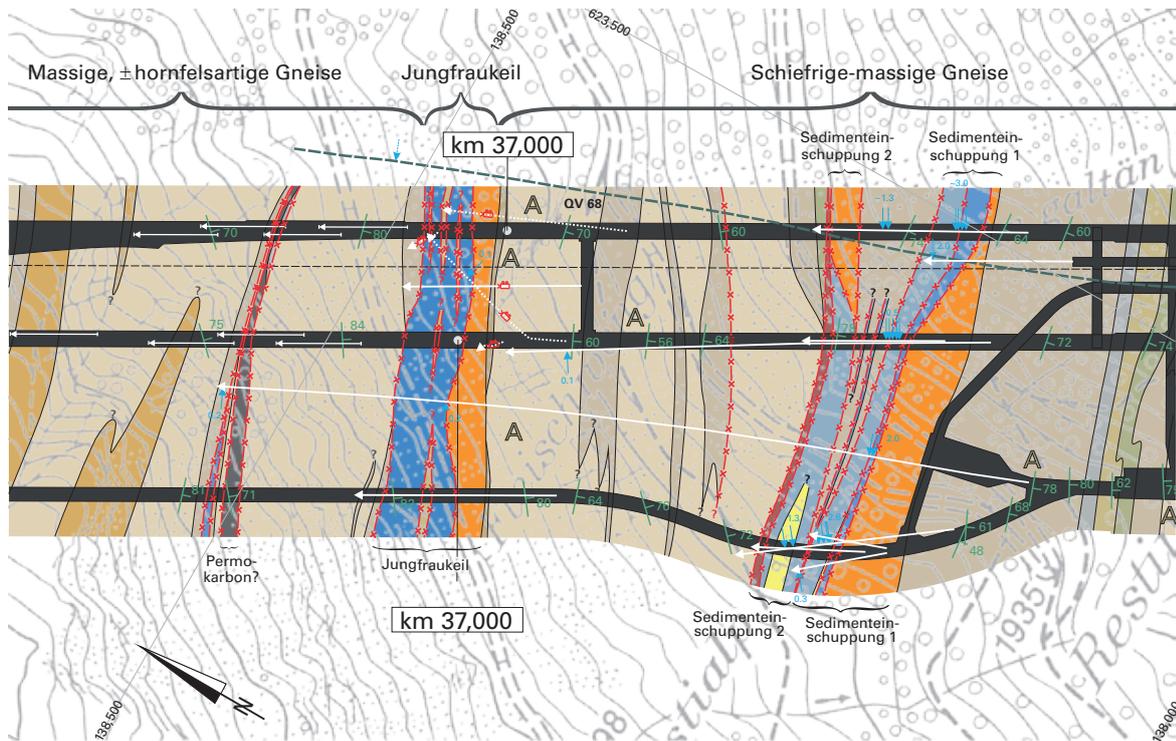
Fig. 3-9: Ausschnitt aus Blatt Lötschental des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25 000 (HÜGI et al. 1985; A = Triaslamelle, s. Text).

Die beiden Sedimenteinschuppungen werden durch schiefrigen Chlorit-Serizitgneis mit lokal eingeschuppten Kalkschieferlagen und zahlreichen Calcit- und Quarzadern voneinander getrennt. Es handelt sich um eingeschupptes bzw. mitgeschlepptes Altkristallin. Dessen Mächtigkeit variiert zwischen rund 40 m in der Oströhre und 1–3 m im ZLS.

#### ***Tektonische Interpretation***

Die Neukartierungen des Jungfrauokeils im Gebiet des Lötschenpasses durch SCHLÄPPI (1980), CRESTIN (1990) und WAGNER (2002) haben bestätigt, dass der Jungfrauokeil eine

intensiv verschuppte und zerscherte Zone darstellt. Dies gilt auch für die im Basistunnel angetroffene Abfolge. Die Korrelation der oberflächlich anstehenden Einheiten mit den im Scheiteltunnel und im Basistunnel angetroffenen Sedimenten ist wegen der sowohl in horizontaler wie auch vertikaler Richtung unregelmässig auseinanderweichenden, teils kompetenten, teils inkompetenten Schichten schwierig und wurde denn auch von den bisherigen Bearbeitern sehr unterschiedlich vorgenommen. Der Name «Sattlegi-Synklinale» ist irreführend, da es sich, im Gegensatz zur weiter östlich gelegenen Färnigen-Mulde, nicht um eine einfache Synklinale handelt.



### LITHOLOGISCHE EINHEITEN

#### Sedimentbedeckung

##### Sedimenteinschuppungen

|  |  |   |             |
|--|--|---|-------------|
|  | Tonschiefer mit Kalkschieferereinschaltungen                                     | } | Lias/Dogger |
|  | Kalkarmer Sandstein und Quarzit  |   |             |
|  | Kalke und Kalkschiefer, ±sandig, z.T. mit dünnen Sandstein- und Tonschieferlagen | } | Trias       |
|  | Kalk- und Tonschiefer  |   |             |
|  | Anhydritmarmor, Dolomit und Schiefer   |   |             |

##### Jungfrau keil

|  |  |   |               |   |            |
|--|--|---|---------------|---|------------|
|  | Kalke, Kalk- und Tonschiefer und Sandstein/Quarzit | } | Jungfrau keil | } | Trias/Malm |
|  | Anhydritmarmor, Dolomit und Schiefer               |   |               |   |            |

#### Grundgebirge

|  |  |   |               |
|--|--|---|---------------|
|  | Permokarbon?   | } | Permokarbon?  |
|  | Chlorit-Serizit-Phyllit mit Schieferzwischenlagen und dünnen Kataklastiten         |   |               |
|  | Serizit- und Chlorit-Serizit-Schiefer  | } | Altkristallin |
|  | Wechsellagerung von Chlorit-Serizit-Schiefer und schiefrigem Chlorit-Serizit-Gneis |   |               |
|  | Schiefriger Chlorit-Serizit-Gneis  |   |               |
|  | Massiger Gneis mit variablem Anteil an Chlorit, Serizit, (Biotit)                  |   |               |
|  | Feinkörniger hornfelsartiger Chlorit-Serizit-Gneis                                 |   |               |
|  | Amphibolit, amphibolhaltiger Gneis   |   |               |

#### ZEICHEN

|  |  |
|--|--|
|  | Lithologische Grenze   |
|  | Bedeutende Überschiebung   |
|  | Sondierbohrung (projiziert von Geländeoberfläche)                                |
|  | Vorausbohrung, gekernt   |
|  | Vorausbohrung, gekernt, mit Bohrlochscanning                                     |
|  | Zerstörende Bohrung, mit Bohrlochscanning  |
|  | Vorausbohrung, zerstörend, mit Bohrparametereaufzeichnung                        |
|  | Grösserer temporärer Wasserzutritt in l/s  |
|  | Wasserzutritt in Sondierbohrung (≤15 m über bzw. unter Niveau Horizontalschnitt) |
|  | Streichen und Fallen der Schieferungsflächen                                     |

Fig. 3-10: Horizontalschnitt im Bereich Jungfrau keil – Sedimenteinschuppungen.

# Hockenhorn

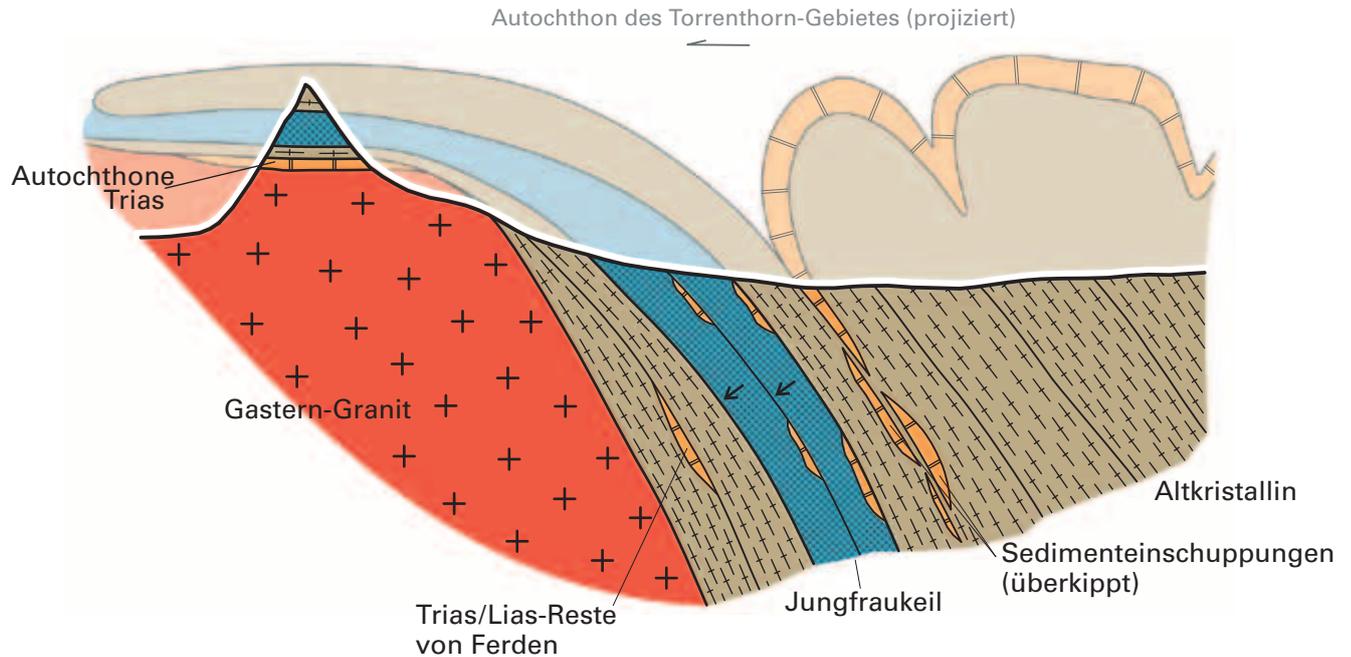


Fig. 3-11: Schematische Darstellung der Korrelationen im Gebiet des Jungfraukeils.

Die folgenden, im Basistunnel und den Sondierbohrungen beobachteten Sachverhalte sind für eine Gesamtinterpretation bedeutungsvoll:

- Von Norden nach Süden wurde die folgende Abfolge durchörtert: Gastern-Granit + Altkristallin – Trias/Lias-Reste von Ferden – ca. 15 m Altkristallin – Jungfraukeil – ca. 180 m Altkristallin – Nördliche Sedimenteinschuppung – ca. 60 m Altkristallin – Südliche Sedimenteinschuppung – Altkristallin + Schieferzone «Kummenalp».
- Die Trias im Jungfraukeil und in den Sedimenteinschuppungen ist verkehrt gelagert bzw. überkippt und setzt vielerorts mit dem Basissandstein ein. Letzteres deutet auf eine autochthone Bildung hin. Es wurden weder Synklinalen noch «Normalschenkel» festgestellt.
- Im Malm-Kalk am nördlichen Kontakt des Jungfraukeils wurden mit Hilfe von Dünnschliffuntersuchungen SW-NE orientierte Aufschiebungen nachgewiesen (O.A. Pfiffner, unpubl.). Gleiches dürfte auch für die südlicheren Störungszonen gelten. Die an mehreren Stellen innerhalb der Sedimente beobachteten horizontalen Strömungen deuten auf zusätzliche Horizontalverschiebungen hin.
- Sowohl das Altkristallin wie auch die Malm-Kalke sind während der alpinen Gebirgsbildung auch plastisch deformiert worden.
- Der Jungfraukeil wurde sowohl mit dem Basistunnel wie auch mit dem Scheiteltunnel durchfahren. Die Sedimenteinschuppungen dagegen wurden nur im Basistunnel angetroffen.
- Die Wasserführung war in der südlichsten Sedimenteinschuppung am stärksten. Innerhalb derselben war der Zufluss in der Weströhre stärker als in der Oströhre. Der Jungfraukeil selber führte auf Basistunnelniveau nur wenig Wasser.

- Die parautochthone Doldenhorn-Decke stellt keine einfache Deckfalte dar. Sie besteht vielmehr aus mehreren, übereinander geschobenen Gleitbrettern (Kap. 3.2.5).
- Für die Existenz der von SCHLÄPPI (1980) und ZWAHLEN (1993) postulierten Kandertal-Störung konnten im Basistunnel keine Beweise gefunden werden.

Aufgrund dieser Befunde werden die folgenden Korrelationen favorisiert (s. Fig. 3-11 und Atlasblatt Lötschental):

- Am Nord- und Ostrand des Gastern-Granits, im Bereich des Lötschenpasses und am Gasterngrat (Hockenhorn – Birghorn) sind Reste der ursprünglichen autochthonen Triasbedeckung (Basissandstein, Dolomit, wenig Lias) erhalten geblieben. Solche sind auch im Altkristallin unmittelbar nördlich bzw. direkt am Jungfraukeil zu finden.  
Die in gleicher Stellung auf Basistunnelniveau angetroffenen Trias/Lias-Reste werden deshalb zum Autochthon des Gastern-Rückens gezählt.
- Die überschobenen und am Gasterngrat als Klippen (Hockenhorn, Sackhorn, Elwertätsch und Birghorn) erhalten gebliebenen Sediment- und Kristallinreste sind von einem Kalkmylonit unterlagert, der plastisch deformierten Malm-Kalk darstellt und inverse Lagerung aufweist. Dieser Kalkmylonit hängt, wie am Lötschenpass und auch an der Sattlegi gut sichtbar, mit dem Malm des Jungfraukeils zusammen. Auf Niveau Basistunnel fehlt er. Dies bedeutet, dass der unter das Kristallin eingewickelte und überschobene Malm-Kalk oberhalb des Basistunnels auskeilt. Möglicherweise war das ursprüngliche Sedimentationsbecken im Norden durch eine steile Störung begrenzt.
- Der Gipfel des Hockenhorns ist aus Amphibolit und Altkristallin aufgebaut, das von der Südseite des Gas-

tern-Granits her überschoben wurde. In diesem Zusammenhang speziell erwähnenswert ist eine am Hockenhorn zwischen Malm und autochthoner Trias eingeschaltete Lamelle aus Gastern-Granit, die nördlich des Jungfraukeils abgeschürft und mitgeschleppt wurde (COLLET 1947).

Man kann den Jungfraukeil zusammen mit den beiden westlich bzw. südlich des Lötschenpasses vorhandenen Amphibolitspänen und den am Gasterngrat aufgeschlossenen Sedimentresten und Kristallinklippen zu einer eigenständigen «Hockenhorn-Mutthorn-Schuppe» zusammenfassen, wie dies HÄNNI (1999) angeregt hat. Diese Schuppe würde unter der eigentlichen Doldenhorn-Decke liegen.

Der Jungfraukeil wäre bei dieser Modellvorstellung nicht mehr länger die Wurzelzone der Doldenhorn-Decke. Deren Gleitbretter wären von der ursprünglich vorhandenen Sedimentbedeckung südlich des Jungfraukeils abgeschert, hoch über dem Gasterngrat nach Norden geschürft und übereinander geschoben worden.

- Die beim Hockenkreuz (Hockchriz, Pkt. 2561 m) aufgeschlossene, rund 500 m lange Triaslamelle (mit autochthonem Basissandstein) kann als Teil der Umhüllung einer zweiten, höheren Kristallinlamelle interpretiert werden (Stelle A in Fig. 3-9).
- Wie auf Blatt Lötschental des Geologischen Atlas (HÜGI et al. 1985) dargestellt, wird der Jungfraukeil vom Chastelli bis zum Hockenkreuz von einer 100–150 m mächtigen Zone mit Altkristallin begleitet. Zwischen dieser und dem angrenzenden Amphibolitzug sind oberhalb des Basistunneltrassees Reste eines schmalen Sedimentzuges mit Trias und Lias aufgeschlossen.

Dieser Sedimentzug wird mit den Sedimenteinschupungen im Basistunnel korreliert, die durch rund 180 m Altkristallin vom Jungfraukeil getrennt sind und sich vermutlich in die bereits erwähnten Basissandsteine beim Hockenkreuz fortsetzen. Die bedeutende Wasserführung in den Sedimentschuppen hängt möglicherweise mit dem Färdbach zusammen, der diesen Sedimentzug westlich des Tunneltrassees quert.

### **Karbon von Ferden**

Zwischen km 38,562 und km 38,570 (Oströhre) bzw. km 38,585 und km 38,594 (Weströhre) ist das auch oberflächlich anstehende und früher ausgebeutete Karbon von Ferden durchquert worden. Es handelt sich um praktisch senkrecht stehende, graphitische Tonschiefer und Serizitphyllite mit geringmächtigen Anthrazitlinsen und -lagen, Sandsteinen bis Feinkonglomeraten sowie boudinierten, spröden Quarziteinschaltungen. In den Vortrieben wurden keine Fossilien gefunden. Die Schichten sind jedoch mit Pflanzenfunden als Karbon datiert worden.

Die Mächtigkeit dieses Karbonvorkommens nahm von ca. 60 m an der Oberfläche auf rund 8 m im Fensterstollen Goppenstein ab (Überdeckung rund 600 m) und wies im Basistunnel mit 8–9 m etwa dieselbe Mächtigkeit auf wie im rund 150 m höher gelegenen Fensterstollen. Das ganze Schichtpaket und insbesondere die Kontakte sind tektonisch stark überprägt. Am südlichen Kontakt ereignete sich beim Auffahren des Fensterstollens (im Sprengvortrieb) ein grös-



Fig. 3-12: Verschütteter Dumper im Karbon von Ferden (Fensterstollen Ferden, 4. März 2000).

serer Niederbruch, bei dem ein Dumper verschüttet wurde (Fig. 3-12).

### **3.3.5 Altkristallin südlich des Gastern-Granits (Autochthon Süd)**

Ab km 36,688 (Weströhre) bzw. km 36,689 (Oströhre) setzt südlich des Gastern-Granits wieder Altkristallin ein. Es stellt, wie das nördlich des Gastern-Granit gelegene Lauterbrunnen-Kristallin, einen von mehreren Metamorphosen überprägten Gneis- und Schieferkomplex dar, in den lokal Karbonsedimente eingeschuppt bzw. eingemuldet sind. Das «südliche» Altkristallin ist ebenfalls mehrheitlich aus Paragneisen und -schiefern aufgebaut, jedoch kaum migmatisch.

Das Altkristallin wurde in die folgenden Abschnitte gegliedert (von N nach S):

- massige, ± hornfelsartige Gneise
- schiefrig-massige Gneise
- Bändergneise
- Amphibolite
- dunkle, massige Gneise
- granitische Gneise (Schollengneise)
- Altkristallin beim Portal Raron

Diese Einteilung basiert auf gut zu bestimmenden Unterschieden, wie Farbe und Struktur, und ist jeweils charakteristisch für einen grösseren, zusammenhängenden Gesteinskomplex. Die ausgeschiedenen Einheiten sind im Grossen gesehen recht homogen zusammengesetzt, variieren aber im Detail naturgemäss beträchtlich. Dies bringt es mit sich, dass in den verschiedenen Komplexen untergeordnet praktisch identische Schichtglieder vorhanden sein können.

#### **Massige, ± hornfelsartige Gneise**

Zwischen dem Randbereich des Gastern-Granits und dem Jungfraukeil treten überwiegend massige Chlorit-Serizitgneise auf, mit feinkörnigen, hornfelsartigen Zwischenlagen. Stellenweise sind diese Gneise leicht Biotit führend. Die in diesen Gneisen bei ca. km 36,958 beobachteten Sedi-

mentreste (Lias/Trias) und das bei ca. km 36,800 anstehende Permokarbon wurden weiter oben bereits beschrieben. Im Bereich einiger kleinerer Störungen sind die Gneise stark verschiefert. Die am Kontakt zum Jungfraukeil durchörterten geringmächtigen Chlorit-Serizitschiefer dürften ebenfalls eine Störungszone darstellen. Vereinzelt sind auch dm-mächtige Kataklastite vorhanden.

### **Schiefrig-massige Gneise**

Zwischen km 36,955 und 40,046 (Oströhre) bzw. km 37,015 und 40,084 (Weströhre) dominieren schiefrig-massige Gneise. Es handelt sich um eine relativ gleichförmige Abfolge von Chlorit-Serizitgneisen mit darin eingeschalteten amphibolhaltigen Gneisen, Chloritschiefern und wenigen, einige Meter langen und bis zu dm-breiten Amphibolitlinsen. Fein verteilter Pyrit und Pyrrhotin ist meistens vorhanden, Granat, Biotit, Epidot und Titanit gelegentlich. Speziell erwähnenswert sind einige bei km 39,828 (Weströhre) angetroffene, von Biotit und Talk ummantelte Serpentinlinsen. Zwischen km 37,794 und 37,803 (Oströhre) bzw. km 37,809 und 37,829 (Weströhre) wurden zudem auch vereinzelte Kalksilikatlinsen festgestellt. An Gängen fanden sich wenige Aplite und granitoide Gänge.

An mehreren Stellen wurden dm-grosse Zerrklüfte mit Quarzkristallen (z.T. mit Chloritbelägen), Calcit, Adular sowie Pyrit und Pyrrhotin angeschnitten. Vereinzelt trat auch Bleiglanz und Zinkblende auf. Zwischen km 38,323 und 38,383 der Oströhre fand sich zudem Asbest (Amiant).

In dieser Einheit wurde mit der Tunnelbohrmaschine eine Tagesleistung von 50,1 m erzielt.

### **Bändergneise**

In dieser Einheit dominieren meist massige, untergeordnet auch schiefrige Bändergneise. Sie ähneln den dunklen, massigen Gneisen (s.u.), unterscheiden sich aber von denselben durch die ausgeprägte Bänderung. Darin eingeschaltet sind auch mehrere stark zerbrochene Amphibolitzüge sowie häufige Amphibolitlinsen. Seltener finden sich Serpentinlinsen, hellgrüne Talkschiefer und graphitische Schiefer.

Die Bändergneise sind von hellen, fein- und grobkörnig-porphyrischen Gängen durchsetzt, die bis mehrere Meter mächtig sind. Bei km 40,632 wurde in der Oströhre ein wenige cm mächtiger Erzgang mit Bleiglanz angetroffen. Ein direkter Zusammenhang mit der Erzlagerstätte gegenüber dem Bahnhof Goppenstein ist aber unwahrscheinlich.

### **Amphibolite**

Zwischen ca. km 41,200 und 41,300 (Oströhre) ist eine mächtige, bis an die Erdoberfläche reichende Amphibolitzone durchörtert worden. Der Kontakt zu den weiter südlich einsetzenden dunklen, massigen Gneisen ist scharf, unregelmässig gewellt und von einer Scherzone begleitet. Der Amphibolit ist sehr hart bzw. zäh und besteht praktisch ausschliesslich aus nadeligen, gut eingeregelteten, frischen Amphibolen. Zuweilen treten rosa gefärbte bis weissliche Granate als Nebengemengteil auf. Die Amphibolite sind teilweise gebändert und geadert.

Die Amphibolite und Amphibolgneise zeichnen sich durch tiefe Strahlungswerte aus (s. Fig. 6-3). Mit weniger als 100 cps (counts per second) lieferten sie die tiefsten Werte des ganzen durchörterten Kristallins.

### **Dunkle, massige Gneise**

Es handelt sich um dunkle, meist massige Biotitgneise, die untergeordnet auch gebändert oder schiefrig sein können. Seltener finden sich auch Amphibolite, in Form kleiner, scharf abgegrenzter Linsen und Schollen. Diese werden mit zunehmender Annäherung an die nördlich anschliessende Amphibolitzone häufiger. Im Gefolge dieser Amphibolit-schollen und -linsen tritt häufig Asbest auf (s. Kap. 6.4). Am südlichen Kontakt grenzen diese Gneise mit scharfem Kontakt an die granitischen Schollengneise.

Geringmächtige Aplite (cm-dm) sind häufig. Sie sind oft stark boudiniert. Grobkörnige, helle, porphyrische Gänge waren vor allem im Norden dieser Einheit häufig.

### **Granitische Gneise (Schollengneise)**

Es handelt sich um granitische Gneise mit zahlreichen dunklen Schollen. Der Anteil der Schollen schwankt von 0 bis 75%. Der granitische Gneis, der die Schollen umschliesst, kann in eine feinkörnige, eine grobkörnige sowie eine extrem feinkörnige Varietät mit nahezu rein quarzitischer Matrix unterteilt werden. 55% der granitischen Gneise waren feinkörnig mit durchschnittlich ca. 30% Schollen, 25% waren grobkörnig mit 4% Schollen und rund 20% extrem feinkörnig mit 8% Schollen. Die Vergneisung ist in der Regel schwach und nur in der Nähe der zahlreichen Scherzonen deutlicher ausgeprägt.

Die Schollen sind dunkel bis schwarz, kreisrund bis stark gelängt oder gar eckig («Schollenbrekzie»; Fig. 3-13). Sie sind feinkörnig und homogen oder zoniert, mit einem grobkörnigen bis porphyrischen Zentrum und einem etwas dunkler gefärbten, feinkörnigen Rand. Es sind auch phantomartige Schollen vorhanden, die sich in der granitischen Matrix nur noch schattenhaft abzeichnen. In mächtigeren Scherzonen können sie zu dünnen, mehrere Meter langen Linsen ausgezogen sein. Die «Schollenbrekzien» wurden hauptsächlich im nördlichen Teil dieses Abschnittes gefunden. An Mineralen wurden in den Schollen Biotit, Amphibol, Quarz und Feldspat identifiziert. Die Grösse der Schollen beträgt im Durchschnitt ca. 1 m. Sie berührten sich mit wenigen Ausnahmen nicht.

Anhand der Oberflächenaufschlüsse wird vermutet, dass die Schollengneise eine ältere, eigenständige Einheit darstellen. Es ist aber auch möglich, dass dieselben in enger Beziehung zum Zentralen Aare-Granit stehen (exogene Schollen, Kontaktzone). Ohne aufwendige chemische Untersuchungen ist diese Frage aber nicht zu klären.

### **Störungszonen**

Südlich des Gastern-Granits traten innerhalb des Altkristallins die folgenden, bedeutenden Störungszonen auf:

#### **Schieferzone Kummenalp**

Zwischen km 37,330 und 37,373 (Oströhre) bzw. km 37,356–37,391 (Weströhre) wurde im Altkristallin eine be-



Fig. 3-13: Schollengneis.

deutende Schieferzone aufgeföhren, die aus lokal stark verföhlteten Chlorit-Serizitschiefern mit phyllitischen Zwischenlagen aufgebaut ist. Aufföhrend waren die häufigen schwarzglöhrenden, graphitisch-serizitischen Gleitflöhchen. Die Zone enthöhlt auch untergeordnet Einschaltungen von massig bis schiefrigen Chlorit-Serizitgneisen sowie granitoiden Göhnge. Die kompetenteren Partien waren oftmals boudiniert und Magnetkies- und Pyritvererzungen recht häufig.

#### *Schieferzone Restialp*

Diese Schieferzone wurde in der südlichen Höhlfte der Nothaltestelle Ferden, zwischen km 37,631 und 37,795 (Oströhre) bzw. km 37,640 und 37,810 (Weströhre), durchquert. Es handelt sich um eine 160–170 m breite Zone mit Chlorit-Serizitschiefern, Serizitschiefern mit dazwischen geschalteten Phylliten, mehreren bis 20 cm möhchtigen Kataklasiten sowie schiefrigem Chlorit-Serizitgneis. Aufföhlig waren wiederum die häufigen graphitisch-serizitischen Gleitflöhchen. In dieser Schieferzone traten erhebliche Konvergenzen auf (Kap. 5.2).

#### *Phyllitzone Dornbach*

Die Phyllitzone Dornbach, die an der Oberflöhche sehr pröhgnant in Erscheinung tritt, wurde zwischen km 37,905 und 38,096 (Oströhre) bzw. km 37,921 und 38,109 (Weströhre) gequert. Sie besteht auf Tunnelniveau aus zwei Ästen, die durch eine 70–80 m möhchtige Abfolge von massigen bis schiefrigen, teilweise biotithaltigen Chlorit-Serizitgneisen voneinander getrennt sind. Der nördliche Störungsast besteht zur Hauptsache aus Chlorit-Serizitschiefern mit Zwischenlagen von schiefrigem Chlorit-Serizitgneis und wenigen, geringmöhchtigen Phylliten. Der bedeutendere, südliche Ast umfasst Serizitschiefer und Serizitphyllite mit eingeschalteten Gneislamellen. Beide sind von zahlreichen schwarzglöhrenden Gleitflöhchen durchsetzt. In den stark phyllitischen Bereichen (km 38,003–38,023 der Oströhre bzw. km 38,016–38,039 der Weströhre) waren auch mehrere dünne Kataklasitzonen vorhanden. Bei km 38,065 (Weströhre) wurde zudem eine etwa 10 cm möhchtige Kalkmarmorlinse durchfahren.

#### *Phyllitzone Faldumbach*

Die Phyllitzone Faldumbach wurde zwischen km 38,755 und 38,808 (Oströhre) bzw. km 38,770 und 38,828 (Weströhre) durchöhrt. Es handelt sich um eine Abfolge von dunklen (Chlorit-)Serizitschiefern mit phyllitischen Zwischenlagen und untergeordneten Gneiseinschaltungen (Kap. 7.6).

#### *Kleinere Brüche und Scherzonen*

Flach gegen Norden einfallende Abschiebungen mit Versetzungsbetröhgen im cm- bis dm-Bereich sind im südlichen Altkristallin häufig. Daneben wurden ältere, mylonitische Scherzonen beobachtet, die steil nach Süden einfallen. Die in den Schollengneisen vorhandenen Versetzungen waren in der Regel höhchstens wenige Meter lang und wiesen keine einheitliche Bewegungsrichtung auf.

1–3 m möhchtige, verlehmtete Phyllit- und Ruschelzonen, wie sie aufgrund der Befunde im Scheiteltunnel ca. alle 100 bis 150 m prognostiziert waren, wurden auf Niveau Basistunnel nur selten angetroffen und waren höhchstens wenige dm möhchtig. Subparallel zur Schieferung verlaufende Scherzonen waren dagegen relativ häufig. Diese kleinen Störungen föhhrten zuweilen zu kleineren Ausbrüchen, bildeten aber bautechnisch keine Erschwernis.

### **3.3.6 Zentraler Aare-Granit**

Der Zentrale Aare-Granit weist auf Basistunnelniveau eine scheinbare Möhchtigkeit von rund 1800 m auf. Der gröhste Teil dieses Intrusivkörpers ist mittel- bis grobkörnig ausgebildet. Das zuweilen leicht grünlich geföhrbte Gestein besteht mehrheitlich aus Quarz (35–45%), Kalifeldspat (15–30%), Plagioklas (25–50%) und Biotit (3–10%). Die Feldspäte sind meist deutlich gelöhngt und die dunklen Gemengteile leicht eingeregelt, was die über weite Strecken vorhandene Vergehneisung dieses Intrusivkörpers deutlich hervorhebt.

Das zwischen dem Baltschieder-Granodiorit und dem Zentralen Aare-Granit oberflöhchlich anstehende Altkristallin (s. Atlasblatt Löhtschental, HÜGI et al. 1985) reicht nicht bis in den Basistunnel hinunter. Es wird offensichtlich durch den Zentralen Aare-Granit gegen unten abgeschnitten.



Fig. 3-14: Gneisscholle im Zentralen Aare-Granit (Oströhre km 45,420).



Fig. 3-15: Migmatischer Gneis (Oströhre km 46,253).

Dieser reicht bedeutend weiter nach Süden als vor dem Bau prognostiziert und intrudiert direkt in die migmatischen Gneise des Baltschieder-Granodiorits. Dieser südliche Teil des Zentralen Aare-Granits dürfte der weiter östlich oberflächlich aufgeschlossenen «Grisighorn-Zunge» des Zentralen Aare-Granits entsprechen.

Am südlichen Intrusivkontakt bei km 45,483 ist eine rund 60 m mächtige helle, feinkörnige Randzone ausgebildet. Diese aplitische Randfazies zeichnet sich durch hohe Radioaktivitätswerte aus, die deutlich über den Strahlungswerten des Baltschieder-Granodiorits und auch deutlich über der durchschnittlichen Strahlungsaktivität des mittel- bis grobkörnigen Zentralen Aare-Granits liegen.

Nahe dem südlichen Kontakt enthält der Zentrale Aare-Granit mehrere Meter grosse, dunkle, gerundete Schollen, die eingeschlossene Reste des angrenzenden Baltschieder-Granodiorits darstellen (Fig. 3-14). Ca. 3 m nördlich des Kontakts ist zudem eine bedeutende kataklastische Scherzone ausgebildet. Eine weitere solche wurde auch im Innern des Intrusivkörpers (bei ca. km 44,7 Oströhre) festgestellt, längs der der südliche Teil leicht aufgeschoben wurde.

In dem im Sprengvortrieb aufgefahrenen Tunnel West war der Kontakt in der Sohle schön aufgeschlossen. Über eine Strecke von 27 m wechselt das Gestein vom typischen migmatischen Gneis über einen von Apliten durchzogenen Gneis (5 m) zu chaotisch zerbrochenem und verfaltetem, hellem, gebändertem Gneis (22 m) und weiter zum feinkörnigen, aplitischen Granit der Randfazies.

Am nördlichen Kontakt fehlt die aplitische Randfazies vollständig. LEDERMANN (1945) hat hier aufgrund seiner Feldaufnahmen eine sehr bedeutende Aufschiebung postuliert. Das Fehlen der andernorts auch am Nordrand der Intrusion ausgebildeten, maximale Strahlungswerte zeigenden Randfazies stützt diesen Befund. Der Versatz längs dieser Störung ist beträchtlich. Dabei wurde der südliche Teil um mehrere hundert Meter auf den nördlichen aufgeschoben.

Besonders erwähnenswert sind ferner die recht zahlreichen, mehr oder weniger horizontalen Zerrklüfte, die teilweise von einem bis 10 cm breiten, ausgebleichten Saum umgeben sind, in dem der Granit hydrothermal ausgelaugt und porös ist.

Altersbestimmungen von SCHALTEGGER (1994) haben für den Zentralen Aare-Granit ein Intrusionsalter von  $298 \pm 2$  Mio. Jahren ergeben.

### 3.3.7 Baltschieder-Granodiorit

Der Baltschieder-Granodiorit besteht neben dem eigentlichen Granodiorit aus migmatischen Gneisen. Diese beiden Gesteinstypen sind miteinander durch fließende Übergänge verbunden.

Die granodioritischen Bereiche bestehen aus überwiegend massigem, hellem bis grau-bräunlichem, fein- bis mittelkörnigem Granodiorit. Vereinzelt sind bis zu 2 cm grosse Kalifeldspateinsprenglinge vorhanden. Diese porphyrische Varietät lässt sich an den glatten Tunnelwänden kaum von einem massigen Augengneis des Altkristallins unterscheiden.

Die migmatischen Bereiche bestehen aus  $\pm$  dunklen, nicht gebänderten Biotit-Chlorit-Serizitgneisen (Melanosom) und unregelmässigen, hellen, feldspatreichen Adern, Schlieren und Linsen (Neosom) (Fig. 3-15). Der Biotitgehalt variiert stark. Stellenweise sind die Gneise auch augig ausgebildet, wobei die Porphyroblasten bis 5 cm gross sein können. Das Neosom kann lokal mehrere Meter lange und bis einige dm breite Adern bilden und ist dann von blossem Auge nicht mehr mit Sicherheit von den ebenfalls vorhandenen aplitischen Gängen zu unterscheiden. Hier halfen die Radioaktivitätsmessungen (Fig. 6-3) weiter, da sich die Aplite durch deutlich höhere Strahlungswerte auszeichnen. Dieser Sachverhalt wurde bereits früher in verschiedenen Kraftwerkstollen im Aar-Massiv festgestellt (LABHART & RYBACH 1980).

Die Aplite weisen Mächtigkeiten von wenigen Dezimetern bis zu mehreren Metern auf. Der grösste Gang war mehr als 10 m mächtig. Die Aplitgänge durchdringen die gebänderten Gneise z.T. netzartig oder sind baumförmig verzweigt.

Im Fensterstollen Steg wie auch im Ast Raron des Basistunnels wurde auf einzelnen Klüften Molybdänglanz beobachtet. Vergleichbare Vorkommen wurden während der beiden Weltkriege am Alpjahorn ausgebeutet.

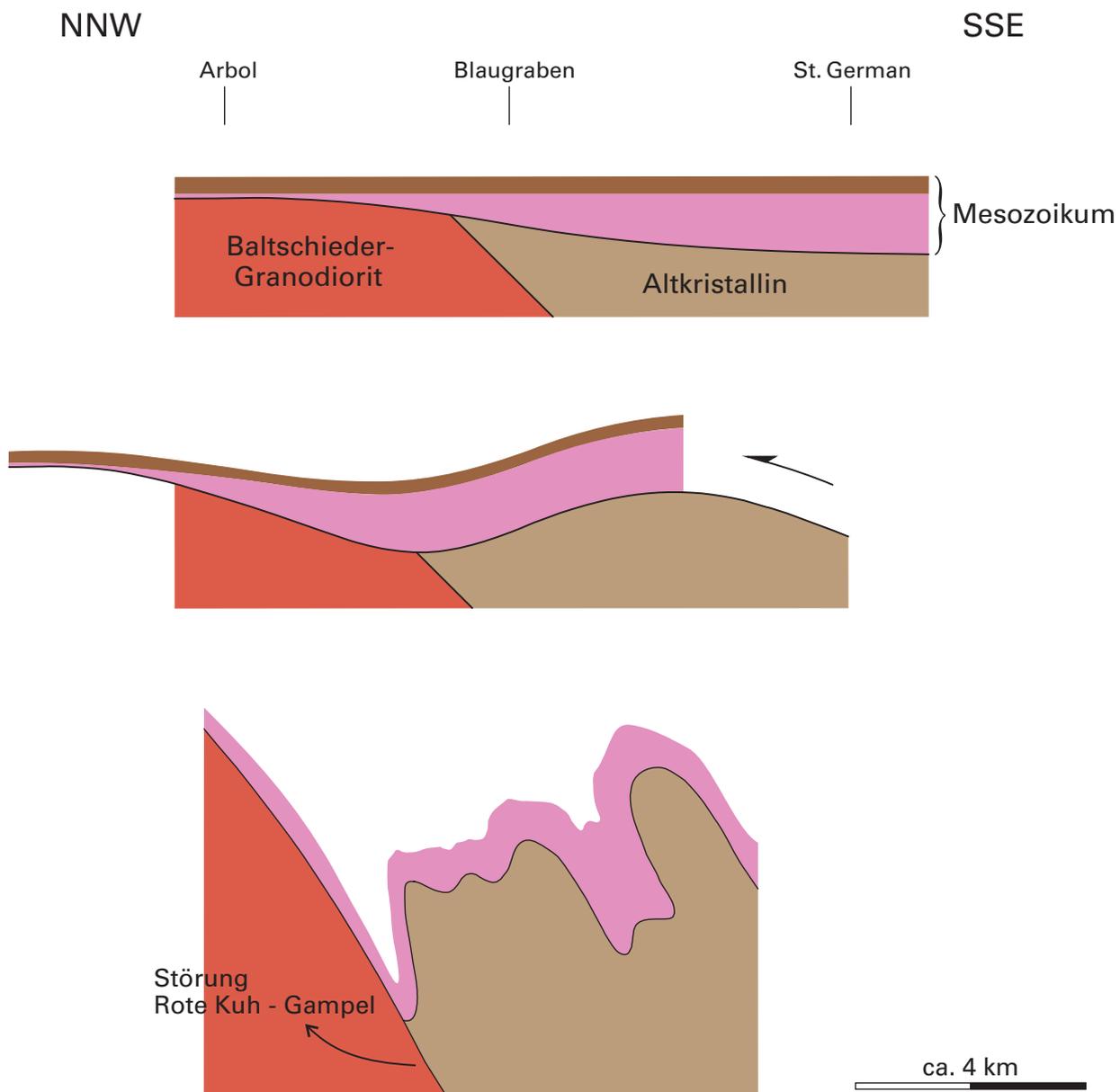


Fig. 3-16: Schematische Darstellung der Synklinalentwicklung südlich des Baltschieder-Granodiorits (aus LOUP 1992, leicht modifiziert).

Bisher sind am Baltschieder-Granodiorit noch keine Altersbestimmungen ausgeführt worden. Die angetroffenen Kontaktverhältnisse belegen jedoch, dass er älter ist als der Zentrale Aare-Granit.

### 3.3.8 Autochthon südlich des Zentralen Aare-Granits (Autochthon Gampel-Baltschieder)

Das Autochthon Gampel-Baltschieder stellt die Reste der ursprünglichen Sedimentbedeckung des zwischen Gampel und Baltschieder anstehenden Altkristallins des Aar-Massivs dar. Die ehemals flach gelagerten Sedimente sind während der Alpenbildung zu einer komplizierten, von engen Isoklinalfalten dominierten Muldenstruktur aufgequetscht worden. Der Tunnel hat von Süden nach Norden die folgenden, generell nach S-SE einfallenden Einheiten durchquert:

- Altkristallin des Aar-Massivs: nördlicher Kontakt überkippt Antiform
- Trias-Schuppenzone: z. T. nichtzylindrische Verfaltungen Synform
- Lias/Dogger: enge, langgestreckte Isoklinalfalten Antiform
- Malm: überkippt, grenzt an die Störung Rote Kuh - Gampel Synform

Vergleichbare Verhältnisse wurden von DOLIVO (1982) im hinteren Baltschiedertal beschrieben, wo diese Muldenstruktur mitsamt dem unterliegenden Kristallin vollständig aufgeschlossen ist. Die hypothetische Entwicklung dieser Struktur ist der Figur 3-16 zu entnehmen.

Die Beschreibung der einzelnen Lithologien ist aus Tafel I ersichtlich. Zu den Kontakten kann Folgendes gesagt werden:

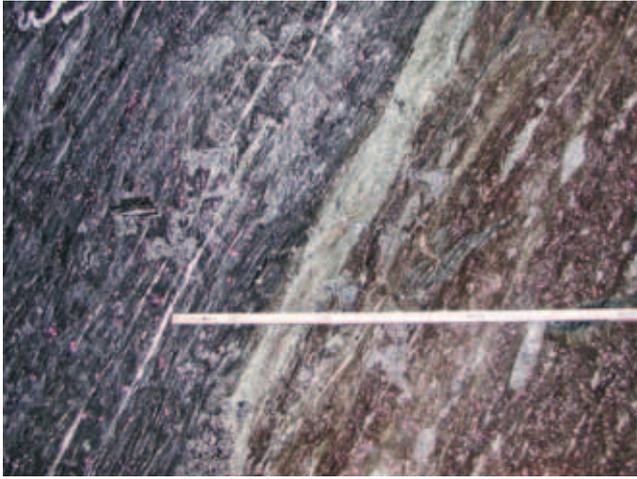


Fig. 3-17: Störung Rote Kuh - Gampel, mit grünlichem Kataklastit (Oströhre, linkes Parament bei km 46,261).

Die Störung Rote Kuh - Gampel trennt den Malm (Quinten-Kalk) vom Baltschieder-Granodiorit. Der Kontakt ist scharf und bei Raron, im Gegensatz zum Fensterstollen Steg, nicht von einer Schuppenzone begleitet. In Kontaktnähe weist der Malm-Kalk Fließstrukturen auf und ist marmorisiert. Daran schliesst ein ca. 30 cm mächtiger, leicht plastischer Kataklastit an (Fig. 3-17). Die ersten Meter des Baltschieder-Granodiorits sind stark verschiefert und mürbe.

Der Kontakt zwischen Malm und Dogger ist sowohl farblich als auch durch das Einsetzen der massigen Kalke gut definiert. Die Grenzziehung zwischen Dogger-Mergeln und Dogger-Kalken gestaltete sich dagegen relativ schwierig, da in den Dogger-Mergeln oft auch kalkigere Lagen anzutreffen sind. Generell zeichnen sich die Dogger-Mergel durch zahlreiche Calcit-Quarz-Adern aus. Die hellgrauen Dogger-Kalke sind nur geringmächtig und an ihrer Wasserführung kenntlich.

Der Übergang zu den «Aalénien-Schiefern», die im oberen Teil ebenfalls kalkig, aber dunkelgrau-schwarz gefärbt sind, ist fließend. Unproblematisch ist die Grenzziehung zwischen dem dunklen, schiefrigen «Aalénien» und den hellen, meist massigen Lias-Kalken. Letztere zeichnen sich zudem durch ihre erhebliche Wasserführung aus. Die Lias-Schiefer sind dagegen häufig nicht von den «Aalénien-Schiefern» unterscheidbar.

Auf Tunnelniveau ist der Übergangsbereich zwischen den Lias-Kalken und der Quarten-Formation der Trias stark verfaltet, so dass die beiden Einheiten mehrmals in das Tunnelprofil eintreten. Die Grenzziehung ist hier deshalb etwas willkürlich. Diskutabel bleibt auch die Zuweisung der lokal vorhandenen schwarzen, graphitischen und z.T. kalkigen Schiefern zum Lias. Möglicherweise handelt es sich nicht um Lias, sondern um Rhät-Schiefer. Innerhalb der Trias ist die Abfolge Dolomit - Rauwacke - grüne Tonschiefer mehrmals repetiert und die meisten Kontakte tektonisch stark überprägt.

Die Trias-Strecke unter der Bergsturzmasse von St. German war, wie prognostiziert, durchwegs stark tektonisiert (Fig. 3-18). Sie wurde deshalb in der Oströhre vorgängig im Sprengvortrieb aufgeföhren. Die Tunnelbohrmaschine wur-

de durch diesen kritischen Abschnitt hindurchgezogen und kam dann wieder in den Lias-Kalken zum weiteren Einsatz. Die unter dem Maachigraben prognostizierte Maachi-Störung liess sich in der stark deformierten Rauwacke nicht sicher lokalisieren.

Die bedeutendste Störung dieses Abschnitts, die Störung Rote Kuh - Gampel, wurde bereits vorgängig beschrieben.

### 3.4 Portalzone Süd

Die Lockergesteine beim Portal Raron (Fig. 3-19) umfassten

- Hangschutt: brauner bis graubrauner, stark siltiger Sand mit reichlich kantigem Kies und Dolomitblöcken. Möglicherweise ist auch Aufschüttungsmaterial daran beteiligt und darunter liegende
- Moräne: stark siltiger Kies mit Steinen und mehrheitlich gerundeten Blöcken aus Altkristallin und Aare-Granit.

Beim Portal Ost liegen die Lockergesteine direkt dem Altkristallin auf, während beim Portal West über dem Altkristallin noch triassischer Dolomit und Basisquarzit angetroffen wurde. Letzterer stellt einen hellgrauen, leicht kalkigen Sandstein bis Feinbrekzie dar, der mit normalstratigraphischem Kontakt auf den Gneisen des Altkristallins liegt und lokal leicht verschiefert ist.

Das Altkristallin beim Portal Raron lässt sich in folgende zwei Haupttypen unterteilen:

- Massiger, meist feinkörniger, heller (Chlorit-)Serizitgneis. Der Chloritgehalt verleiht dem Gestein eine leicht grünliche Färbung. Dieser Gneis spaltet in quaderartige, cm<sup>3</sup>- bis dm<sup>3</sup>-grosse Stücke, seltener in m<sup>3</sup>-grosse Blöcke auf. Die Klüftflächen sind meist rostig angewittert.
- Massiger bis schiefriger, augiger bis flaseriger, dunkler Biotit-Serizitgneis. Die Feldspat-Augen sind zwischen 1 mm und mehreren cm gross. Die Augengneise sind deutlich weniger geklüftet als die (Chlorit-)Serizitgneise und ergaben weniger Überprofil.

Einige geringmächtige Kakiritzonen wurden nahe beim Portal angetroffen. In der Oströhre querte eine weitere den Tunnel zwischen km 48,800 und 48,830 und erzeugte im First ca. 1 m Überprofil.

### 3.5 Trennflächen im Basistunnel

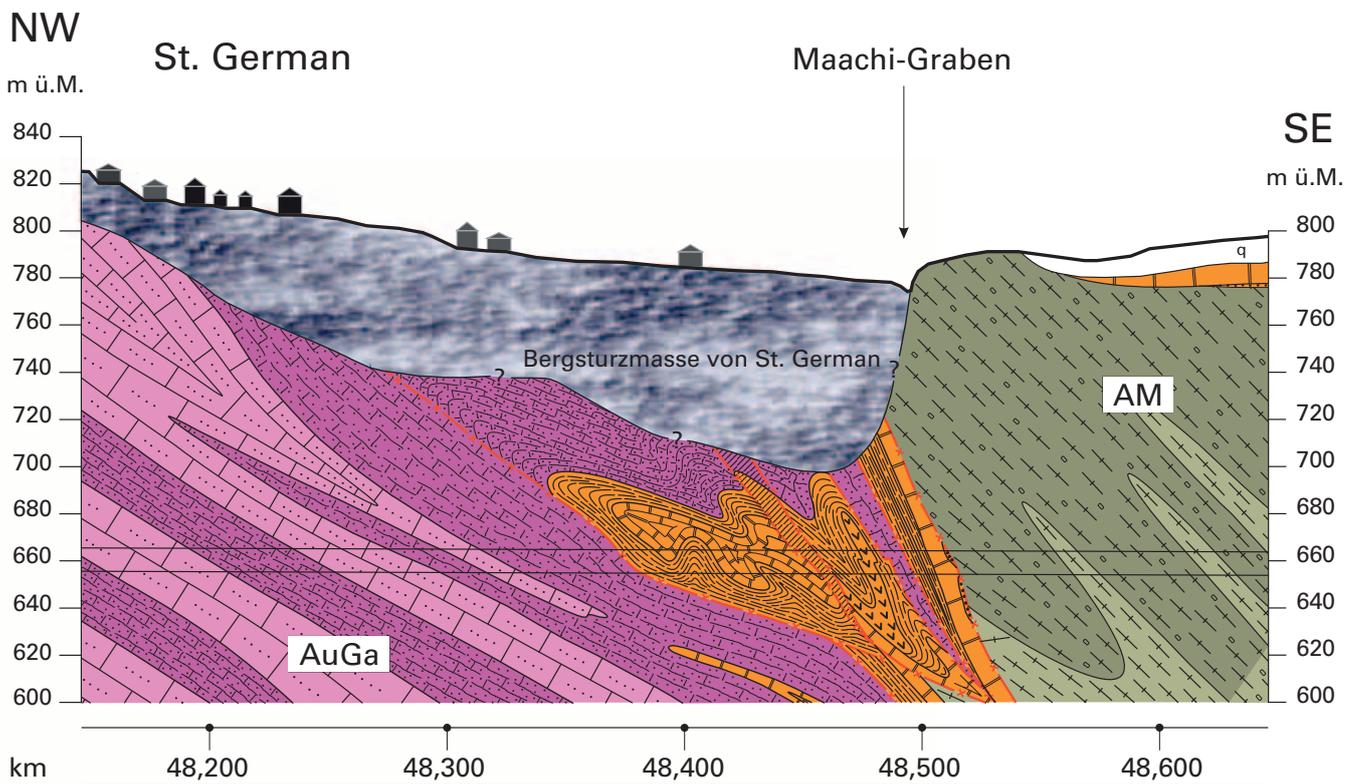
#### 3.5.1 Trennflächen in der Wildhorn-Decke

##### *Schichtung*

Die Schichtflächen im unteren, jurassischen Teil der Schuppen der Wildhorn-Decke fallen mehr oder weniger einheitlich flach nach S bis SE ein. Im oberen, kretazischen Teil dagegen weisen sie eine grössere Streuung auf, was auf die Verkippung einzelner dieser Schichtpakete im Zuge der Überschiebung zurückgeführt wird.

##### *Schieferung*

Die Schieferungsflächen in den Palfris-Schiefern sind vielfach sedimentär vorgegeben und verfaltet. Nur in wenigen Fällen konnte noch eine zweite, diskordante Schieferung



## LITHOSTRATIGRAPHISCHE EINHEITEN

### Sedimentbedeckung

|  |   |         |
|--|---|---------|
|  | Quartär im Allg.                              |         |
|  | Bergsturzmasse von St. German                 |         |
|  | Lias-Kalke: Kalke, Sandkalke, Kalk-Sandsteine | } Lias  |
|  | Lias-Schiefer: Kalk- und Tonschiefer          |         |
|  | Quarten-Formation: Tonschiefer                | } Trias |
|  | Dolomit, mit dünnen Schieferzwischenlagen     |         |
|  | Rauwacke, ±Gips                               |         |
|  | Basissandstein                                |         |

### Grundgebirge

|  |   |                 |
|--|---|-----------------|
|  | Massiger, heller, grau-grüner Chlorit-Serizit-Gneis | } Altkristallin |
|  | Massiger, dunkler Biotit-Serizit-Gneis, augig       |                 |

### TEKTONISCHE EINHEITEN

|      |                                |
|------|--------------------------------|
| AuGa | Autochthon Gampel-Baltschieder |
| AM   | Aar-Massiv                     |

### ZEICHEN

|  |                                |
|--|--------------------------------|
|  | Störungszone Maachi            |
|  | Bruch, Verwerfung, Aufschubung |

Fig. 3-18: Geologisches Profil durch die Trias-Schuppenzone.

festgestellt werden. Es handelt sich um glatte, graphitische, z.T. spiegelige Flächen mit wenig Kohäsion. Wegen der flachen Lagerung kam es beim Auffahren des Tunnels lokal zu plattigen Niederbrüchen bzw. geologischem Überprofil.

### Klüftung

Die räumliche Verteilung der Klüfte zeigt als jüngstes Deformationsereignis in allen Bereichen der Wildhorn-Decke eine gewisse Ähnlichkeit. Die Klüfte sind häufig mit

Calcit und/oder Quarz verheilt und in den spröden, harten Gesteinen generell stärker entwickelt als in den weichen Schieferpaketen. Sie treten häufig in Scharen auf, was sich im Vortrieb dadurch äußert, dass einem stark geklüfteten Bereich ohne ersichtlichen Grund ein Abschnitt mit deutlich geringerer Klüftung folgen kann oder umgekehrt.

Die statistische Auswertung der Klüftflächenorientierung zeigt deutlich das Vorherrschen einer steilen, von SE nach NW streichenden Klüftung (K1-Klüftung). Die prognostizierten Klüftsysteme K2 (NE-SW bis WNW-SSE

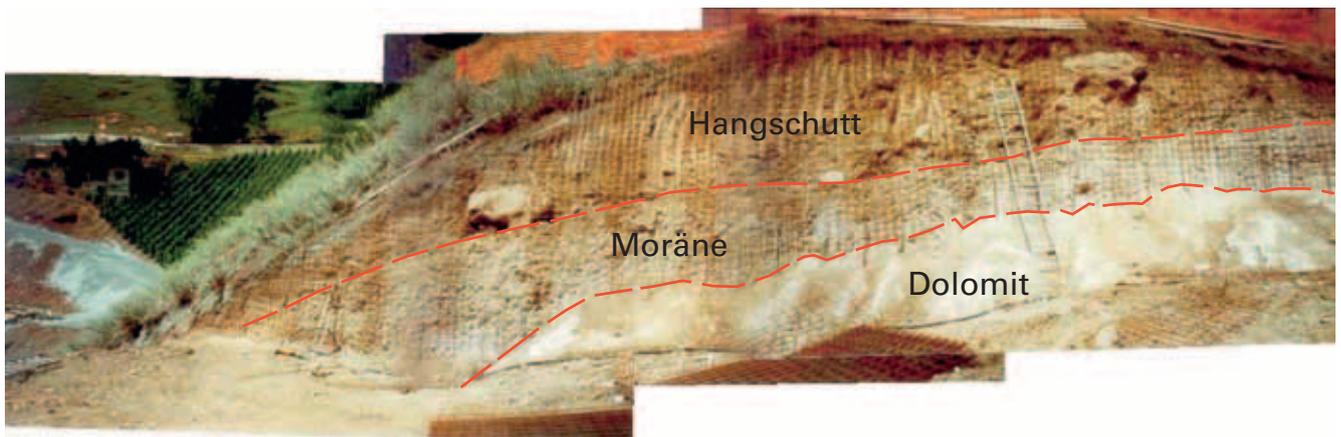


Fig. 3-19: Portal Raron (Hanganschnitt im Bereich der Zufahrt).

streichend, Fallwinkel variierend) und K3 (N-S bis NNE-SSW streichend, steil nach W oder E fallend) traten kaum in Erscheinung. Die flach liegenden K4-Klüfte dagegen machten sich des Öfteren durch unerwartete Aus- und Niederbrüche bemerkbar, da sie über dem First im Voraus nicht sichtbar waren.

#### **Brüche, Scherzonen**

Aus der räumlichen Verteilung der Brüche und Scherzonen ergibt sich kein klares Bild. Die Scherzonen verlaufen tendenziell flacher als die Brüche und liegen ähnlich wie die Schieferung. Die Brüche dagegen verlaufen nicht selten parallel zu den K1-Klüften.

Die Basis der Wildhorn-Decke verläuft im Hangenden der Flysche (Flysch FU und Flysch der Doldenhorn-Decke). Die Überschiebung ist nicht besonders spektakulär ausgebildet und besteht im Wesentlichen aus einer geringmächtigen, durchaderten Kontaktzone zwischen Schiefen und Kalken.

### **3.5.2 Trennflächen in der Doldenhorn-Decke**

Die Schieferungsflächen im Flysch der Doldenhorn-Decke fallen im Mittel mit  $30^\circ$  gegen NW bzw. SE ein, entsprechend den in der überkippten Stirnpartie der Doldenhorn-Decke vorhandenen, langen südostfallenden und kurzen nordwestfallenden Faltenschenkeln.

Im Öhrli-Kalk sind die Schicht- bzw. Schieferungsflächen auf Basistunnelniveau steil gelagert. Dies entspricht dem Übergang vom mehrheitlich SE-Fallen im Flysch zum überwiegend NW-Einfallen im Quinten-Kalk.

Im Öhrli-Kalk wie auch im Quinten-Kalk ist es äusserst schwierig, die Schichtung von der Schieferung zu unterscheiden, weil diese meist nahezu parallel verlaufen. Die Streuung der Flächenpole ist im Quinten-Kalk wesentlich geringer als im Öhrli-Kalk, was vermutlich mit der stärkeren Scherung im Quinten-Kalk zusammenhängt. Das Einfallen gegen Westen hängt mit dem axialen Abtauchen des Aar-Massivs gegen Westen zusammen und ist wohl auf eine späte, passive Verkipfung der «Deckfalte» zurückzuführen.

### **3.5.3 Trennflächen im Kristallin**

#### **Stoffbänderung**

Im Kristallin war nur an wenigen Stellen in den Paragneisen eine Stoffbänderung zu erkennen. Im Lauterbrunnen-Kristallin zeigte dieselbe ein sehr flaches Einfallen gegen SE. Im Randbereich Nord des Gastern-Granits wurde ein etwas steileres Einfallen in die gleiche Richtung beobachtet. Im Altkristallin südlich des Gastern-Granits ist eine Stoffbänderung nur in den Bändergneisen und den Amphibolgneisen sichtbar. Sie verläuft oft deutlich flacher als die Schieferung. Verfaltungen sind sicher vorhanden, im Tunnelquerschnitt aber nur schwer auszumachen.

#### **Schieferung**

Die räumliche Lage der Schieferungsflächen in den einzelnen Einheiten ist aus Tabelle 3-2 ersichtlich.

Im Lauterbrunnen-Kristallin liegen die Flächenpole der Schieferung auf einem Grosskreis, was bedeutet, dass hier eine bereits bestehende Schieferung verfaltet worden ist.

#### **Klüftung**

Im Altkristallin waren die folgenden, grösstenteils auch in den Graniten und Granodioriten sowie in den überlagernden Sedimenten vorhandenen Klüftsysteme vorherrschend:

- K1** – sehr steile bis senkrechte Klüfte, NW-SE streichend
  - Hauptklüftung
  - mehrere Meter lang, mit Abständen von 0,1 bis 1 m
  - meist ebene Flächen mit stark variierender Rauigkeit
  - im Gastern-Granit z.T. offen, im Altkristallin meist geschlossen
  - nur selten Rutschharnische
- K2** – sehr steile bis senkrechte Klüfte, subparallel zum Tunnel verlaufend
  - mehrere Meter lang, mit Abständen von dm bis m
  - überwiegend unebene, leicht raue Flächen
  - im Gastern-Granit vereinzelt offen, im Altkristallin stets geschlossen
  - ohne Rutschharnische

Tab. 3-2: *Mittlere Lage der Schieferungsflächen im Kristallin.*

| Lithologische Einheit  | Azimet Fallrichtung | Fallwinkel      | Anzahl Messungen |
|--|---------------------|-----------------|------------------|
| Lauterbrunnen-Kristallin   | Grosse Streuung     | Grosse Streuung | 11               |
| Randzone Nord des Gastern-Granits  | 176°                | 71°             | 37               |
| Gastern-Granit   | 175°                | 70°             | 14               |
| Baltschieder-Granodiorit   | 169°                | 54°             | 76               |
| Zentraler Aare-Granit (inkl. FST Steg)   | 160°                | 73°             | 32               |
| Granitische Gneise (Schollengneise)  | 173°                | 57°             | 31               |
| Dunkle Gneise  | 144°                | 67°             | 46               |
| Bändergneise   | 139°                | 78°             | 101              |
| Schiefrige-massige Gneise  | 139°                | 72°             | 61               |
| Altkristallin zw. Gastern-Granit und Zentralem Aare-Granit (ohne Schollengneise) | 137°                | 74°             | 208              |

- K3** – horizontale bis maximal mit 45° einfallende Klüfte  
 – meist weniger als 1 m, selten mehrere m lang, mit Abständen von 0,2 bis 2 m  
 – überwiegend unebene Flächen  
 – im Altkristallin sowie in den Randzonen des Gastern-Granits z.T. offen  
 – ohne Rutschharnische
- K4** – sehr steile bis senkrechte Klüfte, E-W streichend  
 – mit einem Winkel von 10 bis 20° zum Basistunnel verlaufend  
 – überwiegend unebene Flächen  
 – nur sehr untergeordnet Rutschharnische

Die steilen K1-Klüfte und in geringerem Masse die flach liegenden K3-Klüfte stellen die regional dominierenden Systeme dar.

Die Mineralführung der K3-Klüfte (alpine Zerrklüfte) besteht meist aus Quarz-Chlorit und Quarz-Chlorit-Calcit, mit wechselndem Gehalt an Pyrit und Pyrrhotin. Daneben wurde von den Tunnelgeologen Albit, Apatit, Adular, Epidot, Fluorit, Amiant, Hämatit, Bleiglanz, Molybdänglanz und Zinkblende gesichtet. Die Öffnungsweite und damit die Mineralführung nehmen generell von Süden nach Norden ab. Im Gastern-Granit wurden nur noch sehr selten offene K3-Klüfte beobachtet. Im Altkristallin südlich davon waren offene Klüfte vor allem in den massigen Gneisen anzutreffen.

Im Gastern-Granit treten die Klüfte zuweilen in eigentlichen Klufscharen auf. Interessanterweise dominieren in diesen Klufscharen südlich von ca. km 34,563 (Oströhre) bzw. km 34,589 (Weströhre) vor allem K1-Klüfte, während nördlich davon die K2-Klüfte vorherrschen. Wasser führende «Dislokationsklüfte», wie sie im Scheiteltunnel beschrieben wurden, wurden auf Basistunnelniveau nur selten angetroffen (z.B. bei km 34,334, QV 60). Es handelt sich um Klufspalten, die teilweise mit einem talkigen Zersetzungslehm gefüllt sind. Deren Öffnungsweite betrug maximal 10 cm. Vor allem die subparallel zur Tunnelachse verlaufenden K2-Klüfte haben im Gastern-Granit teilweise zu markanten Überprofilen geführt.

### 3.5.4 Trennflächen im Autochthon Gampel-Baltschieder

#### *Schichtung, Schieferung*

In den tonigen und mergeligen Schiefererien fehlt eine durchgehende Klüftung und die Wasserführung ist sehr gering. In den kalkigen Serien dagegen sind die zahlreich vorhandenen Klüfte teilweise verkarstet und bilden weitläufige Wasserfließsysteme.

Die mittlere Orientierung der Schichtflächen im Lias-Kalk weicht etwas von derjenigen in den übrigen lithologischen Einheiten ab. In einigen Abschnitten der Oströhre fielen die Schichtflächen nämlich mit teilweise weniger als 25° gegen SW ein, was verschiedentlich zu Ausbrüchen führte (Tab. 3-3).

#### *Klüftung*

Im Autochthon Gampel-Baltschieder dominiert ein steil gegen NE bzw. SW einfallendes System (Hauptklüftung K1) und ein flach liegendes, nach ESE, SE oder SSE einfallendes System (K2).

## 3.6 Vergleich Prognose – Befund

### 3.6.1 Einleitung

Wie im Bericht von KELLERHALS & ISLER (1998) dargestellt, basiert die Prognose auf geologischen Aufnahmen an der Geländeoberfläche, alten Aufnahmen in den vorhandenen Stollen und Tunnels, dem Befund des Sondierstollens Kandertal sowie auf den Resultaten der Tiefbohrungen und der zahlreichen Bohrungen in den Portalbereichen. Für die Prognose in den geologischen Berichten der Submission der einzelnen Vortriebslose kamen teilweise noch zusätzliche Informationen dazu. So wurde zum Beispiel aus den Erkenntnissen des Pilotstollens Raron und den vom Pilotstollen aus gebohrten Kernbohrungen eine neue de-

Tab. 3-3: Lage der Schicht- und Schieferungsflächen im Autochthon Gampel-Baltschieder.

| Lithologische Einheit                   | Azimut Fallrichtung | Fallwinkel | Anzahl Messungen |
|---|---------------------|------------|------------------|
| Gesamtes Autochthon Gampel-Baltschieder | 171°                | 46°        | 344              |
| Dogger- und Malm-Kalk, Dogger-Mergel    | 168°                | 50°        | 86               |
| «Aalénien-Schiefer»                     | 167°                | 46°        | 76               |
| Lias-Kalk, Lias-Schiefer                | 185°                | 38°        | 133              |
| Trias                                   | 167°                | 46°        | 49               |

taillierte Prognose für die Trias des Autochthons Gampel-Baltschieder erstellt. Ähnlich verhält es sich im Abschnitt Ferden mit den Resultaten der Tiefbohrung Bärsol, die erst nach Drucklegung des Berichtes von KELLERHALS & ISLER (1998) vorlagen und die wegen der erbohrten zusätzlichen Sedimenteinschuppungen neben dem eigentlichen Jungfraukeil eine Anpassung der Prognose in diesem Abschnitt zur Folge hatten. Trotz diesen Anpassungen der geologischen Prognose vor Baubeginn wird im Folgenden der Befund vom Ausbruch des Basistunnels mit der etwas älteren, publizierten Prognose verglichen.

### 3.6.2 Lithologie

Es zeigte sich, dass die Prognose, von der unerwarteten Sedimentmulde mit Karbon abgesehen, insgesamt sehr präzise war und dass dort, wo Abweichungen bestanden, diese meistens nicht zu Ungunsten des Projekts ausfielen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass einzelne Unterschiede auf die im Kapitel 2.2 erwähnten Trasseoptimierungen zurückzuführen sind. Im Einzelnen kann auf die folgenden grösseren Abweichungen gegenüber der Prognose hingewiesen werden:

- Im nördlichsten Abschnitt wurden zwei längere Strecken mit Mergelschiefern mit Sandsteinbänken (gemäss Prognose als «dachschieferartig» bezeichnet) bzw. mit sandigen Kalkmergelschiefern mit Sandsteinlagen (Flysch unbekannter Stellung) aufgrund neuer Befunde der Taveyannaz-Serie zugeordnet. Nebst lithologischen Merkmalen spricht auch die fehlende tektonische Abgrenzung zum daneben auftretenden Taveyannaz-Sandstein für diese Zuordnung.
- Neue Mikrofossilfunde zeigten, dass es sich im Abschnitt von rund km16,3 bis etwa km16,8 um Fleckenmergel und Hohgant-Schiefer der Wildstrubel-Formation (Schuppe mit südhelvetischem Eozän) und nicht, wie prognostiziert, um Flysch ungeklärter Stellung handelt.
- Die am Ende des Dienststollens bei rund km 24 als Flysch-Schiefer eingestuften Mergelschiefer erwiesen sich aufgrund von Dünnschliffuntersuchungen als Öhrli-Mergel. Die der Gellihorn-Decke entsprechende tektonische Stellung wird durch das Vorhandensein einer Sichelkalk-Schuppe bei km 24,2 zusätzlich unterstrichen. Der Flysch der Doldenhorn-Decke beginnt somit erst ca. 250 m weiter südlich als prognostiziert.

- Die Strecke in den Öhrli-Mergeln fällt gegenüber der Prognose wesentlich kürzer aus. Wie in der Prognose jedoch erwähnt wurde, bestand bezüglich der Länge der Strecke in den Öhrli-Mergeln eine erhebliche Unsicherheit. Tatsächlich wurden die Öhrli-Mergel bei km 27 nur auf einer Länge von 190 m angetroffen. Ausserdem waren sie durchwegs kalkig und glichen eher Kalk- als Mergelschiefern. Diese «Verkalkung» der Öhrli-Mergel gegen den nördlichen Faziesraum hin ist aber für die Doldenhorn-Decke nicht ungewöhnlich.
- Nach Querung der Trias bei rund km 29 und dem Erreichen des Kristallins wurde ein lithologisch recht variabler, meist mittelkörniger, leicht grünlicher Biotit-Granit bis Granitgneis angetroffen, der häufig Pyrit führte. Dieser kristalline Abschnitt wies entgegen der Prognose keine Injektions- und Assimilationsphänomene auf und war, wie sich herausstellte, vom eigentlichen Gastern-Granit durch eine Sedimentmulde mit Karbon getrennt. Es handelt sich hierbei also nicht um den Randbereich des Gastern-Granits, sondern um eine nördlichere Einheit, die, entsprechend der Situation weiter im Osten, dem Lauterbrunnen-Kristallin zugeordnet wird.
- Bei der oben erwähnten, südlich des Lauterbrunnen-Kristallins angefahrenen Karbonmulde (mit begleitendem Perm) handelt es sich aus geologischer Sicht wohl um die grösste Abweichung von der Prognose (s. Kap. 2).
- Deutlich weniger häufig als erwartet traten im Altkristallin südlich des Gastern-Granits Amphibolite auf. Zwar waren kleine Linsen im dm-Bereich über grosse Strecken des Altkristallins nördlich der granitischen Gneise vorhanden, insgesamt waren sie aber doch wesentlich weniger häufig und geringmächtiger als erwartet.
- Nicht angetroffen auf Tunnelniveau wurde das Altkristallin zwischen Zentralem Aare-Granit und Baltschieder-Granodiorit. Der Zentrale Aare-Granit reicht wesentlich weiter nach Süden und steht in direktem Kontakt mit dem Baltschieder-Granodiorit. Da Intrusionskörper kaum exakt prognostiziert werden können, wurde in der Prognose für die Lage der Kontakte eine Streubreite von 500 m angegeben. Der südliche Kontakt lag dann ca. 1 km südlicher und der nördliche etwa 300 m südlicher als vermutet. Dies führte dazu, dass einerseits der Zentrale Aare-Granit rund 600 m mächtiger und andererseits der Baltschieder-Granodiorit nur halb so mächtig war wie erwartet.

Der Vergleich der prognostizierten zu den gefundenen Mächtigkeiten der einzelnen Gesteinstypen zeigt, dass die Abweichungen von der Prognose maximal 5% betragen. Im Sinne einer eher vorsichtigen Prognose wurden die eher schwierigeren Gesteine etwas überschätzt: Gesteine der Schuppenzone mit Trias und Lias, Kakirite, Kristallin-Mylonite, Phyllite und kristalline Schiefer traten weniger auf als prognostiziert. Im Gegenzug gab es mehr schiefrige und massige Gneise.

### 3.6.3 Störungen und Klüftzonen

Im Sprengvortrieb war es häufig nicht möglich, die einzelnen Störungen eindeutig zu identifizieren, was den Vergleich mit der Prognose sehr erschwerte. Die wegen den Stör- und Klüftzonen prognostizierten Schwierigkeiten für den Vortrieb (Niederbrüche, instabile Ortsbrust) waren aber generell geringer als angenommen und beschränkten sich vielfach auf lokales Überprofil.

Daraus kann geschlossen werden, dass eher weniger Störungen als prognostiziert angetroffen wurden. Dies gilt sowohl für das Altkristallin als auch die Übergangszone, insbesondere aber auch für den Gastern-Granit, wo die alle 80–120 m vorausgesagten Störungszonen mit Phylliten und

Kakiriten generell viel seltener und geringmächtiger waren. Dafür wurden vor allem in den Graniten immer wieder cm- bis maximal dm-mächtige duktile Scherzonen (Mylonite) beobachtet, die den Vortrieb überhaupt nicht behinderten.

Dagegen wurden südlich des Jungfraukeils zwei nicht prognostizierte, etwa 40 m und 170 m mächtige Schieferzonen (Schieferzonen Kummenalp und Restalp) angetroffen. Um den bautechnischen Schwierigkeiten in diesen Zonen möglichst auszuweichen, wurde die Nothaltestelle Ferden etwas nach Süden verschoben. Die bei der Phyllitzone Faldumbach erwarteten, rund 20 m mächtigen Phyllite wurden auf Tunnelniveau nicht mehr angetroffen, was erlaubte, diese Zone in der Weströhre mit der TBM aufzufahren.

Die Überschiebung Rote Kuh - Gampel war von einem ca. 40 cm mächtigen Kakirit begleitet, gefolgt von etwa 10 m stark verschieferem Gneis. Der Kontakt war scharf und ohne Schuppen, so wie er in der Prognose für den «günstigen» Fall angegeben worden war.

Auch bezüglich der Orientierung des Trennflächengefüges stimmt der Befund gut mit der Prognose überein. Dagegen waren die (mittleren) Trennflächenabstände, die in der Prognose mit 0,01–1 m angegeben worden waren, tendenziell eher grösser (dm- bis m-Bereich).

## 4. Hydrogeologie

### 4.1 Wasserführung, Wasserdrücke und Fließpfade in den einzelnen Einheiten

#### 4.1.1 Gesamtwasserführung auf der Nordseite

Dank dem bestehenden Dienststollen östlich des Basistunnels konnte die Wasserhaltung für die Vortriebe ab Mitholz relativ einfach gehandhabt werden. So wurde das Wasser aus dem fallenden Nordvortrieb und vom Fusspunkt in Pumpensämpfen gesammelt und über Absetzbecken in den Dienststollen gepumpt. Insbesondere für den Nordvortrieb bestand deshalb keine Möglichkeit, den Wasseranfall direkt zu messen. Im Dienststollen wurde das Tunnelwasser zuerst in der Rigole abgeleitet. Nach den grossen Wasserzutritten in der Doldenhorn-Decke wurde ab Juni 2002 das saubere Wasser separat gefasst und vom Schmutzwasser getrennt. Dabei wurde das Schmutzwasser in einer extra verlegten Schmutzwasserleitung und das Sauberwasser in der Rigole des Dienststollens in die Helke geleitet.

Während den Vortriebsarbeiten von Mitholz in Richtung Frutigen wurden nur sehr wenige Wasserzutritte angefahren, und die Arbeiten wurden nicht durch Wasserzutritte behindert. Die Differenz zwischen der Sauberwassermenge aus den Südvortrieben und dem in der Helke gemessenen Total beträgt knapp 10 l/s. Zwischen Juni 2002 und März 2005 hat diese Menge von 10 auf <5 l/s abgenommen. Diese Wassermenge entspricht im Wesentlichen dem Wasseranfall im Basistunnel Nord bis zum Adelrain sowie jenem im Dienst- und Fensterstollen Mitholz. Der Wasseranfall ab Adelrain bis zu den Portalen ist, insbesondere im Tunnel West, stark witterungsabhängig und beträgt zwischen 1,5 und 5 l/s. Dieses Wasser gelangt nicht in den Dienststollen, sondern fliesst beim Westportal aus. Auf Grund dieser Ausführungen kann der gesamte Bergwasseranfall zwischen Frutigen und Mitholz auf etwa 10 l/s als realistische obere Grenze geschätzt werden. Diese Menge ist geringer als der prognostizierte maximal jährlich wiederkehrende Wasseranfall (ca. 20 l/s). Insbesondere die Zutritte an der Grenze Flysch/Wildhorn-Decke sind in der Oströhre viel kleiner als im Dienststollen.

Bei den Vortriebsarbeiten von Mitholz Richtung Süden (steigender Vortrieb) wurden zunächst keine grösseren Wasserzutritte angefahren. Erst mit dem Erreichen der Wasser führenden Kalke der Doldenhorn-Decke im November 2001 im Vortrieb West-Süden stieg der Bergwasseranfall von den bis dahin total gemessenen 25 l/s sprunghaft um 65 l/s auf rund 90 l/s an (Fig. 4-1). Der gesamte Anstieg durch den verkarsteten Teil der Doldenhorn-Decke bis zum Erreichen des Autochthons Nord betrug im Mittel 26,4 l/s pro km.

Während der gesamten Bauzeit konnten mit den vorhandenen Messvorrichtungen immer nur Teilmengen des anfallenden Wassers in sehr unterschiedlicher Qualität gemessen werden. Damit die Frage, woher wie viel Wasser kommt, befriedigend beantwortet werden konnte, wurden die anfallenden Wassermengen für jeden Abschnitt zwischen zwei Querverbindungen gemessen oder so gut wie möglich abgeschätzt. Dies ergab, dass von der gesamten Bergwassermenge aus den Südvortrieben rund 2/5 oder 58 l/s auf den Tunnel Ost und 3/5 oder 92,5 l/s auf den Tunnel West entfallen (der Tunnel West war bis ins Aar-Massiv immer die vorausseilende Röhre). Der grösste Wasseranfall von 22 l/s (Tunnel Ost) bzw. 32 l/s (Tunnel West) ist in der Kalkstirn der Doldenhorn-Decke zu verzeichnen.

#### 4.1.2 Einzelwasserzutritte auf der Nordseite

Auffallend ist, dass vor allem auf den ersten rund 9 km einige Wasserzutritte aus schiefrigen und daher eigentlich undurchlässigen Schichten stammen. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die geklüfteten Kalke und Sandsteine durch die Drainagewirkung des Dienststollens bereits weitgehend entwässert wurden und dass es sich bei den angebotenen Wässern zumeist um gefangene Vorkommen mit nur geringem Zufluss handelt. Dafür sprechen insbesondere die fast ausnahmslos rasche Abnahme der Schüttungen und die teilweise ungewöhnliche Chemie (Chloridwerte von bis zu 64 mg/l, km 20,252). Mit fortschreitendem Vortrieb trocknete das Gebirge in der Regel rasch aus, so dass eine längere Beobachtung der Wasserzutritte nur in wenigen Fällen möglich war.

Ausser bei einem Wasserzutritt bei km 16,580, wo anfänglich aus dem Bereich einer Störung in den Globigerinenschiefen etwa 20–30 l/s austraten, waren die Wasserzutritte zwischen Adelrain und Mitholz sehr gering. Auch im Flysch (FU) war der Bergwasserandrang erwartungsgemäss sehr gering. Sogar im Bereich bei km 16,200, wo beim Bau des Sondierstollens anfänglich knapp 10 l/s Wasser zutraten, was zur Beeinträchtigung mehrerer Quellen im Adelrain führte und Ersatzmassnahmen erforderlich machte, wurden beim Vortrieb des Tunnels Ost keine Wasserzutritte mehr festgestellt. Ein etwas anderer Fall sind die Wasserzutritte aus dem Bereich Adelrain und Tunnel West bis Portal Frutigen, wo aufgrund der geringen Überdeckung ein relativ direkter Kontakt zur Oberfläche besteht und wo die Schüttungen stark durch die Witterung beeinflusst sind.

Der erste nennenswerte Wasserzutritt in den Vortrieben von Mitholz Richtung Süden erfolgte mit etwa 1 l/s in der Weströhre bei ca. km 24,396 (Kalkblock im Flysch). Die in

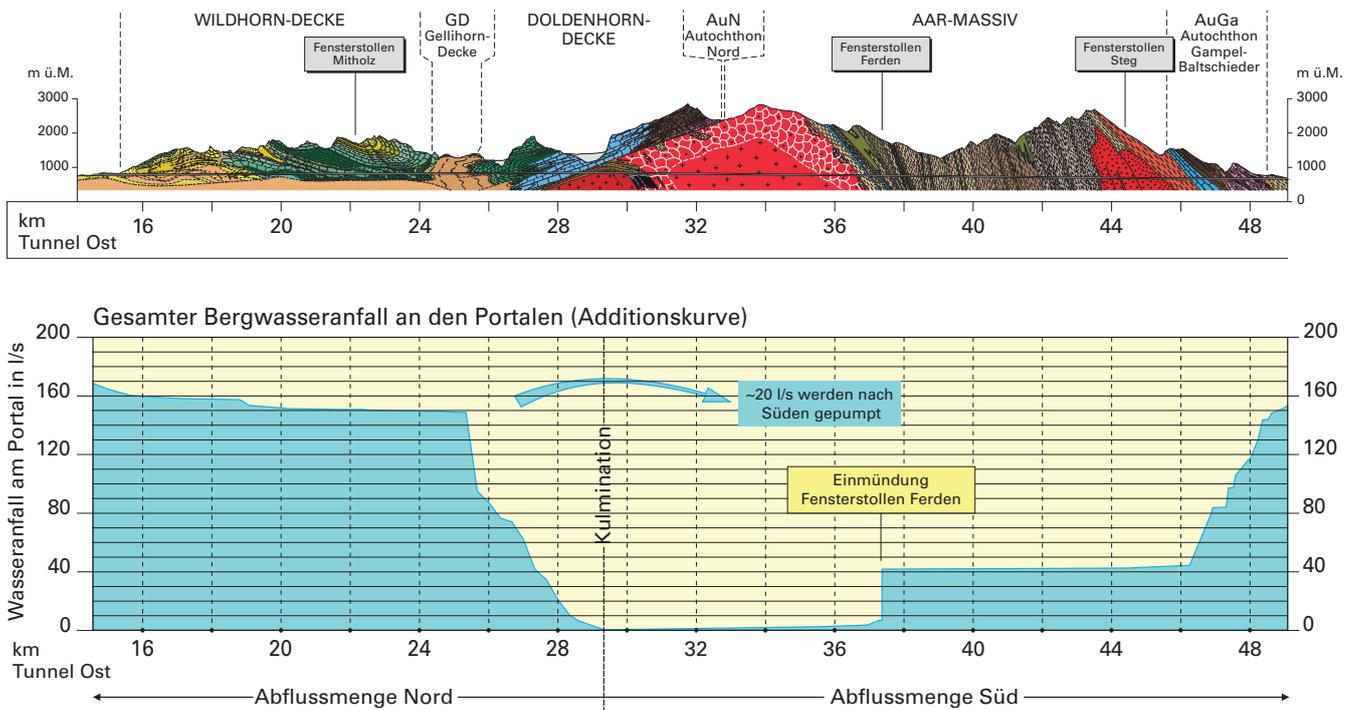


Fig. 4-1: Gesamter Bergwasseranfall an den Portalen (Additionskurve).

der Flysch-Strecke festgestellten Wasserzutritte haben aber allesamt innerhalb weniger Tage stark abgenommen oder sind vollständig versiegt.

Wie schon erwähnt, stammen die mengenmässig bedeutendsten Wasserzutritte aus dem Stirnbereich der Doldenhorn-Decke. In der Oströhre waren die Wasserzutritte dabei deutlich geringer als in der vorauseilenden Weströhre (Fig. 4-2).

Im folgenden Abschnitt (Kieselkalk – Betlis-Kalk – Öhrli-Kalk) waren zahlreiche Tropfwasserstellen zu verzeichnen. Der Öhrli-Kalk bis zu km 26,0 erwies sich – von wenigen Tropfwasserstellen abgesehen – dagegen als trocken. Bei km 26,0 kündeten starke Wasserzutritte in den Vorausbohrungen der Weströhre eine verkarstete, Wasser führende Störungszone an. Aufgrund der Erkundungs- und Injektionsbohrungen musste von einer totalen Wasserführung aus dieser Zone von gegen 500 l/s ausgegangen werden. Nach erfolgter Gebirgsinjektion und Durchörterung der Störungszone betrug der Wasseranfall aus diesem Bereich noch ca. 51 l/s im Tunnel West. Aus der Oströhre, wo die Struktur wesentlich weniger gut durchlässig war und deshalb nicht injiziert wurde, traten schätzungsweise 5 l/s Wasser aus der Sohle.

In der anschliessenden Öhrlikalk- und Quintenkalk-Strecke zwischen km 26,300 und 28,300 können die wichtigsten Wasserzutritte in zwei Gruppen eingeteilt werden, die beide im ansonsten trockenen Öhrli-Kalk liegen: Diejenigen im Tunnel West (zwischen km 26,930 und 26,960) stammen aus einem hauptsächlich durch das steile K1-Kluftsystem vorgezeichneten Fliesssystem, das sich über den weniger durchlässigen Öhrli-Mergeln befindet und Verkarstungserscheinungen aufweist (Fig. 4-3). Die Anfangs-

schüttung betrug etwa 141 l/s. Der Gesamtwasseranfall aus dieser Struktur wird als Summe von drei Wasserzutritten ermittelt, der nach einer raschen Abnahme auf 71 l/s nur noch eine langsame Abnahme der Schüttung zeigt.

Die Wässer im Tunnel West bei ca. km 27,220 stammen aus einem gut definierten Bereich in der Nähe einer steilen Störung, die ungefähr parallel zum K1-Kluftsystem verläuft. Dieser Bereich umfasst mehrere Wasserzutritte, die in einer Nische zusammengeführt wurden. Ein wichtiger Anteil stösst aus der Sohle auf und gelangt durch ein Kiesbett in die Nische. Ein weiterer überwachter Wasserzutritt in dieser Zone befindet sich am rechten Parament. Die Gesamtschüttung dieser Zutritte konnte mit einer Pumpe gemessen werden und lag zwischen 12 und 18 l/s. Dieser Schwankungsbereich liegt ausserhalb der Messtoleranz. Der Grund für diese schwankenden Schüttungen ist unklar; es zeigte sich bisher keine saisonale Regelmässigkeit. Im Gegensatz dazu bestanden die entsprechenden Zutritte im Tunnel Ost (km 27,280–27,420) aus zahlreichen einzelnen Wasserzutritten, die aber insgesamt nur schätzungsweise 51 l/s Wasser schütteten. Auf der Quintenkalk-Strecke zwischen ca. km 27,350 und 27,900 sind beim Vortrieb der Oströhre Karsthohlräume zum Vorschein gekommen, die rund 6,5 l/s Wasser brachten.

Im gesamten Abschnitt südlich der Deckenbasis der Doldenhorn-Decke (Autochthon Nord, Karbon und Kristallin) war der Wasseranfall sehr gering, und es gab keine Wasserzutritte, die über längere Zeit gemessen werden konnten. Beim Anfahren konnten jedoch etliche Wasserzutritte mit Wassermengen zwischen 0,1 und 21 l/s (im Basisandstein der Trias) festgestellt werden, die aber in der Regel bereits nach kurzer Zeit fast ganz versiegten.

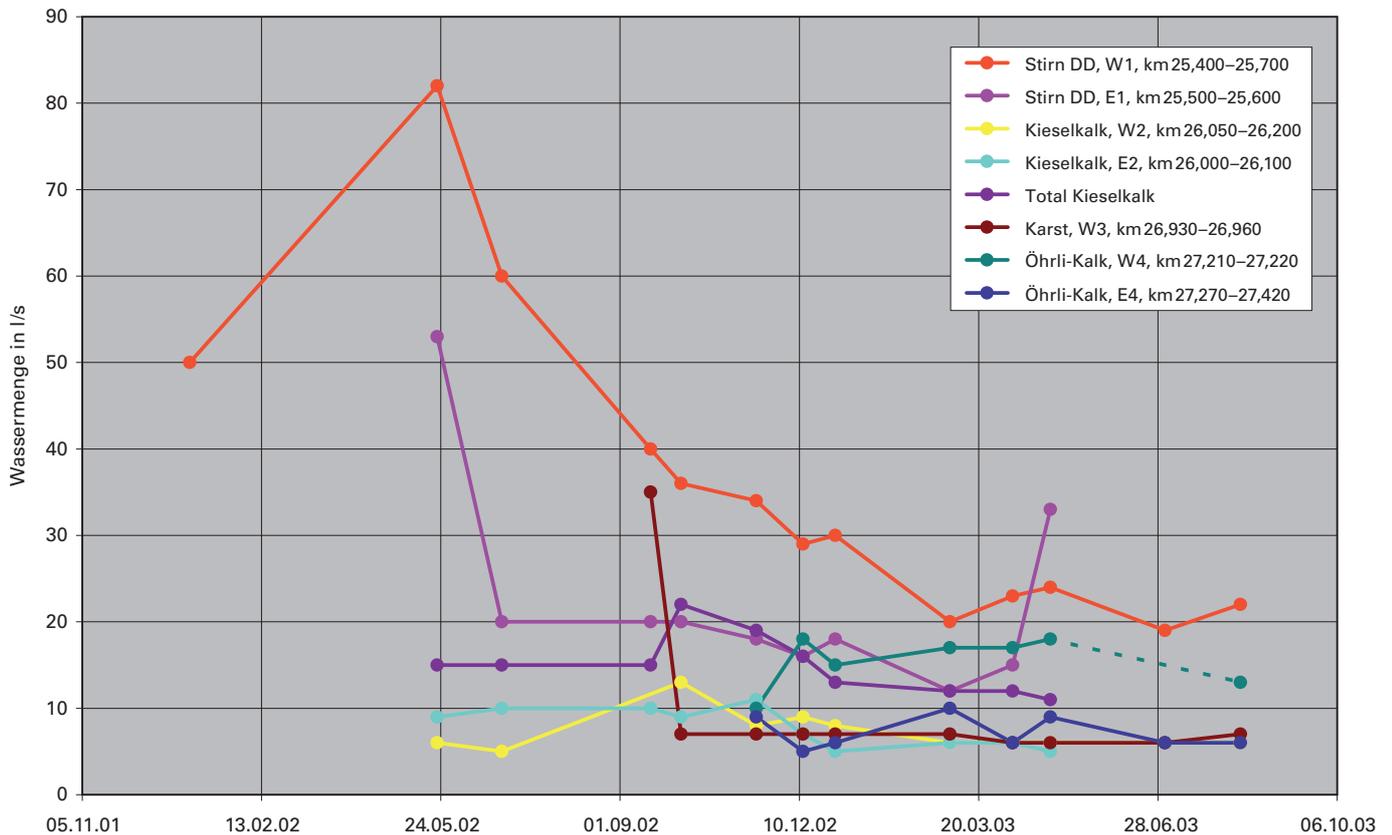


Fig. 4-2: Ganglinien der Wasserzutritte in den Karstwasserabschnitten der Doldenhorn-Decke.

#### 4.1.3 Wasserzutritte im Dienststollen (Sondierstollen)

Bei den während der Ausbrucharbeiten monatlich durchgeführten Begehungen im Dienststollen wurde festgestellt, dass durch den Vortrieb der bergwärts liegenden Basistunnelröhre die Schüttungen der Wasserzutritte mehr oder weniger stark beeinflusst wurden. Von den überwachten Wasserzutritten waren per Mai 2004 noch acht mit Schüttungen zwischen 1 und 10 l/min aktiv. Alle übrigen Wasserzutritte im Dienststollen waren versiegt oder nur noch als Feuchtstellen vorhanden.

#### 4.1.4 Einzelwasserzutritte im Bereich Ferden

Im **Gastern-Granit** waren Wasserzutritte relativ häufig. Interessant war jedoch, dass die Zutritte mit dem Vortrieb «mitgenommen» wurden, d.h. dass mit fortschreitendem Vortrieb immer neue Wasserzutritte angefahren wurden, wobei rund 100–150 m hinter der Brust die meisten Zutritte schon wieder versiegt. Über längere Zeit Wasser führende Quellen wurden relativ wenige angefahren. Typisch für diese ist eine meist starke Abnahme der Quellschüttung in den ersten Tagen bis Wochen nach dem Anfahren.

Das Wasser trat meistens entlang von K1-, K2- und K4-Klüften in den Tunnel. Auffallend ist dabei, dass von Norden her bis rund km 34,370 das Wasser vor allem entlang von K2-Klüften fließt (OTTIGER 2006). Nach einer Übergangszone sind dann ab rund km 34,575 vor allem die K1-Klüfte, oftmals in Kombination mit K4-Klüften, Wasser

führend. Interessanterweise findet dieser Wechsel im Bereich mit den höchsten Überlagerungen, direkt südlich der Kantonsgrenze Bern/Wallis, statt.

Der grösste Wasserzutritt wurde in der Oströhre bei km 34,536 beobachtet. Dort wurde nach dem Abschlag am Westparament ein Wasserzutritt von 1–2 l/s festgestellt. Das Wasser kam konzentriert aus zwei Klüften, im Schnittbereich einer K4-Kluftchar mit einer ausgeprägten K2-Kluft. Die Schüttung nahm rapide auf rund 15 l/s zu. Zur Sicherheit wurden am Westparament sofort vier Drainagebohrungen erstellt. Der Wasseranfall stieg damit auf 25–30 l/s an. Es zeigte sich sehr bald, dass sowohl der Wasserdruck als auch die Schüttungsmenge innerhalb weniger Stunden stark abnahmen (Halbierung der Schüttungsmenge in rund 9 Stunden). Schon wenige Wochen nach der Durchörterung dieser Zone waren nur noch einzelne Tropfwasserzutritte feststellbar.

Die im Mai 2005 in den seitlichen Drainagen der Oströhre vorgenommenen Messungen haben für den Bereich des Gastern-Granits (inkl. Übergangszone) eine Totalschüttung von rund 1,2 l/s ergeben. Die Totalschüttung im selben Bereich in der Weströhre konnte nicht gemessen werden. Aufgrund der etwas vermehrten Wasserzutritte in dieser Röhre kann hier eine Totalschüttung von 1,5–2 l/s angenommen werden, so dass von einer Gesamtschüttung aus dem Basistunnel von rund 3 l/s ausgegangen werden kann.

Die Wasserzutritte im Bereich **Altkristallin** (ohne die Einschaltungen der Sedimenteinschuppungen sowie des Jungfraukeils und des Permokarbons) sind insbesondere südlich der Sedimenteinschuppungen sehr gering. An eini-



Fig. 4-3: Karstloch (Weströhre km 26,904).

gen wenigen Stellen wurden aus Vorausbohrungen kleine Schüttungen registriert, die jedoch beim Durchfahren des entsprechenden Bereichs nicht mehr lokalisiert werden konnten. Generell wurden im Westen (ZLS) eher mehr Tropfwaterstellen beobachtet als im Osten. Insgesamt dürften aus diesem Bereich dem Basistunnel weniger als 0,2 l/s zufließen.

Die grösste Wasserführung im Abschnitt Ferden stammt aus dem **Jungfrau keil** und den **Sedimenteinschuppungen**. Aufgrund einer nicht völlig auszuschliessenden Kommunikation mit den Thermen von Leukerbad durften aus diesen Bereichen total nicht mehr als 2 l/s abdrainiert werden, was aufwendige Abdichtungsmassnahmen erforderte. Durch verschiedene Vorausbohrungen (s. Kap. 7.4) konnte die Lage der Wasser führenden Schichten festgelegt werden. Dabei zeigte sich, dass der grösste Wasseranfall in der südlichsten Sedimenteinschuppung und zwar in den Kalken, Kalkschiefern und Sandsteinen des Lias auftrat. Einzelne in diesem Bereich erstellte Erkundungs- bzw. Injektionsbohrungen wiesen Anfangsschüttungen von bis zu 7,5 l/s auf.

Die nördliche Sedimenteinschuppung führte nur noch im ZLS nennenswert Wasser. In der Ost- und Weströhre wurden in diesem Bereich nur noch Tropfwaterzutritte angefahren. Auch der Jungfrau keil wies wider Erwarten nur wenige Wasserzutritte (< 2 l/s) auf, so dass in diesem Bereich auf Abdichtungen verzichtet werden konnte.

Da die einzelnen Wasser führenden Zonen fortlaufend abgedichtet wurden (s. Kap. 8.2.2), kann der totale Wasseranfall (ohne Abdichtung) aus dem Bereich Jungfrau keil-

Sedimentschuppen nur abgeschätzt werden. Aufgrund der Auslaufversuche kann von einer totalen Schüttungsmenge aus allen drei Tunnelröhren von etwa 50 l/s ausgegangen werden. Die Auswirkungen der Abdichtungsmassnahmen auf die Schüttungen sind sehr schön aus der Figur 4-4 ersichtlich. So wurde zum Beispiel im ZLS die aus dem Bereich der nördlichen Sedimenteinschuppung abgeleitete Wassermenge durch die Injektionen auf < 1 l/s reduziert. Ebenfalls klar ersichtlich sind die Auswirkungen der Abdichtungsmassnahmen in der Figur 8-9, in der die Erstschüttungen in den einzelnen Drainagebohrungen aufgelistet sind. Dabei ist jeweils eine deutliche Abnahme der Schüttungen von einem Injektionsring zum nächsten sichtbar.

Die Schüttungsmessungen aus diesem Bereich (Fig. 4-4) wurden bis Herbst 2004 an provisorisch erstellten Messüberfällen vorgenommen. Anschliessend wurden zuerst in der Ost- und ein Jahr später in der Weströhre die definitiven Messstellen eingerichtet. Die grösseren Schwankungen sind auf Baueinflüsse zurückzuführen (Messausfälle aus logistischen Gründen, Umpumpen von einer Röhre in die andere, temporäre Rückstaus usw.), so dass tendenziell zu hohe Durchflussmengen registriert wurden. Deshalb können nur die Daten mit den kleinsten Schüttungsmessungen für die Bestimmung des Zuflusses aus den Sedimenteinschuppungen sowie dem Jungfrau keil herangezogen werden. Dieser liegt in der Weströhre bei 0,6–1,0 l/s, in der Oströhre bei 0,2–0,3 l/s und im ZLS bei rund 1,8–2 l/s und ist relativ konstant (total alle Röhren etwa 2,5–3 l/s).

In der ersten horizontalen Vorausbohrung (JFK1) wurde in den Sedimenteinschuppungen ein Wasserdruck von 120 bar gemessen, was sehr gut mit der Prognose übereinstimmte. Wegen der Drainagewirkung der Tunnelröhren konnten in den weiteren Bohrungen nur noch schon etwas beeinflusste Wasserdrücke bis zu 96 bar registriert werden. Im Jungfrau keil selbst lag der Wasserdruck noch bei 73–83 bar.

#### 4.1.5 Einzelwasserzutritte auf der Südseite

Im **Aar-Massiv** direkt nördlich der Grenze zum Autochthon Gampel-Baltschieder (Störung Rote Kuh - Gampel) waren beim Vortrieb kleine Zutritte, vor allem aber Tropfwater festzustellen. Alle diese Zutritte trockneten mehr oder weniger rasch aus, so dass heute keine Zutritte mehr feststellbar sind. Im ganzen weiteren Aar-Massiv bis zur Grenze zu Ferden waren beim Vortrieb keine Wasserzutritte und kaum Tropfwater festzustellen. Es gibt in diesem Bereich auch keinen permanenten Wasserzutritt mehr.

Der **Quinten-Kalk** und der **Dogger-Kalk** tendieren zu Verkarstungen. Einige kleinere Karströhren mit Durchmesser von 1–2 dm wurden bei km 46,678 angefahren. Sie führten einige l/s.

Mit der Vorausbohrung R37 (km 46,493, Oströhre) wurde ein grösseres Wasservorkommen angebohrt, das anfänglich ca. 30 l/s Wasser führte und braunen Sand ausspülte. Über mehrere Monate blieb das Wasser trüb. Sporadisch, vor allem während der Schneeschmelze, war das Wasser noch trüb, im Jahr 2005 allerdings kaum mehr nachweisbar.

Bei den Schüttungsmessungen aus dem gesamten **Quinten-Kalk** (im Mittel ca. 32 l/s, Fig. 4-5) ist zu berücksichti-

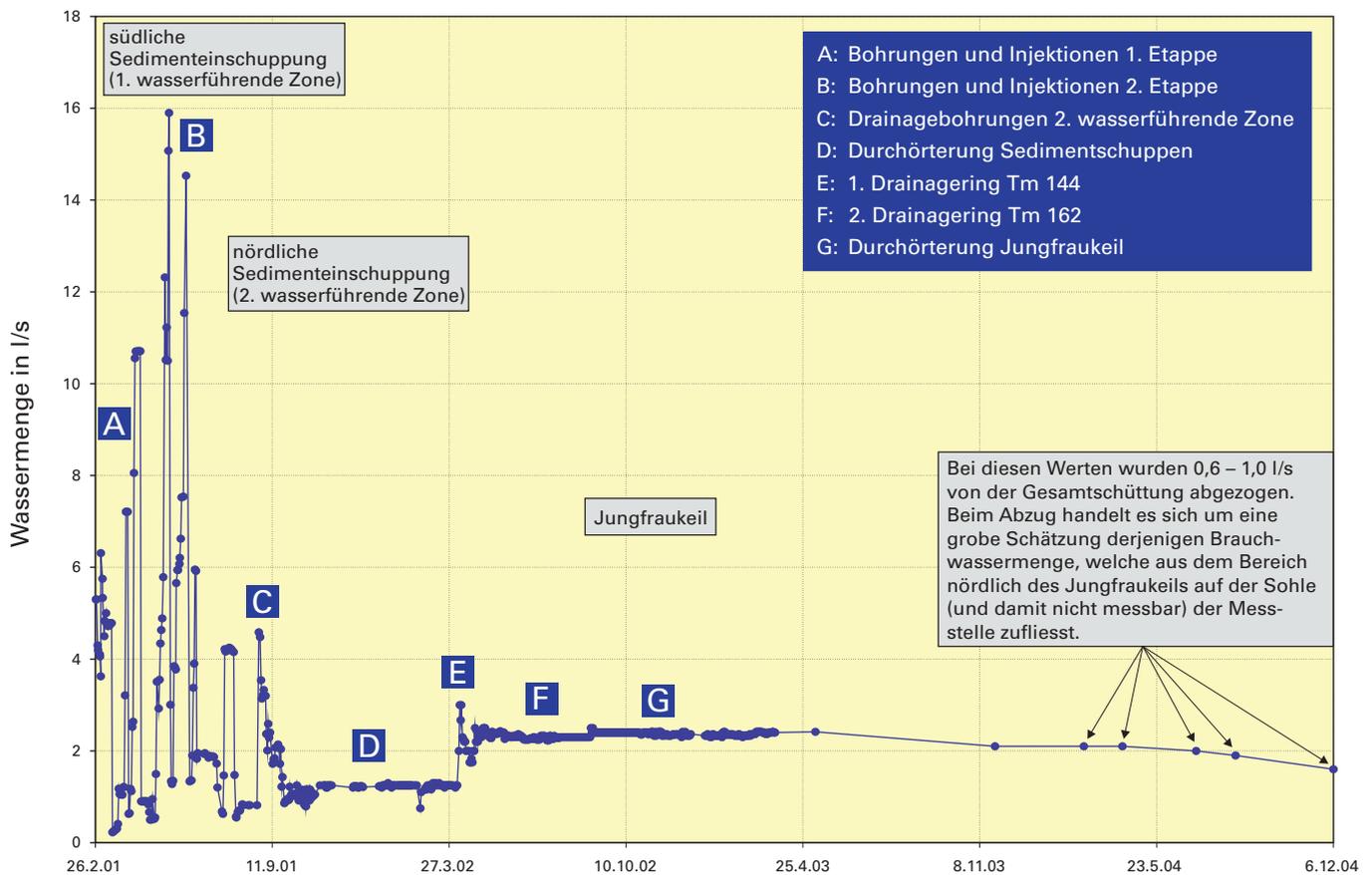


Fig. 4-4: Ganglinien des Wasserzuflusses im Zugangsstollen.

gen, dass zeitweise auch Wasser vom Tunnel West in die Rigole Ost gepumpt wurde. Zudem floss ab dem 2. Mai 2003 Wasser von Ferden zum Portal in Raron (ca. 40 l/s). Durch all diese Fluktuationen sind die Messungen nicht sehr genau. Beziehungen zu Niederschlag oder Schmelzwasser können aus diesen Messungen nicht hergeleitet werden. Langfristig ist eher eine leichte Zunahme der Schüttung feststellbar. Vermutlich wurde das Karstsystem über die Jahre immer besser ausgespült.

In den graphitischen und leicht kalkigen Tonschiefern des **Aaléniens** gibt es mit Ausnahme weniger, rasch versiegender Quellen praktisch kein Wasser. Die in diesen Abschnitt fallenden Zutritte in der Oströhre bei km 47,456–47,373 stammen von einer Einfaltung von Lias-Kalken in die «Aaléniens-Schiefer». Bis jetzt wurde in diesem Abschnitt eine mittlere Schüttung von rund 7 l/s gemessen. Die Qualität der Messungen erlaubt jedoch keine hydrologische Interpretation.

Der **Lias-Kalk** mit ausgedehntem Schicht- und Kluftkarst ist, wie erwartet, das wasserdurchlässigste Gestein des ganzen Südabschnittes. Die Erkundungsbohrung ab der Nische bei km 48,529 in der Oströhre hatte zum Ziel, Wassermenge und Druck beim Wechsel von den mehr oder weniger undurchlässigen kalkigen Tonschiefern des Lias zu den Lias-Kalken zu erkunden. Bei 18 bar hydrostatischem Druck flossen bei geöffnetem Schieber 80 l/s Wasser aus der Bohrung. Beim Vortrieb selber strömten dann praktisch auf der ganzen Liaskalk-Strecke bis 25 l/s aus der Tunnel-

brüst oder aus den kurzen Drainagebohrungen im Parament. Jeweils ca. 50 m hinter dem Vortrieb drang das Wasser meist nur noch aus der Sohle in den Tunnel, die Drainagebohrungen fielen nach wenigen Tagen bis Wochen alle trocken. Wie Figur 4-5 zeigt, fließen dem Tunnel aus den Lias-Kalken im Mittel nach wie vor etwa 20 l/s zu. Die Entwässerung des Lias-Kalkes hatte zur Folge, dass, wie erwartet, die Quellen von St. German trocken fielen. Nicht erwartet worden war dagegen die daraus entstehende Absenkung des Dorfes St. German (s. Kap. 9.3).

Die grösseren Wasserzutritte finden sich im hinteren, bergseitigen Teil des Lias-Kalkes. Bis zur Erstellung des Innenausbaus sah man lokale Wasserzutritte aus der Sohle der Oströhre bei km 48,215–48,166 und km 47,857–47,838. Der Tunnel West, talseitig des Tunnels Ost und in diesem Abschnitt gut 3 Monate später ausgebrochen, war deutlich weniger nass. Einzelne Zutritte im vorderen Teil des Lias-Kalkes schütteten bis ca. 2 l/s. Zwischen km 48,332 und 48,154 flossen bei zwei Messkampagnen im Februar und August 2004 ca. 4,5 l/s in den Tunnel.

**Kristallin/Trias:** Beim Vortrieb vom Portal Raron Richtung Norden nahm nach etwa 300 m bis in den Dolomit der Trias unter dem Bergsturz von St. German das Tropfwasser auf beiden Achsen ständig zu. Um zu verhindern, dass Wasser in die wasserempfindlichen Schichten der Trias gelangt, wurden an der Grenze zur Trias zwei Drainageschirme mit mehreren ca. 10 m langen Bohrungen gemacht, welche anfänglich bis etwa 13 l/s Wasser brachten.

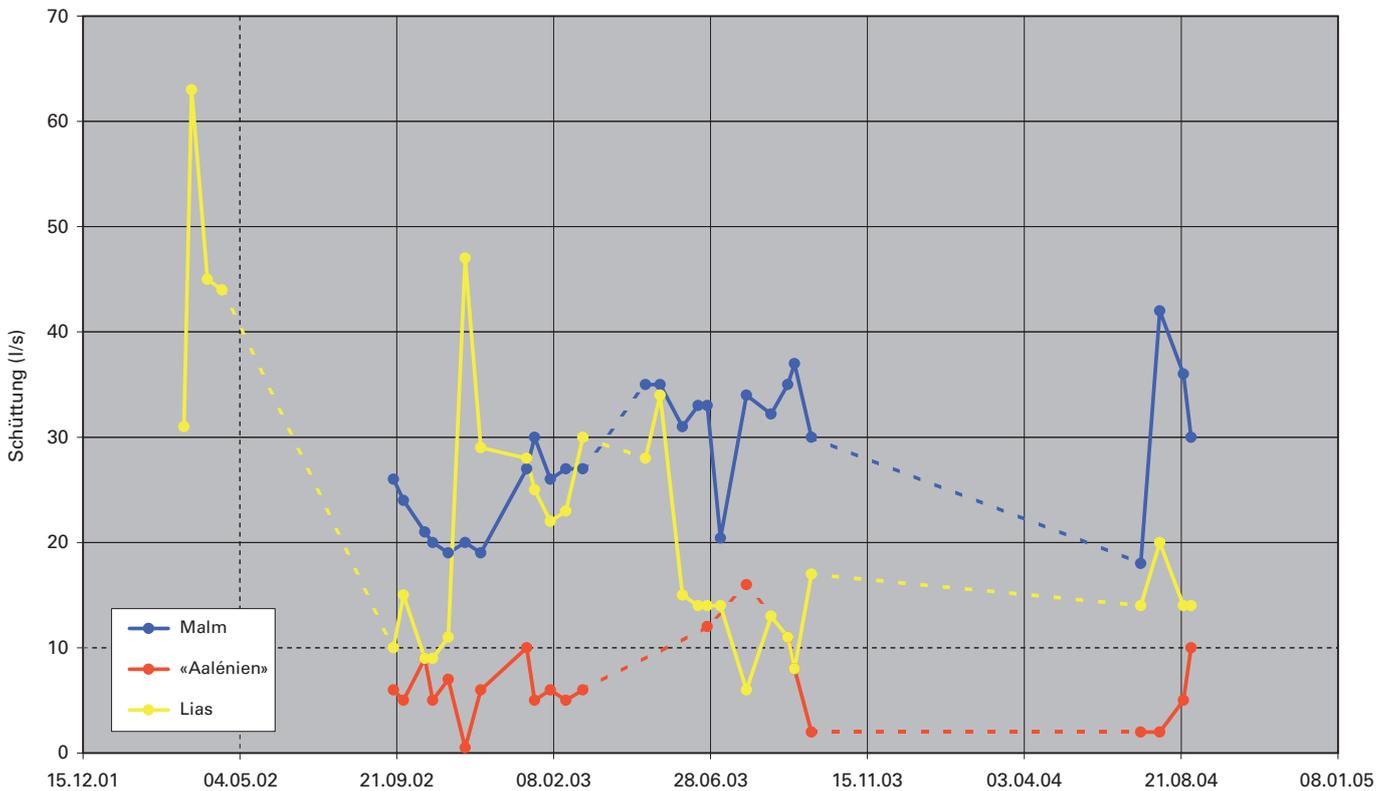


Fig. 4-5: Ganglinien der Wasserführung im Autochthon Gampel-Baltschieder.

Die Schüttung aus diesem Abschnitt reagiert stark auf Regenfälle, was auf Grund der Nähe zur Oberfläche plausibel ist. Zudem kann vermutet werden, dass die Einleitung von Wasser in den Maachigraben im Frühjahr die Schüttung ebenfalls beeinflusst.

#### 4.1.6 Gesamtwasserführung auf der Südseite

Wie aus den obenstehenden Ausführungen hervorgeht, stammt das in den Messstellen bei den Portalen (Venturikanäle) gemessene Wasser (Fig. 4-1) im Wesentlichen aus dem Autochthon Gampel-Baltschieder.

## 4.2 Wasserchemie

Von den Wasserzutritten wurden jeweils Proben entnommen und chemisch analysiert. Ausgewählte Parameter sind in Fig. 4-6 übersichtsmässig zusammengestellt. Daraus sind hauptsächlich zwei Zonen ersichtlich, in denen teilweise stark erhöhte Gehalte auftreten: der Bereich Autochthon nördlich des Gastern-Granits und der Bereich Autochthon zwischen Gastern-Granit und Lötschental. Die Wässer aus diesen autochthonen Gesteinen weisen mit ihren grossen Calcium-, Magnesium- und Sulfatgehalten grosse Ähnlichkeiten auf, was weiter nicht erstaunlich ist, da beide mit triassischen Gesteinen in Kontakt stehen. Einzig im Chloridgehalt, der in den Wässern südlich des Gastern-Granits (Jungfrau keil usw.) gegen 0 tendiert, unterscheiden sie sich stark. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass diese Wäs-

ser eine etwas geringere Verweilzeit aufweisen als jene nördlich des Gastern-Granits. Interessanterweise sind die Wässer aus dem Autochthon Gampel-Baltschieder überhaupt nicht im gleichen Ausmass mineralisiert, obwohl auch dort triassische Gesteine vorhanden wären. Der Grund liegt darin, dass es sich in diesem Fall vor allem um Karstwässer aus mächtigeren Malm- und Lias-Abfolgen handelt.

Auffallend sind auch die erhöhten Gehalte der oben erwähnten vier Parameter in den Wässern aus dem Gastern-Granit im Vergleich mit jenen der Wässer aus den restlichen Kristallinabschnitten. Auch dies dürfte vermutlich darauf hinweisen, dass diese Wässer mehr oder weniger stark mit triassischen Gesteinen in Kontakt stehen.

Im Einzelnen kann von Nord nach Süd auf folgende Punkte hingewiesen werden:

- Die Wasserzutritte aus dem Mélange bei km 20,158 und km 20,252 weisen vergleichsweise hohe elektrische Leitfähigkeiten von  $>1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  auf bei gleichzeitig geringen Calcium-Konzentrationen, hohem pH-Wert und hohen (Natrium-)Chlorid-Konzentrationen. Dies könnte darauf hinweisen, dass es sich bei diesen Wässern um stagnierende Vorkommen handelt.
- Aus dem Abschnitt km 19,831–19,845 (Palfris-Schiefer) wurden zu Forschungszwecken im Auftrag der Nagra drei Proben entnommen und analysiert. Die Untersuchung ergab, dass  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{Ca}^{2+}$  im Gleichgewicht mit den Mineralphasen sind. Das  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis gleicht demjenigen des Kieselkalks und deutet darauf hin, dass die Wässer mit dem Kieselkalk im Lösungsgleichgewicht stehen und aufgrund des niedrigen  $\text{Cl}^-$ -Gehaltes kaum von Porenwasser aus den Palfris-Schiefeln

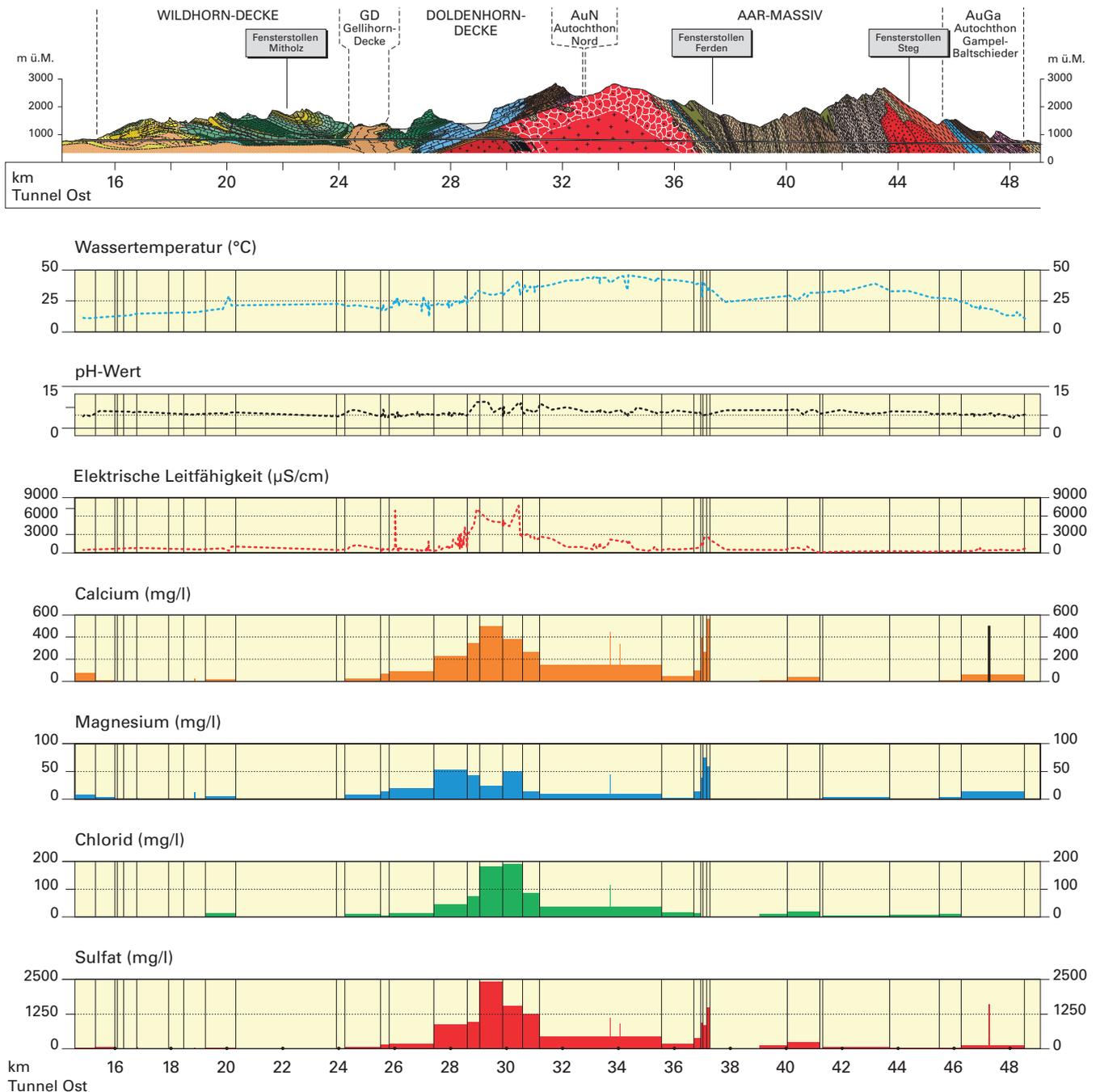


Fig. 4-6: Übersichtsprofil mit ausgewählten chemischen Parametern des Bergwassers.

beeinflusst sind. Stabile Isotopen zeigen, dass die Wässer unter heutigen klimatischen Bedingungen auf einer Höhe zwischen 1300 und 1400 m infiltrierten und eine Verweilzeit von mehreren Jahrzehnten aufweisen.

- Die bedeutendsten Wasserzutritte aus dem Stirnbereich der Doldenhorn-Decke weisen Temperaturen von gegen 20°C und Leitfähigkeiten zwischen 400 und 600 µS/cm auf. Generell verringerten sich die Leitfähigkeiten nach dem Ansteigen der Wasser führenden Strukturen. Bei den grösseren Zutritten scheint dieser Effekt besonders ausgeprägt zu sein, wo sich im Laufe der Zeit Leitfähigkeiten von gegen 300 µS/cm einstellten.
- Nach erfolgter Gebirgsinjektion und Durchörterung der verkarsteten Störungszone bei km 26,000 lagen die

Wassertemperaturen und Leitfähigkeiten der dort ausgeschiedenen Quellgruppe W2 zwischen 24 und 28°C bzw. 540 und 600 µS/cm. Aus der Oströhre, wo die Struktur wesentlich weniger gut durchlässig war und deshalb nicht injiziert wurde, traten schätzungsweise 51/s Wasser aus der Sohle, mit Temperaturen zwischen 24,3 und 25,3°C und elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 730 und 770 µS/cm.

- Die Quellgruppe W3 (Tunnel West, km 26,930–26,960) zeigt relativ konstante Temperaturen und abnehmende Leitfähigkeiten. Die Quellgruppe W4 (Tunnel West, ca. km 27.220) besteht aus mehreren Wasserzutritten, die in einer Nische zusammengeführt wurden. Ein wichtiger Anteil stösst aus der Sohle auf und gelangt durch

ein Kiesbett in die Nische. Es ist bemerkenswert, dass sich die Wasserzutritte aus dieser Struktur nach dem Auffahren sehr unterschiedlich entwickelt haben. Beim Wasserzutritt aus dem linken Parament ist die Temperatur auf 10°C abgesunken, mit einer Leitfähigkeit von 200 µS/cm (schwankend) und relativ konstanter Schüttung von 2,5 l/s, während beim Sohlaufstoss die Temperatur konstant 25,5°C beträgt und die Leitfähigkeit mit 1700 µS/cm ebenfalls konstant ist. Der Sohlaufstoss zeigt überdies deutlich erhöhte Sulfatwerte. Ein weiterer überwachter Wasserzutritt dieser Quellgruppe befindet sich auf dem rechten Parament und zeigt einen Mittelwert dieser beiden Extreme.

- Der im Südteil des Quinten-Kalks erhöhte Sulfatgehalt ist primär auf einen Kontakt zu den Gips führenden Gesteinen der Trias zurückzuführen.
- Bei den meisten Wasserzutritten aus dem Bereich des Gastern-Granits (inkl. Randzone) zeigt sich eine bemerkenswerte Konstanz der einzelnen Parameter. Einzig die Chlorid- und z.T. auch die Magnesium-Werte weisen grössere Schwankungen auf. Die Wassertemperaturen nahmen hingegen nur langsam ab, und bei der Leitfähigkeit war bei den meisten über längere Zeit messbaren Quellzutritten eine stetige Zunahme, z.T. um mehrere 100 µS/cm, zu verzeichnen.
- Interessant sind die erhöhten Gehalte zwischen km 33,500 und 34,500 in der Ost- bzw. km 33,000 und 34,300 in der Weströhre. Von der Lithologie her unterscheiden sich die in diesem Bereich anstehenden Granite und Granitporphyre nicht von denjenigen, die vor und nach dieser Zone durchfahren worden sind. Die hohen Sulfat- und Calciumwerte lassen sich somit nicht mit den im Tunnel anstehenden Gesteinen erklären. Die Wasserzutritte in diesem Bereich finden hauptsächlich aus steil stehenden K2-Klüften statt. Die Klüfte sind in Schwärmen angeordnet und bilden eigentliche subparallel zum Tunnel verlaufende «Kluftzonen». Sie scheinen bis an die Oberfläche zu reichen, wo parallel zu K2 verlaufende Lineamente schon seit längerem bekannt sind. Die stark sulfathaltigen Wässer sind vermutlich längere Zeit in den an der Oberfläche im Bereich Lötschenpass aufgeschlossenen Trias- und Lias-Sedimenten zirkuliert und dann über die ausgeprägte K2-Klüftung bis auf Tunnelniveau gelangt.
- Bei den Proben aus dem Altkristallins von km 37,011 (Oströhre) und km 36,883 (Weströhre) handelt es sich vermutlich um Mischwasser zwischen den typischen weichen Wässern des Altkristallin sowie den im nahen Jungfrau keil bzw. in den Sedimenten zirkulierenden Wässern. So liegt z.B. der Sulfatgehalt mit 470 mg/l deutlich über den im Allgemeinen im Altkristallin angebotenen Werten. Die Probe aus der Vorausböhrung JFK1 weist hingegen eine völlig andere Zusammensetzung auf. Neben markant tieferen Calcium-, Magnesium- und Sulfatwerten sind vor allem die hohen Chlor- und Fluorgehalte bemerkenswert. Die erhöhten Konzentrationen von Alkalien und Halogenen (F, Cl) weisen auf eine längere Aufenthaltsdauer im Kristallin hin. Auffallend ist auch die starke Entgasung, die während der Probenahme beobachtet wurde.

- Auffallend bei den Wässern aus den Sedimenteinschuppungen und dem Jungfrau keil sind die sehr hohen Sulfatwerte (bis 2640 mg/l), die hohen Calcium- und Magnesiumwerte sowie die hohen Karbonat- und Gesamthärten. Die hohen Werte können direkt mit den anstehenden Gesteinen (Trias und Lias) in Zusammenhang gebracht werden.
- Im südlichen Aar-Massiv konnten beim Vortrieb trotz der sehr geringen Wasserführung einige Wasserproben zur Bestimmung der Chemie entnommen werden. Es handelt sich fast ausschliesslich um leicht mineralisiertes Wasser mit einer elektrischen Leitfähigkeit von etwa 270 µS/cm vom Typ Na-HCO<sub>3</sub> mit wenig Ca und SO<sub>4</sub> und mit einem hohem pH-Wert. Die Sulfatgehalte liegen mit 31,5 mg/l weit unter dem Grenzwert für sulfataggressives Wasser.
- Beim Karstwasser aus dem Quinten-Kalk bei km 46,488 in der Oströhre handelt es sich um wenig mineralisiertes, weiches Wasser (mittlere elektrische Leitfähigkeit 175 µS/cm) mit einer Temperatur von 14,3°C. Das Wasser ist etwa 8°C kälter als die Felstemperatur. In Bezug auf Calcit ist das Wasser praktisch im Gleichgewicht.
- Das Wasser aus dem Lias-Kalk ist an der Grenze von mittelhart zu hart; die elektrische Leitfähigkeit ist dementsprechend hoch (ca. 450 µS/cm). In Bezug auf Calcit dürfte dieses Wasser eher übersättigt sein.
- Das Wasser aus dem südlichsten Kristallinabschnitt ist mittelhart, die Mineralisierung ist mässig (mittlere elektr. Leitfähigkeit 366 µS/cm), die Temperatur beträgt 11,8°C. Der Sulfatgehalt liegt mit max. 56 mg/l weit unter der Grenze für sulfataggressives Wasser.

### 4.3 Wasserfassungen

#### *Wasserversorgung Basistunnel*

Die Versorgung des Basistunnels mit Lösch- und Kühlwasser sowie die Speisung der Stetsläufe erfolgt auf der Nordseite über ein nördlich der Querverbindung 38 (bei km 26,35) gelegenes Pump- und Speicherbecken. Dieses Becken wird mit den südlich davon vorhandenen Wasserzutritten aus den verkarsteten Abschnitten der Doldenhorn-Decke alimentiert. Auf der Südseite stammt das Wasser für die Versorgung des Basistunnels aus den obersten 600 m des Fensterstollens Ferden. Von dort aus wird es über mehrere Stufen mit entsprechenden Becken in den Basistunnel hinuntergeführt und für die verschiedenen Zwecke verteilt. Das Kühlwasser wird auf beiden Seiten nach seiner Verwendung wieder in die Bergwasserleitung eingeleitet. Dies hat zur Folge, dass heute bei beiden Portalen leicht höhere Wassertemperaturen gemessen werden als dies nach Vortriebsende der Fall war.

#### *Ersatzwasser St. German*

Mit der Vorausböhrung R37, von km 46,493 aus in Richtung Nord, wurde im Quinten-Kalk des Autochthons Gampel-Baltschieder ein grösseres Wasservorkommen angebohrt, das anfänglich ca. 30 l/s Wasser führte und mehrere Tonnen braunen Sand ausspülte. Über mehrere Monate

blieb das Wasser trüb. Der Druck konnte zwar gemessen werden, die 8 bar stellen aber ein Minimum dar, da eine gewisse Druckentlastung über eine Kluft stattfand.

Das Wasser wurde in der Folge in einem Messbecken gesammelt und mittels einer Leitung bis in den Rotten (Rhône) geführt. Sporadisch, vor allem während der Schneeschmelze, war das Wasser noch trüb, im Jahr 2005 allerdings kaum mehr nachweisbar. Um das Wasser als Trinkwasser für St. German zu nutzen, wurde dann anfangs 2005 versucht, das ehemalige Bohrloch aufzuboehren und das Wasser neu zu fassen. Die Fassung besteht nun aus zwei separaten Ableitungen, die in einem Abstand von etwa 5 m das Wasser am First sammeln und zu einer Schieberkammer im Parament auf der Westseite des Tunnels ableiten. Von dieser Schieberkammer aus führt (neben einem Überlauf in die Bergwasserleitung in der Tunnelsohle) die Trinkwasserleitung im Bankett bis zur Querverbindung bei km 48,53 und von dort zum Portal des Pilotstollens.

#### 4.4 Versinterung

Die Wässer zwischen Frutigen und Mitholz sind nicht betonaggressiv, mit Ausnahme des Wasserzutritts bei km 16,580–16,583, bei dem eine schwache Betonaggressivität festgestellt wurde.

Die im Öhrli-Kalk angetroffenen Wässer sind in der Regel schwach ablagernd und schwach betonaggressiv, mit Ausnahme der zwei chemisch verschiedenen Zutritte bei der Quellgruppe W4, wo eine deutliche Tendenz zu Ablagerung bzw. Korrosion besteht. Im Quinten-Kalk sind die Wässer aufgrund des erhöhten Sulfatgehaltes im Allgemeinen schwach bis stark betonaggressiv und neigen zu Versinterung.

Die Wässer aus den Sedimenteinschuppungen und dem Jungfrau keil sind stark betonaggressiv und neigen zu Versinterungen.

Die Wasserproben aus den vereinzelt Zutritten im südlichen Aar-Massiv zeigen Versinterungs-/Korrosionswerte nach Ryznar zwischen SI 8,37 und 9,63, was als stark korrosiv bezeichnet wird. Allerdings bleibt unklar, ob Wasser mit dieser Zusammensetzung mit diesem Index beschrieben werden sollte.

Beim Wasser aus dem südlichsten Kristallinabschnitt deutet der SI-Index nach Ryznar auf eher korrosives Wasser hin.

Wie die aktuellen Erfahrungen von der Überwachung des Tunnelwassersystems zeigen, beschränken sich die effektiven Versinterungen (Fig. 4-7) hauptsächlich auf drei Bereiche:

- Portal Frutigen: In diesem Bereich wurde zur Unterquerung der bestehenden Berglinie ein Injektionsrohrschirm erstellt, bei dem nun der Kalk aus dem Zement gelöst und anschliessend in den Leitungen wieder abgesetzt wird.
- Bereich Gastern-Granit: Durch das Überleiten von Bergwasser von Norden nach Süden (für Kühlzwecke) ergeben sich beim Zutritt von Wasser aus dem Gastern-Granit Ausfällungen in der Bergwasserleitung.



Fig. 4-7: Kalkausscheidung.

- Bereich Portal Raron: Auch hier wurde ein Injektionsrohrschirm zur Unterquerung der Strasse nach St. German gebaut.

Daraus zeigt sich klar, dass beim Lötschberg-Basistunnel für die Bildung von Versinterungen die Baumassnahmen viel entscheidender waren als die chemische Zusammensetzung der angetroffenen Bergwässer.

#### 4.5 Quellmessungen und Beeinträchtigungen

Die Überwachung des alluvialen Grundwassers, der Oberflächengewässer und des Bergwasserspiegels sowie die Quellüberwachung wurden bis mindestens zwei Jahre nach Abschluss der Bauarbeiten durchgeführt und per Ende 2006 abgeschlossen. Die grosse Trockenheit von 2003 führte bei der Beurteilung von Beeinträchtigungen wohl zu einem vermehrten Aufwand; sie dürfte sich aber eher günstig auf das ganze Projekt ausgewirkt haben, da dadurch sicher auch die Wasserzutritte in den Vortrieben eher geringer ausfielen als erwartet.

Auf der Nordseite (Frutigen bis Lötschenpass) bilden einige wenige abdrainierte Quellen, für die Ersatzwasser beschafft wurde, und die erwartete, moderate Absenkung des Bergwasserspiegels in den Wasser führenden Felsstrecken die einzigen Beeinflussungen durch den Bau des Basistunnels. Diese Beeinflussungen sind grösstenteils schon beim Bau des Sondierstollens eingetreten. Die Karstquellen im

Raum Kandersteg zeigen dagegen, wohl nicht zuletzt wegen der erfolgreich durchgeführten Abdichtungsinjektionen (s. Kap. 8.2.1), keinerlei Anzeichen einer Beeinträchtigung. Das Grundwasser in den quartären Trogfüllungen des Kanderdals und des Gasteretals blieb ebenfalls unbeeinflusst.

Zwischen dem Lötschenpass und Raron wurde mit Ausnahme der 2001/2002 in und um St. German abdrainierten Quellen bei keiner Quelle eine eindeutige baubedingte Reduktion der Schüttung festgestellt. Es konnte auch keine baubedingte Beeinträchtigung des Grundwassers und der Oberflächengewässer festgestellt werden. Die Absenkung des Bergwasserspiegels infolge der Drainage durch den Basistunnel blieb gering. Dies steht im Einklang mit den nur geringen Wasserzutritten im vom Basistunnel durchörterten Kristallin und den erfolgreichen Abdichtungsarbeiten im Jungfraukeil und den Sedimenteinschuppungen (s. Kap. 8.2.2).

#### 4.6 Vergleich Prognose - Befund

Der Wasseranfall zwischen Mitholz und Frutigen war insgesamt deutlich geringer als erwartet, was auf die effiziente Gebirgsdrainage durch den Dienststollen zurückzuführen ist. Im Dienst- und Fensterstollen Mitholz selber beträgt der Wasseranfall schätzungsweise 5 l/s (September 2004), und die Mehrzahl der im Dienststollen überwachten Wasserzutritte ist versiegt. Das bedeutet, dass sich die Fliesssysteme grösstenteils entleert haben und dass nur wenig Wasser nachfliesst. Der totale Bergwasseranfall ist im Tunnel Nord mit weniger als 10 l/s geringer als prognostiziert (20 l/s).

Von Mitholz Richtung Süden war der zu erwartende Wasseranfall in den Kalken der Doldenhorn-Decke primär vom Antreffen vorhandener Fliesswege bzw. Verkarstungen anhängig und somit nur mit Vorbehalt prognostizierbar. Rückblickend wurden die prognostizierten Wassermengen nirgendwo erreicht. Der Wasseranfall aus der Doldenhorn-Decke beträgt weniger als 150 l/s, wovon etwa 45 l/s aus dem Quinten-Kalk stammen (Oktober 2003). Die in der Plangenehmigung verfügte maximal zulässige Drainage-

menge für diesen Abschnitt von 150 l/s kann damit problemlos eingehalten werden.

Auf der Südseite wurde das Risiko von Wassereinbrüchen in den Kalken des Autochthons Gampel-Baltschieder als gross angenommen, in den übrigen Gesteinseinheiten als klein. Deshalb wurde der Bergwasserdruck im Lias-Kalk durch Drainagebohrungen reduziert. Eigentliche Wassereinbrüche wurden dadurch verhindert. Wasser floss unter relativ geringem Druck direkt beim Vortrieb in den Tunnel. Im Quinten-Kalk wurde durch die systematischen Vorausböhrungen das Risiko von Wassereinbrüchen ebenfalls vermindert. Ein kleineres Karströhrensystem blieb dabei unentdeckt, machte aber beim Anfahren durch die TBM keine Probleme. Ein grösseres Karstsystem konnte über eine Vorausböhrung kontrolliert entlastet werden. Die Fassung dieses Karstes zur Nutzung als Trinkwasserersatz war hingegen recht aufwendig.

Der maximale jährlich wiederkehrende Wasseranfall wurde für den ganzen Tunnel auf der Südseite auf 571 l/s geschätzt (für beide Röhren 741 l/s). Im Mittel wurden bisher 641 l/s (für beide Röhren ca. 821 l/s) gemessen. Da bei diesen Mittelwerten die Erstentleerung eine gewisse Rolle spielt, kann man davon ausgehen, dass der maximale jährlich wiederkehrende Wasseranfall sehr nahe an diesen Angaben liegt. Im Einzelnen wurde hingegen der Wasseranfall für das Autochthon unter- und für das Aar-Massiv deutlich überschätzt. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die Kluftöffnungen mit zunehmender Überlagerung wesentlich stärker reduziert wurden als dies erwartet worden war.

Der Chemismus der Bergwässer im Autochthon Gampel-Baltschieder stimmt mit der Prognose recht gut überein. Etwas höhere Sulfatwerte in den wenig Wasser führenden «Aalénien-Schiefern» weichen von der Prognose ab. Bei diesen wenigen Zutritten ist die Betonaggressivität des Wassers erhöht, allerdings trockneten diese Zutritte praktisch aus. Im Aar-Massiv waren die Wässer deutlich höher mineralisiert und härter als erwartet. Bei diesen Wässern handelt es sich mehrheitlich um Natrium-Hydrogenkarbonat-Wässer, welche auch einen relativ hohen pH-Wert aufweisen. Die Sulfatwerte sind dagegen recht niedrig und liegen im Bereich der Prognose.

## 5. Geotechnik

### 5.1 Gesteinstypen und -kennziffern

Beim Vortrieb wurden die angetroffenen Gesteine den lithologischen Einheiten, gleichzeitig aber auch den für die Prognose definierten Gesteinstypen zugeteilt. Da diese Gesteinstypen jeweils Gesteine mit ähnlichen Gesteins-

eigenschaften umfassten, erlaubte dieses Vorgehen die in der Prognose gemachten Angaben mit relativ geringen Probenanzahlen zu überprüfen. In Tabelle 5-1 sind die beim Ausbruch des Lötschberg-Basistunnels angetroffenen Gesteinstypen zusammengestellt.

Tab. 5-1: Gesteinstypen (TBM- und Sprengvortrieb).

| Gesteinstyp | Beschreibung  | Sprengvortrieb |               | TBM-Vortrieb  |               | Total         |               |
|-------------|---|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|             |   | Progn.<br>m    | Befund<br>m   | Progn.<br>m   | Befund<br>m   | Progn.<br>m   | Befund<br>m   |
| 1.1         | <b>Kakirit</b>  | 189            | 49            | 82            | 0             | 271           | 49            |
| 1.2         | <b>Gips/Anhydrit</b>  | 119            | 227           | –             | –             | 119           | 227           |
| 2           | <b>Tonige Schiefer:</b> Flyschschiefer, Rhät-(Dogger-)Schiefer, Karbon-Schiefer   | 5 753          | 5 917         | –             | –             | 5 753         | 5 917         |
| 3           | <b>Kalkige Schiefer:</b> Globigerinen-Schiefer, Palfris-Schiefer, «Aalénien-Schiefer», Lias-Schiefer  | 3 597          | 3 660         | 835           | 565           | 4 432         | 4 225         |
| 4           | <b>Mergel/Dolomite:</b> Fleckenmergel, Öhrli-Mergel, Dogger-Mergel, Trias-Dolomit ( $\pm$ Anhydrit/Gips)  | 1 817          | 1 665         | 169           | 446           | 1 986         | 2 111         |
| 5           | <b>Sandsteine:</b> Flyschsandstein, Taveyannaz-Sandstein, Hohgant-Sandstein, Rhät-(Dogger-)Sandstein, Trias-Sandstein, Perm- und Karbon-Sandstein | 2 900          | 2 857         | –             | –             | 2 900         | 2 857         |
| 6.1         | <b>Kalke:</b> Lithothamnienkalk, Schratzenkalk, Drusberg-Schichten, Betlis-Kalk, Öhrli-Kalk, Quinten-Kalk, Dogger-Kalk, Lias-Kalk, Kalkmylonit    | 5 135          | 6 473         | 1 452         | 1 706         | 6 587         | 8 179         |
| 6.2         | <b>Kieselige Kalke:</b> Kieselkalk, Sichel-Kalk   | 4 187          | 4 478         | –             | –             | 4 187         | 4 478         |
|             | <b>Total Sedimente</b>  | <b>23 697</b>  | <b>25 326</b> | <b>2 538</b>  | <b>2 717</b>  | <b>26 235</b> | <b>28 043</b> |
| 7.1         | <b>Phyllit,</b> Quarten-Fm., Ruschelzonen   | 729            | 431           | 257           | 0             | 986           | 431           |
| 7.2         | <b>Hydrothermal veränderter Gneis</b>   | 135            | 14            | 144           | 0             | 279           | 14            |
| 8.1         | <b>Altkristalline Schiefer</b>  | 1 467          | 937           | 1 353         | 160           | 2 820         | 1 097         |
| 8.2         | <b>Altkristalline Gneise:</b> dunkle, massige Gneise, Bändergneise, schiefrig-massige Gneise  | 4 858          | 4 732         | 7 246         | 7 322         | 12 104        | 12 054        |
| 8.3         | <b>Altkristalline Gneise:</b> granitische Schollengneise  | –              | –             | 2 800         | 3 476         | 2 800         | 3 476         |
| 9.1         | <b>Granitische Gesteine:</b> Gastern-Granit, Granit-/Quarzporphyr, Baltschieder-Granodiorit, Zentraler Aare-Granit, Aplit                         | 13 802         | 14 237        | 3 439         | 4 604         | 17 241        | 18 841        |
| 9.2         | <b>Amphibolit</b>   | 827            | 28            | 899           | 397           | 1 726         | 425           |
| 9.3         | <b>Quarzsandstein</b>   | 190            | –             | –             | –             | 190           | –             |
|             | <b>Total Kristallin</b>   | <b>22 008</b>  | <b>20 379</b> | <b>16 138</b> | <b>15 959</b> | <b>38 146</b> | <b>36 338</b> |
|             | <b>Gesamttotal</b>  | <b>45 705</b>  | <b>45 705</b> | <b>18 676</b> | <b>18 676</b> | <b>64 381</b> | <b>64 381</b> |

Tab. 5-2: Gesteinskennziffern Sedimente (Abweichungen, die die prognostizierte Standardabweichung übertreffen, sind grau unterlegt).

| Gesteins-<br>typ | Lithologie          | Einaxiale Druckfestigkeit |            |                 | CAI        |        |             | Spaltzugfestigkeit |            |                 |
|------------------|---------------------|---------------------------|------------|-----------------|------------|--------|-------------|--------------------|------------|-----------------|
|                  |                     | Anz. Vers.                | Mittel MPa | Stand. abw. MPa | Anz. Vers. | Mittel | Stand. abw. | Anz. Vers.         | Mittel MPa | Stand. abw. MPa |
| 2                | Flyschschiefer      | 2                         | 31         | 7,8             | 2          | 1      | 0,6         | 2                  | 6,2        | 2,3             |
| 3                | Palfris-Schiefer    | 4                         | 60         | 19,6            | 2          | 0,9    | 0,1         | 3                  | 5,4        | 2,4             |
| 3                | «Aalénien-Schiefer» | 4                         | 77         | 41,6            | 3          | 2,4    | 0,4         | 0                  |            |                 |
| 3                | Lias-Schiefer       | 2                         | 64         | 63,4            | 3          | 0,5    | 0,4         | 2                  | 8,4        | 2,1             |
| 4                | Öhrli-Mergel        | 1                         | 75         |                 | 1          | 0,8    |             | 1                  | 7,7        |                 |
| 4                | Dogger-Mergel       | 4                         | 114        | 18,7            | 7          | 1,3    | 0,4         | 4                  | 9,6        | 1,2             |
| 5                | Flyschsandstein     | 4                         | 133        | 47,8            | 4          | 11,0   | 2,6         | 1                  | 2,3        |                 |
| 6                | Öhrli-Kalk          | 2                         | 159        | 46,0            | 2          | 1,0    | 0,1         | 2                  | 11,0       | 2,6             |
| 6                | Kieselkalk          | 4                         | 147        | 51,8            | 3          | 1,7    | 0,7         | 3                  | 16,9       | 5,1             |
| 6                | Sichel-Kalk         | 3                         | 133        | 43,7            | 1          | 1,6    | –           | 3                  | 10,9       | 3,9             |
| 6                | Quinten-Kalk        | 4                         | 120        | 20,6            | 5          | 1,2    | 0,2         | 4                  | 9,1        | 2,5             |
| 6                | Dogger-Kalk         | 4                         | 105        | 23,2            | 5          | 1,3    | 0,3         | 2                  | 10,2       | 1,0             |
| 6                | Lias-Kalk           | 6                         | 61         | 17,5            | 6          | 2,0    | 0,6         | 0                  | –          |                 |

Tab. 5-3: Gesteinskennziffern Kristallin (Abweichungen, die die prognostizierte Standardabweichung übertreffen, sind grau unterlegt).

| Gesteins-<br>typ | Lithologie                            | Einaxiale Druckfestigkeit |            |                 | CAI        |        |             | Spaltzugfestigkeit |            |                 |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------|------------|-----------------|------------|--------|-------------|--------------------|------------|-----------------|
|                  |                                       | Anz. Vers.                | Mittel MPa | Stand. abw. MPa | Anz. Vers. | Mittel | Stand. abw. | Anz. Vers.         | Mittel MPa | Stand. abw. MPa |
| 8.1              | Altkristalline Schiefer               | 0                         | –          |                 | 1          | 1,1    |             | 0                  | –          |                 |
| 8.2              | Altkristalliner Gneis                 | 26                        | 106        | 17              | 26         | 3,3    | 0,6         | 15                 | 11,4       | 1,7             |
| 8.3              | Altkristalline granit. Schollengneise | 27                        | 221        | 54              | 26         | 5,2    | 0,6         | 21                 | 14,2       | 1               |
| 9.1              | Baltschieder-Granodiorit              | 8                         | 128        | 24              | 8          | 4,8    | 0,3         | 8                  | 11,2       | 1,8             |
| 9.1              | Aplit                                 | 2                         | 170        | 61              | 3          | 5,1    | 0,2         | 2                  | 14,0       | 2,2             |
| 9.1              | Grobkörniger Granit                   | 4                         | 150        | 38              | 4          | 5,3    | 0,3         | 4                  | 10,5       | 1,1             |
| 9.1              | Feinkörniger Granit                   | 3                         | 177        | 18              | 3          | 5,5    | 0,4         | 3                  | 10,5       | 1,2             |
| 9.1              | Gastern-Granit                        | 126                       | 133        | 75              | 99         | 4,2    | 0,5         | 100                | 10,0       | 2,1             |
| 9.2              | Amphibolit, Amphibolgneis             | 3                         | 173        | 32              | 3          | 3,2    | 1,1         | 2                  | 15,9       | 4,0             |

Beim Vergleich der Gesteinstypenverteilung des Befundes mit jener der Prognose kann festgehalten werden, dass die Abweichungen durchwegs kleiner als 5% sind (bezogen auf die gesamte Tunnelstrecke von 64381 m). Damit ergibt sich im Grossen gesehen eine ausgezeichnete Übereinstimmung. Natürlich ist bei dieser Beurteilung zu berücksichtigen, dass wegen der grossen Streckenlänge sicher ein gewisser Ausgleich erfolgte und auf kurzen Streckenabschnitten grössere Abweichungen auftraten. Generell ist zudem

darauf hinzuweisen, dass in der Prognose der Anteil an bautechnisch ungünstigen Gesteinen (Kakirite, Schiefer usw.) überschätzt worden war.

Die Probenentnahme für die Bestimmung von Gesteinskennziffern erfolgte nach Bedarf, d.h. je nach den Anforderungen der Projektingenieure bzw. der Unternehmen. Die meisten der untersuchten Proben stammen aus radialen Bohrungen (Extensometerbohrungen, Probenentnahmebohrungen usw.). Vor allem im Abschnitt Ferden

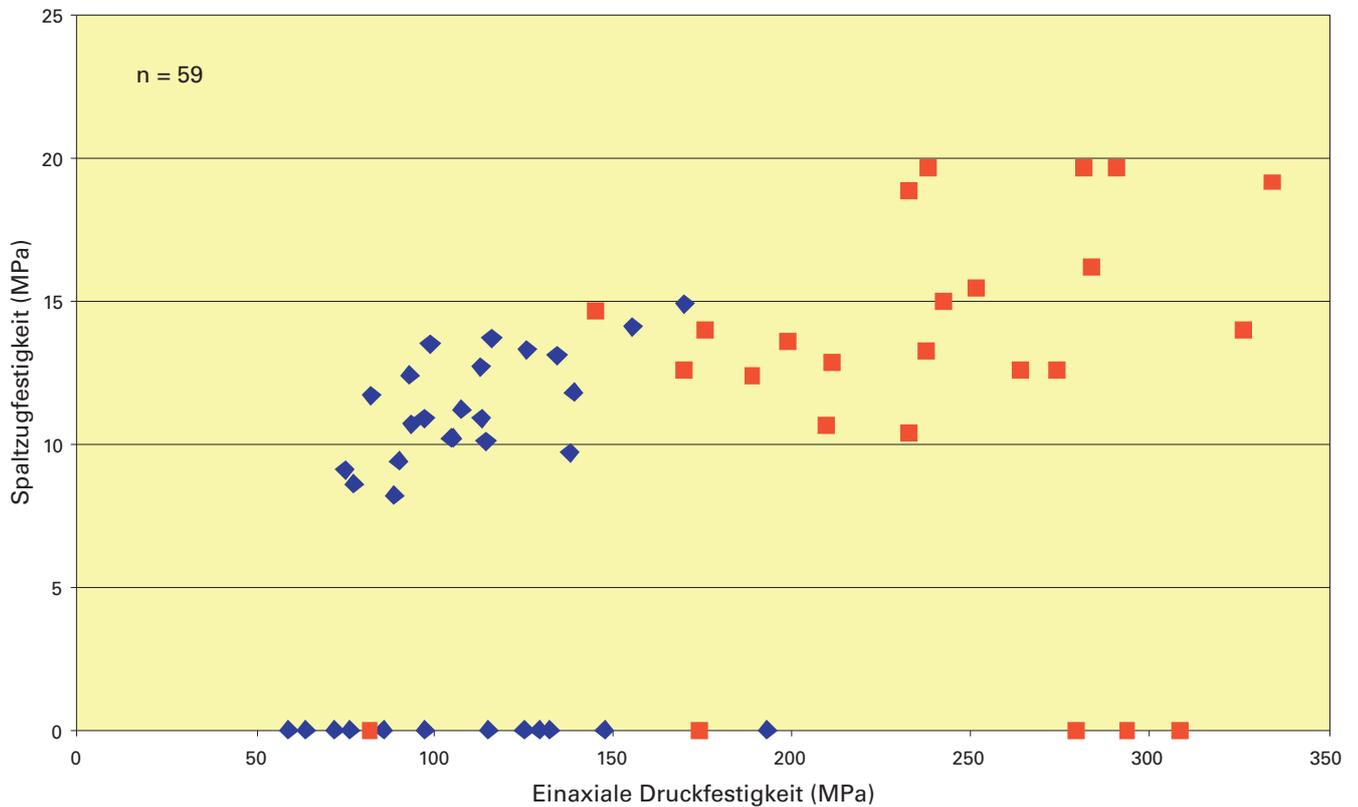


Fig. 5-1: Spaltzug-/Druckfestigkeit der altkristallinen Gneise (Gesteinstyp 8.2 = blau, Gesteinstyp 8.3 = rot; Spaltzugfestigkeit = 0 bedeutet, dass die entsprechenden Probe nicht untersucht wurde).

Tab. 5-4: Versuchsergebnisse einaxiale Druckfestigkeit ( $\gamma$ : Raumgewicht; Or: Orientierung der Schieferung bezüglich der Druckachse;  $\sigma_c$ : einaxiale Druckfestigkeit;  $E_{50\%}$ : E-Modul bei 50% der Bruchspannung; Rupt.: Verhältnis  $\sigma_1/\sigma_c$  an dem Punkt, wo eine plötzliche Zunahme der Geräusche auftritt).

| Probe      | Lithologie | $\gamma$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | Or<br>[°] | $\sigma_c$<br>[MPa] | $E_{50\%}$<br>[GPa] | Rupt.<br>[%] |
|------------|------------|----------------------------------|-----------|---------------------|---------------------|--------------|
| WS 31490   | Granit     | 26,8                             | 75        | 117,3               | 32,1                | 70           |
| WS 31510   | Amphibolit | 27,8                             | 0         | 173,2               | 48,7                | 62           |
| WS 31600 A | Granit     | 27,2                             | 45        | 151,7               | 38,0                | 64           |
| WS 31600 B | Granit     | 27,1                             | 10        | 167,0               | 42,9                | 90           |
| ES 31750   | Granit     | 26,9                             | 80        | 132,2               | 40,5                | 82           |

wurden jedoch Proben aus dem Haufwerk entnommen. Anschliessend wurden die Proben jeweils in zertifizierte Labors gebracht und dort nach den Vorgaben der ISRM für die diversen Tests analysiert. Insbesondere wurden die folgenden Gesteinskennziffern bestimmt:

- Einaxiale Druckfestigkeit
- Spaltzugfestigkeit
- Cerchar-Abrasivität (Cerchar Abrasivity Index, CAI)

Die Resultate aller während der Vortriebsarbeiten durchgeführten felsmechanischen Laboruntersuchungen sind in den Tabellen 5-2 bis 5-4 in Form von Mittelwerten für die einzelnen Gesteinstypen zusammengefasst.

Generell liegen die Resultate für die einzelnen Gesteinstypen eher im oberen Bereich der Prognose. Sie befinden sich aber bis auf wenige Ausnahmen klar noch im prognostizierten Streubereich. Einzig die Abrasivität der massigen kristallinen Gesteine sowie die Felskennziffern der granitischen Schollengneise des Altkristallins sind deutlich grösser als prognostiziert. Diese Gesteine wurden aber bei den Voruntersuchungen nicht oder nur randlich erbohrt, so dass für die Prognose kaum Resultate aus dem Bereich des Basis-tunnels vorhanden waren. Insbesondere von den Schollengneisen, die im Bereich des Bietschhorns auftreten und die an der Oberfläche stark verwittert sind, lagen für die Prognose keine Untersuchungsergebnisse vor.

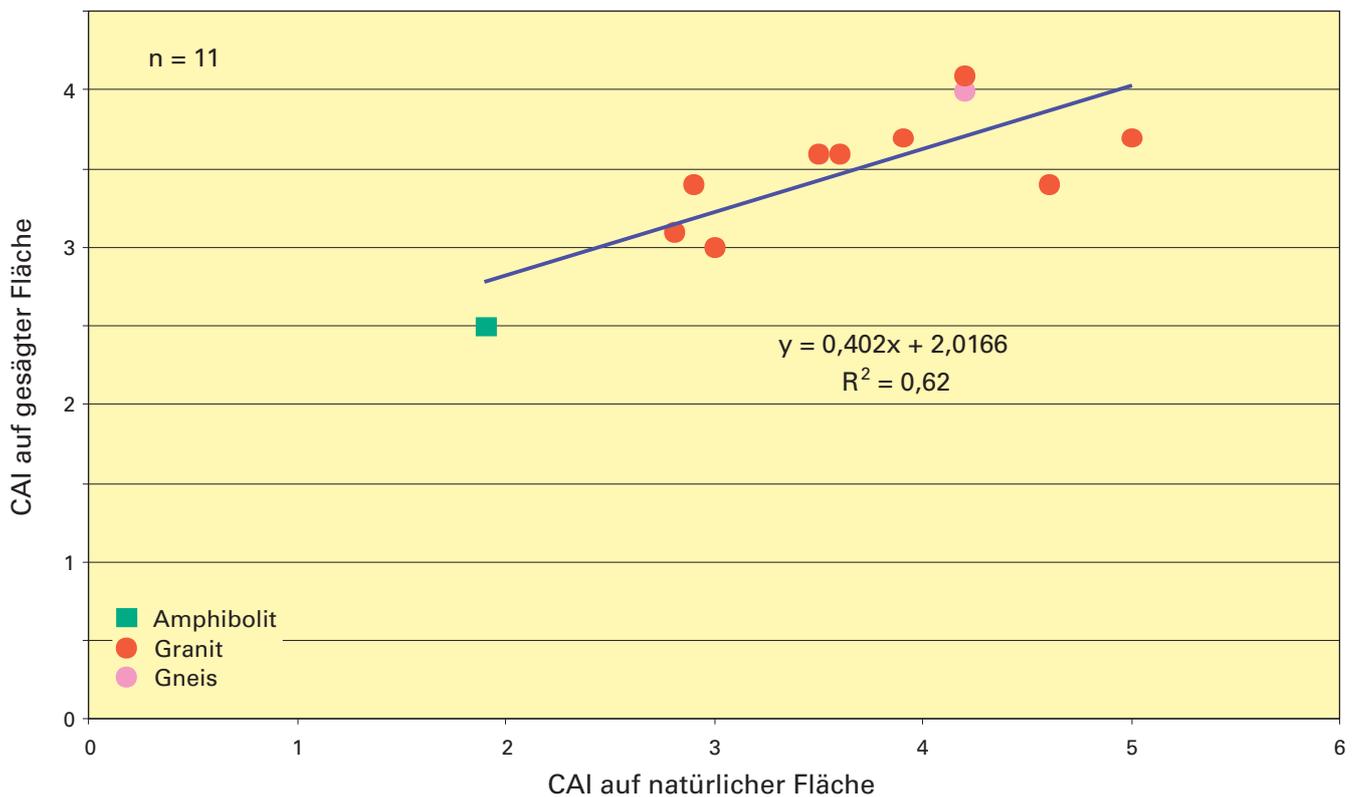


Fig. 5-2: Cerchar Abrasivity Index auf natürlichen und gesägten Gesteinsflächen.

Im Vergleich mit der Prognose ergeben sich bei den Gesteinskennziffern der Sedimentgesteine nur wenige Abweichungen. Die Abweichung bei den «Aalénien-Schiefern» geht darauf zurück, dass beim Mittelwert des Befundes im Gegensatz zur Prognose die Quarzadern mitberücksichtigt wurden. Die beim Befund untersuchten Dogger-Mergel aus dem Autochthon Gampel-Baltschieder wiesen einen wesentlich höheren Kalkgehalt auf als der Dogger-Mergel der Prognose. Generell gilt zudem, dass bei der Beprobung weicher, schiefriger Gesteinstypen zwangsläufig eine Bevorzugung der günstigeren Partien stattfindet, weil für die Prüfung intakte Kernabschnitte erforderlich sind. Im Vergleich zu den tatsächlichen Werten im Gebirge sind die Laborwerte dieser Gesteine somit tendenziell sicher zu hoch.

Wie das Diagramm der Figur 5-1 beispielhaft zeigt, ist die Bildung von Mittelwerten zumindest teilweise allzu vereinfachend und widerspiegelt die natürlicherweise vorhandene grosse Streuung viel zu wenig. Da in diesem speziellen Fall ein lithologisch klar abgrenzbares Gestein, die granitischen Schollengneise, generell im obersten Streubereich liegt, wurde auf Grund der Untersuchungsergebnisse deshalb für dieses Gestein ein eigener, neuer Gesteinstyp ausgetrennt (Gesteinstyp 8.3).

Ergänzend ist darauf hinzuweisen, dass die beobachteten grossen Streuungen die tatsächlichen Verhältnisse vermutlich relativ gut wiedergeben dürften. Diese sind aber auch bei einer guten Probenauswahl meist sehr schwierig zu erfassen, da die Probenzahl normalerweise stark begrenzt ist.

Bei einigen einaxialen Druckversuchen wurden die bei der Belastung auftretenden Geräusche aufgezeichnet. Diese Grösse nimmt vor dem mechanischen Versagen schlagartig zu und ist ein Mass für die Bildung von Mikrorissen im Probenkörper. Zudem lassen sich daraus Rückschlüsse auf die Bergschlaggefährdung machen (je schlagartiger die Mikrorissbildung, desto grösser die Gefährdung). Bei den in Tabelle 5-4 aufgeführten Resultaten sind sicher die beiden untersten Proben bezüglich Bergschlaggefährdung als relativ kritisch anzusehen.

Die Bestimmung der Abrasivität (CAI) erfolgte bei einigen Proben sowohl auf natürlichen als auch auf gesägten Gesteinsflächen. Dabei ergaben sich uneinheitliche Resultate mit einer schlechten Korrelation (Fig. 5-2). Dies dürfte vermutlich auf die Ausbildung der natürlichen Fläche (z. B. Schieferungsfläche im Gneis), die Mineralkorngrösse und die Körnigkeit zurückzuführen sein. Nicht zu vergessen ist auch, dass bei diesem Versuch die Versuchsdurchführung heikel ist und sich allein schon aus diesem Grund eine erhebliche Streuung ergibt. Insbesondere bei grobkörnigen oder porphyrischen Gesteinen ist es theoretisch denkbar, dass die Abrasivität eines Minerals und nicht jene des Gesteins bestimmt wird.

Beim Vergleich der prognostizierten mit den tatsächlich vorgefundenen Gesteinskennziffern ist die Probenentnahme zu berücksichtigen, da sich herausstellte, dass die Kennziffern von Proben aus dem Haufwerk deutlich höhere Werte ergaben als jene von Bohrkernen. Wie ein Beispiel einer Probe aus dem Gastern-Granit zeigte, kann dabei bei der Probe aus dem Haufwerk ohne weiteres eine bis über 50%

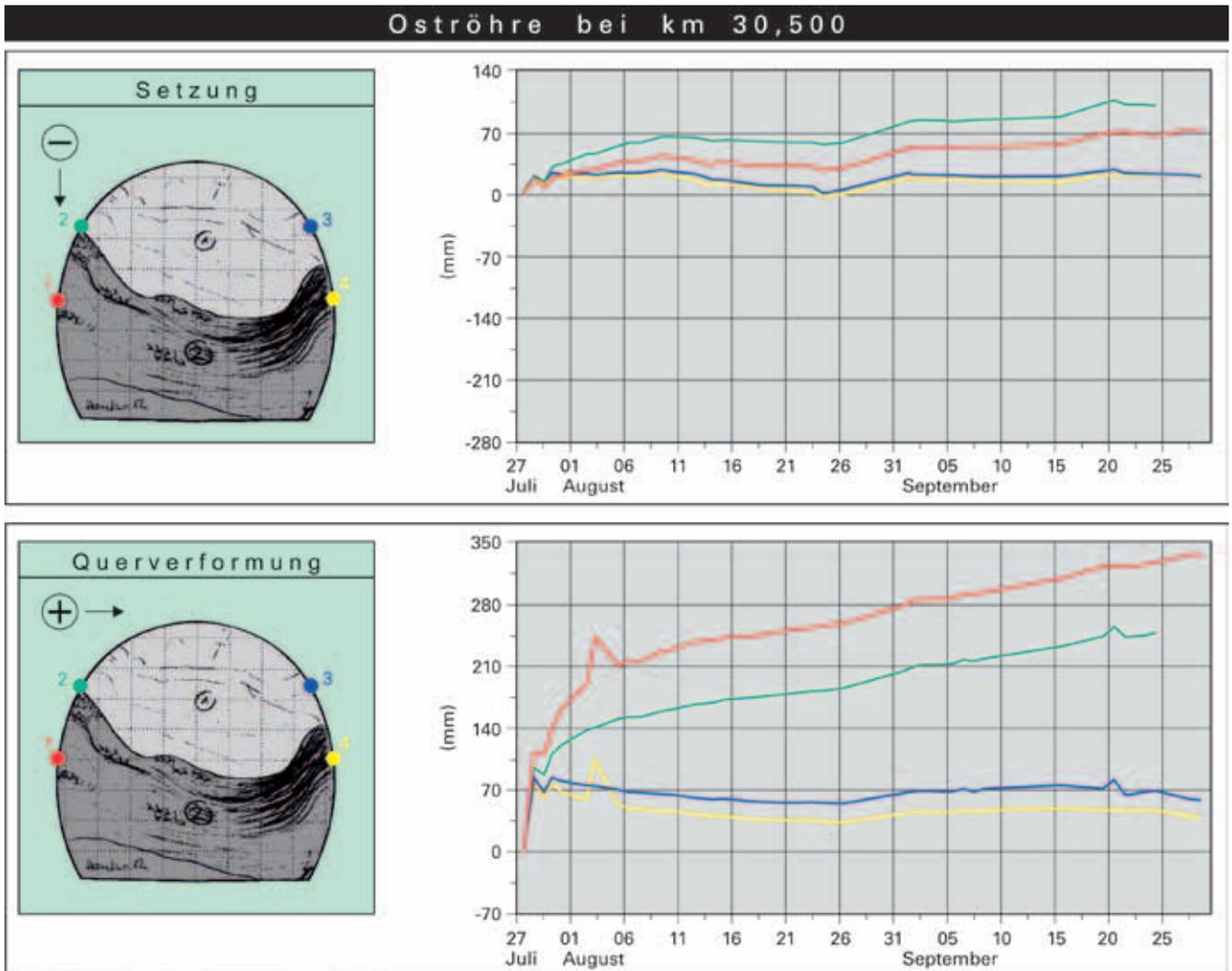


Fig. 5-3: Konvergenzen im Karbon (Oströhre km 30,500, nach 63 Tagen).

grössere Druckfestigkeit bestimmt werden im Vergleich zum gleichen Gestein aus einem Bohrkern. Dies dürfte seine Ursache darin haben, dass nur die «besseren» Gesteine als Blöcke vorliegen (insbesondere wenn für die Analyse eine recht grosse minimale Blockgrösse verlangt wird), während die «schlechteren» schon beim Abbau zerstört werden.

Die Mikrorissbildung, die bei der Entnahme von Proben aus grösserer Tiefe als Folge der Entlastung entsteht und zu einer gewissen Reduktion der Festigkeiten führt, dürfte dagegen nur eine bescheidene Rolle spielen. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass Proben aus den oberflächennahen Bereichen meist mehr oder weniger verwittert bzw. aufgelockert sind und daher eher zu tiefe Festigkeiten ergeben. Andererseits entstehen beim Vortrieb um den Ausbruch herum ebenfalls Mikrorisse, weshalb die Bestimmung einer unbeeinträchtigten Festigkeit wohl kaum entscheidend ist.

## 5.2 Konvergenzen

In den Sedimentstrecken des Abschnittes Mitholz wurden in schiefrigen Lithologien systematisch alle 40 m **Konvergenz-Messquerschnitte** versetzt. Diese hatten zum Zweck, das Gebirgsverhalten dieser als bautechnisch relativ ungünstig beurteilten Gesteine lückenlos zu erfassen. Dabei wurde normalerweise die horizontale Verkürzung des Ausbruchquerschnitts in der unteren Paramenthälfte gemessen. Einzig in den Bereichen mit grossen Konvergenzen (> 5 cm) wurden vollständige Querschnitte mit im Allgemeinen fünf Messpunkten eingerichtet. Die gemessenen Konvergenzen sind in tektonisch beanspruchten, blättrigen Schiefen naturgemäss grösser als in kompakten und tektonisch wenig deformierten Abschnitten.

In den Flyschschiefern waren Konvergenzen von über 50 mm nicht selten. Im Tunnelabschnitt km 17,840–17,140, wo schwarze, blättrige bis feinplattige, stark zerscherte Mergelschiefer mit häufig darin eingelagerten Sandsteinboudins in flacher Lagerung anstehen, wurden besonders grosse Konvergenzen festgestellt. Der Messquerschnitt mit den grössten Konvergenzen in diesem Bereich (588 mm nach



Fig. 5-4: Verbogene Stahlbögen im Karbon (Oströhre km 30,421).

2,5 Jahren) liegt unmittelbar südlich der QV 09 (km 17,320). Ein weiterer Abschnitt mit grossen Deformationen befindet sich zwischen QV 05 und 06 (km 16,290–16,210), wo tektonisch stark gestörte Flyschgesteine sowie eine flach einfallende kakiritische Störung vorhanden sind. Auch südlich des Felspeilers im Bereich der Verzweigung Adelrain zeigen sich in stark tektonisierten Flyschschiefern mit zerrissenen Sandsteinbänken trotz des Einbaus von Stahlbögen um die 50 mm Konvergenz (nach 300 Tagen).

In den Palfris-Schiefern waren die Konvergenzen generell geringer als in den Flysch-Schiefern. Solche zwischen 5 und 20 mm nach 30 Tagen waren aber trotzdem die Regel. Bautechnisch sind Konvergenzen in dieser Grössenordnung noch unbedenklich. Grössere Bewegungen traten im Abschnitt zwischen km 20,360 und 20,320 auf, wo die Palfris-Schiefer in unmittelbarer Nähe zum Mélange tektonisch stärker beansprucht sind, sowie bei km 19,840 und km 19,560, wo jeweils kleine Wasserzutritte ebenfalls auf einen mechanisch geschwächten Gebirgsverband hinweisen. Die ausserordentlich geringe Konvergenz beim Messpunkt km 19,760 kann darauf zurückgeführt werden, dass in diesem Bereich eine an der Deckengrenze eingeschuppte Kieselkalklinse angefahren wurde und die Paramente somit in festem Kieselkalk liegen.

In der Kalkstrecke der Doldenhorn-Decke (Öhrli-Kalk und Quinten-Kalk) wurden im Tunnel Ost Konvergenzen von 10 mm nicht überschritten. Im Tunnel West wurden vereinzelt Werte bis 30 mm nach 30 Tagen festgestellt (km 27,650 und km 27,690, wo ein nahezu tunnelparallel

verlaufender Bruch mit Karsterscheinungen durchfahren wurde).

Die grössten Konvergenzen wurden in den Schiefen des Autochthon Nords und im Karbon festgestellt. Im Bereich Autochthon Nord wurden Extremwerte von 447 mm (ES km 28,925 nach 125 Tagen) bzw. 692 mm (WS km 28,640 nach 701 Tagen) erreicht. Im Bereich der Karbonmulde (Fig. 5-3) lagen die Extremwerte sogar noch höher, nämlich bei 808 mm (ES km 30,390 nach 309 Tagen) bzw. 934 mm (WS km 30,475 nach 90 Tagen). Generell sind die Konvergenzen innerhalb des lithologisch von Sandstein zu Anthrazit reichenden Karbons äusserst unterschiedlich und stark anisotrop. Es zeigte sich klar, dass ein erhöhter Anthrazitanteil in den Schiefen zu höheren Konvergenzen führt. Im Bereich von tektonischen Störungen ist dies besonders ausgeprägt. Solche Störungen treten insbesondere an mechanisch bedeutenden Übergängen von hartem zu weichem Gebirge auf. Die grossen Konvergenzen in der Karbonstrecke erforderten umfangreiche Sicherungsmassnahmen (einschiebbare Stahlbögen, Konvergenzschlitze mit Dämpfungselementen in der Spritzbetonschale, lange Selbstbohranker). Dennoch wurde die Ausbruchsicherung an mehreren Stellen durch den anhaltenden Gebirgsdruck vollständig zerstört und musste komplett ersetzt werden (Fig. 5-4, Fig. 9-1).

In den kristallinen Gesteinen wurden nur im Bereich der Nothaltestelle Ferden in den hier parallel zum Streichen der beiden Schieferzonen angeordneten Baulogistikkavernen, Fussgängerquerschlägen und Abluftstollen relativ bedeutende Bewegungen gemessen. Die grössten Konvergenzen wurden dabei für die Zeitspanne vom Februar 2001 bis Oktober 2001 in der nördlicheren Logistikkaverne mit total 45 cm beobachtet. Dagegen konnten weder in den senkrecht zum Streichen gequerten Phyllitonen Faldumbach und Dornbach noch im Karbon von Ferden grössere Konvergenzen beobachtet werden. Dank den sehr kleinen Konvergenzen war es sogar möglich, die Phyllitzone Faldumbach in der Weströhre von Süden her mit der TBM zu durchfahren.

Weiter südlich traten einzig im Bereich der Lias-Kalke der Ostachse (TBM-Vortrieb) grössere Konvergenzen auf. Sie fanden diagonal zur Achse statt und waren auf Entlastungsbrüche, welche durch das Aufblättern von Schichtplatten entstanden, zurückzuführen. Solche Entlastungsbrüche konnten bis in eine Tiefe von ca. 3,5 m mit Bohrlochscanneraufnahmen nachgewiesen werden. Nach der Sanierung dieser Strecke wurden zur Kontrolle erneut Konvergenzmessungen durchgeführt, welche zwischen November 2004 und Januar 2005 rasch abklingende Konvergenzen von immer noch bis zu 3 cm ergaben. In der daneben liegenden Weströhre, die im Sprengvortrieb ausgebrochen wurde, konnten in diesem Abschnitt keine Konvergenzen festgestellt werden. Dies zeigt einmal mehr die Abhängigkeit des Gebirgsverhaltens von der Vortriebsmethode.

Zur Ergänzung der Konvergenzmessungen wurden an einigen Stellen **Extensometer** versetzt. Dabei wurde versucht, diese jeweils möglichst nahe der Ortsbrust zu installieren. Auf der Nordseite erfolgte dies vor allem in Bohrungen, die in der Sohlenmitte vertikal nach unten erstellt wurden. Dagegen wurden auf der Südseite an ausgewählten Stellen (Anhydritmarmor der südlichen Sedimenteinschup-

E 01  
 Spurwechsel Südwest km 22,615  
 Sohle

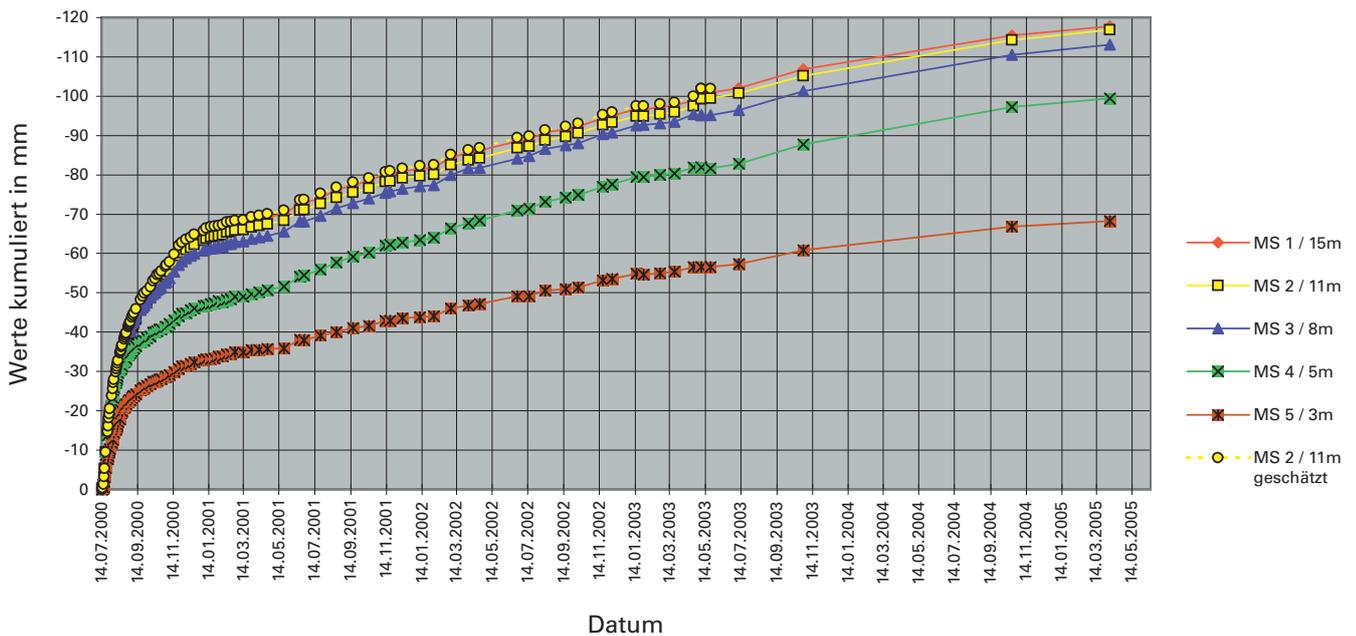


Fig. 5-5: Extensometermessungen in den Palfris-Schiefern in der Sohle des Spurwechsels Südwest (km 22,615).

Logistikkavernen, Lias-Kalk) mehr oder weniger komplette Extensometerquerschnitte eingebaut. Generell zeigen diese Messungen ein ähnliches Bild wie die oben beschriebenen Konvergenzmessungen.

Auffallend sind jedoch die lang anhaltenden Sohlhebungen in den schiefrigen Lithologien auf der Nordseite (Flyschschiefer, Palfris-Schiefer). So wurden an einigen Stellen in diesen Gesteinen auch noch nach zwei Jahren relativ kontinuierliche Sohlhebungen von etwa 10 mm/Jahr beobachtet (Fig. 5-5). Diese Bewegungen erfolgten vor allem auf den ersten 5 m direkt unter der Sohle und dürften nicht auf ein Quellen der Palfris-Schiefer (s. Kap. 5.3), sondern auf die Auswirkungen des Auflockerungsdruckes zurückzuführen sein.

Die südliche Logistikkaverne beim Fusspunkt Ferden liegt vollständig in massigen Gneisen, während im Nordteil der nördlichen Logistikkaverne schiefrige Gneise und Schiefer aufgeschlossen sind. Entsprechend traten auch die Deformationen vorwiegend im Bereich des Nordparaments der nördlichen Kaverne auf. Nach einer mittleren Verformungsrate von ca. 0,15 mm/Tag zu Beginn war nach dem Abbau der Strosse in dieser Kaverne (Februar 2001) eine markante Zunahme der Deformationsgeschwindigkeit auf bis zu 1,5 mm/Tag feststellbar. Es zeigte sich, dass die grössten Bewegungen in den ersten 4–5 m ab Parament stattfanden. Die Felsbewegungen klangen im westlichen Teil dieser Kaverne nach rund einem Jahr ab (ca. ab Februar 2002). Dagegen waren im östlichen Teil wegen des direkt daneben verlaufenden Vortriebs der Weströhre des Basistunnels und der näheren Lage der Schieferzone zur Kaverne noch ein Jahr später Deformationen von knapp 1 mm/Monat zu beobachten. Die Gesamtbewegungen seit Versetzung dieser Extensometer im östlichen Teil der Kaverne im Juni 2001

betragen bis zum Januar 2003 rund 7 cm.

Zur Kontrolle der Gesteinsverformung (Kriechen) wurden in den Anhydritmarmoren der Sedimenteinschuppung 1 (im BWN bei km 37,269) insgesamt vier Extensometer versetzt. Es zeigte sich, dass die Paramente stabil blieben (Messungen im Fehlerbereich:  $\pm 0,25$  mm). Der Extensometer im First zeigt eine geringfügige Senkung an (ca. 0,4 mm in vier Jahren), währenddem sich die Sohle um rund 0,6 mm in vier Jahren absenkte. Wie weit diese Bewegungen auf Kriecherscheinungen des Anhydritmarmors zurückzuführen sind, ist zurzeit noch unklar.

Zur Überwachung der Sohlhebungen in den «Aalénien-Schiefern» des Autochthons Gampel-Baltschieder auf der Südseite wurde sowohl in der Oströhre (km 47,093) als auch in der Weströhre (km 47,510) je ein Extensometer versetzt. In der Oströhre (Kreisprofil) waren die Bewegungen während mehr als einem Jahr alle kleiner als 1 mm, wohingegen in der Weströhre (Hufeisenprofil) die Bewegungen zwischen 0 und 3 m ab Tunnelsohle in den ersten 14 Tagen knapp 3 mm und zwischen 3 und 6 m noch ca. 1,5 mm betragen. Darunter, d.h. in den tieferen Felsbereichen, sowie nach den ersten 14 Tagen waren die Bewegungen während der Beobachtungszeit von rund einem halben Jahr alle kleiner als 1 mm. Dieses unterschiedliche Verhalten im gleichen Gestein dürfte auf die unterschiedlichen Ausbruchquerschnitte zurückzuführen sein.

In Ergänzung und zur Überprüfung der Extensometer wurde in der ganzen «Aalénien»-Strecke des Autochthons Gampel-Baltschieder ein **Präzisionsnivellement** durchgeführt. Die Messungen erfolgten dabei in der Oströhre auf den Schienenbefestigungen der Tunnelbahn und in der Weströhre mit Messpunkten auf dem Sohlenbeton. Die Resultate in der Oströhre zeigten sowohl Hebungen (max.

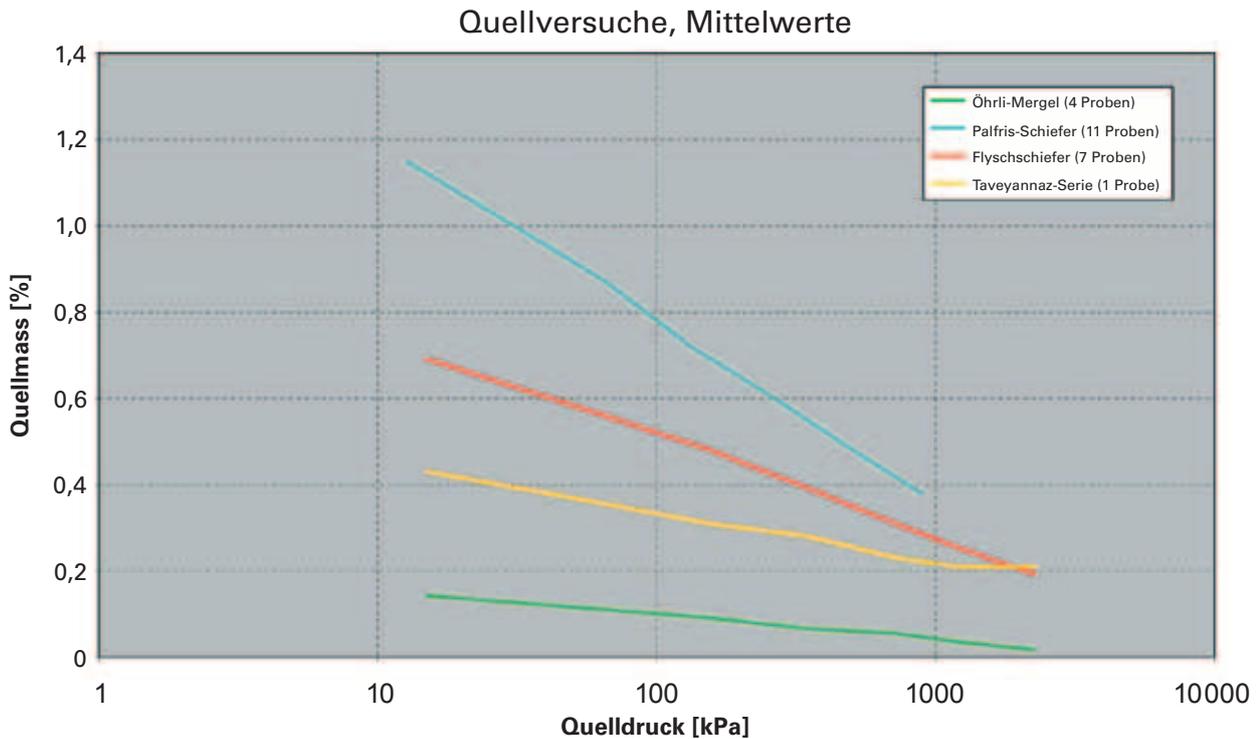


Fig. 5-6: «Quellkurven» verschiedener Gesteine.

15,6 mm) wie auch Senkungen (max. 7,7 mm). Die Hebungen waren im Bereich des Querschlags 98 lokalisiert, wo vermutlich bei Sprengarbeiten die Schienen beschädigt und neu justiert wurden. Auch in der Weströhre waren keine Tendenzen festzustellen. Die meisten Messungen zeigen eine Senkung (bis 3,6 mm) und nur 4 Punkte eine unbedeutende Hebung. Diese kleinen unregelmässigen Bewegungen sind auf das Befahren der provisorischen Betonsohle mit schweren Baumaschinen zurückzuführen.

### 5.3 Quellen/Schwellen, Sohlgewölbe

An Kernstücken aus Extensometerbohrungen wurden an der EPF Lausanne Quellversuche durchgeführt (ungehindertes Quellen, vollständig verhindertes Quellen zur Quelldruckbestimmung und Quellversuche mittels Oedometer nach Huder-Amberg). Die Resultate dieser Versuche sind in Figur 5-6 dargestellt.

Aufgrund der festgestellten geringen Quellhebung und dem Metamorphosegrad der vorliegenden Gesteine (mindestens Anchizone) kann das Vorhandensein stark quellfähiger Tonminerale (Smektit) praktisch ausgeschlossen werden. Deshalb wurde bei allen Proben auf eine röntgenographische Untersuchung der Tonmineralogie verzichtet. Die Resultate der während des Vortriebs durchgeführten Versuche stimmen mit jenen aus den Voruntersuchungen gut überein (KELLERHALS & ISLER 1998). Es stellt sich aber die Frage, was eigentlich gemessen wurde, wenn praktisch keine quellbaren Tonminerale vorhanden sind. Am ehesten dürfte wohl eine Volumenzunahme als Folge der Auf-

lockerung in Frage kommen, da sämtliche Proben aus Bereichen mit grosser Überlagerung (> 500 m) stammen.

### 5.4 Bergschlag, Spannungsverhältnisse

Beim Bergschlag handelt es sich um eine schlagartige Gebirgsbewegung als Folge sehr hoher Gebirgsspannungen, die sich in heftiger Erschütterung, knallartigen Geräuschen, Abplatzungen/Zerbrechen bis hin zum eigentlichen Bergschlag mit der Absprengung von Felsplatten manifestiert (Tab. 5-5). Typisch ist eine schlagartige Freisetzung von sehr hohen Energien. Je nach Lage der Vortriebsrichtung zu den Hauptspannungen des unverritzten Gebirges kann Bergschlag an der Tunnelwandung oder an der Tunnelbrust auftreten. In Tunnellängsrichtung kann er sich direkt im Brustbereich bis zu einer Entfernung des etwa 0,5- bis 3-fachen des Tunnelradius auswirken.

Für die Beschreibung der Entlastungs- und Bergschlagphänomene wurde folgende Nomenklatur angewendet:

Im Lauterbrunnen-Kristallin und im Gastern-Granit des Abschnittes Mitholz traten kaum Bergschlagphänomene auf. Häufig konnten einzig Zwiebschalenbildungen im Bereich der Paramentfüsse beobachtet werden. Ob dieses bemerkenswert geringe Auftreten von Bergschlagphänomenen auf die relativ grosszügige Handhabung der Lademengen für die einzelnen Abschlüsse (die zum Ziel hatten, die Schutterung zu optimieren, was auch gelang) zurückzuführen ist, bleibe dahingestellt.

Im Abschnitt Ferden wurden am weitaus häufigsten E-1- und BS-1-Phänomene beobachtet. BS-2-Phänomene

Tab. 5-5: Klassierung der beobachteten Bergschlagphänomene.

| Umschreibung                | Beobachtete Phänomene   |
|-----------------------------|---|
| E 1<br>Entlastung           | Knack- und Knistergeräusche   |
| BS 1<br>leichter Bergschlag | Knallgeräusche, Staubwölkchen, Abzwicken kleiner Gesteinsplättchen, Ausbildung von kleinen Platten im Bereich L1 und L2                         |
| BS 2<br>Bergschlag          | Starke Knallgeräusche, Absprengung von Gesteinsstücken, zwiebelschalenförmige Abplatzungen im Bereich L1 und L2                                 |
| BS 3<br>starker Bergschlag  | Sehr starke Knallgeräusche, Absprengung von grossen Gesteinsplatten, zwiebelschalenförmige Abplatzungen in der Brust sowie im Bereich L1 und L2 |

traten nur relativ selten und BS-3-Phänomene gar nicht auf. Die Entlastungs- und Bergschlagphänomene waren somit eher geringer als erwartet. Auffallend ist, dass in beiden Basistunnelröhren in diesem Abschnitt die stärksten Bergschlagphänomene in Bereichen beobachtet worden sind, wo grobkörnige Biotit-Granite anstehen. Die in der Oströhre zwischen km 35,553 und 35,513 sowie in der Weströhre bei km 36,321 beobachteten Bergschlagphänomene ereigneten sich im mittelkörnigen Granit, hier jedoch im Aufweitungsbereich für den Spurwechsel. Speziell darauf hinzuweisen ist, dass im Abschnitt Ferden die beobachteten Bergschlagphänomene zudem in der mit einer Zeitverzögerung von mehreren Monaten nachziehenden Oströhre generell eher heftiger waren als in der vorausgehenden Weströhre.

Zwischen Raron und Ferden traten im Bereich des Zentralen Aare-Granits und der granitischen Schollengneise, d.h. im Bereich der grössten Überlagerungen, zum Teil starke Bergschläge in der Brust auf (BS 3). Diese machten sich mit einem gewaltigen Knall und der anschliessenden Erschütterung der ganzen TBM, wenn der Gesteinsbrocken auf den Bohrkopf prallte, bemerkbar. Am Profilumfang waren in solchen Fällen aber meist überhaupt keine Aufblätterungen bzw. Abschaltungen zu beobachten. Normalerweise beschränkten sich die Bergschlagphänomene auch in diesem Abschnitt auf plattige Ablösungen. Interessanterweise waren hier aber die Bergschlagphänomene in der vorausgehenden Weströhre eher heftiger als in der nachziehenden Oströhre. Dies weist darauf hin, dass der zeitliche Abstand zwischen dem Ausbruch der beiden Röhren von mehr als einem Jahr ausreichte, um die negativen Auswirkungen der Spannungsumlagerung auf die zweite Röhre zu vermeiden.

In Ergänzung zur Untersuchung der Gebirgsspannungsverhältnisse für die Prognose (s. KELLERHALS & ISLER 1998) wurden im Hinblick auf die Erstellung und die optimale Orientierung der Betriebskavernen beim Fusspunkt Ferden sowie jenen bei der Verzweigung Löttschen während der Ausbrucharbeiten erneut Spannungsmessungen ausgeführt. Dabei wurden in einer im ZLS bei Sm 1097 erstellten Horizontalbohrung Gebirgsspannungsmessungen mit Hilfe einer Messzelle vom Typ CISRO nach der Überbohrmethode vorgenommen. Untersucht wurde ein massiger, grobkörniger Gastern-Granit mit porphyrischer Struktur (Feldspatporphyroblasten). Die Klüftung war in diesem Gestein nur schwach ausgeprägt.

Aufgrund der an den Dehnungsmessstreifen festgestellten Entspannungsveränderungen am überbohrten Gesteinskörper ergaben sich folgende Haupt-Normalspannungen (Tab. 5-6; Überlagerung bei der Messstelle rund 1350 m):

Tab. 5-6: Haupt-Normalspannungen im Bereich des Fusspunkts Ferden (mit E-Modul = 38,9 GPa berechnet).

|                                | Grösse (MPa) | Richtung (Azimut/Einfallen) |
|--------------------------------|--------------|-----------------------------|
| $\sigma_1$ ( $\sim \sigma_v$ ) | 28,4         | 245°/80°                    |
| $\sigma_2$ ( $\sim \sigma_H$ ) | 11,4         | 356°/04°                    |
| $\sigma_3$ ( $\sim \sigma_h$ ) | 7,1          | 087°/09°                    |

Für die im Bereich der Verzweigung Löttschen geplanten Betriebskavernen wurden Spannungsmessungen mit der Bohrlochschlitzsonde (borehole slotter) in drei mehr oder weniger senkrecht zueinander stehenden Bohrungen gemacht. Die Messungen erfolgten im Zentralen Aare-Granit, wenig südlich der Grenze zu den granitischen Schollengneisen, bei einer Überlagerung von rund 1700 m. Sie ergaben in einer Bohrlochtiefe von gut 14 m (= knapp 2 x Ausbruchdurchmesser), wo vermutlich ein noch nicht durch den Vortrieb beeinflusster Spannungszustand vorhanden war, die in Tabelle 5-7 dargestellten Resultate:

Tab. 5-7: Haupt-Normalspannungen im Bereich der Verzweigung Löttschen (mit E-Modul = 45,0 GPa berechnet).

|                                | Grösse (MPa) | Richtung (Azimut/Einfallen) |
|--------------------------------|--------------|-----------------------------|
| $\sigma_1$ ( $\sim \sigma_v$ ) | 33,9         | 226°/85°                    |
| $\sigma_2$ ( $\sim \sigma_H$ ) | 23,5         | 003°/03°                    |
| $\sigma_3$ ( $\sim \sigma_h$ ) | 18,7         | 093°/03°                    |

In beiden Fällen ergaben sich vertikale Hauptspannungen ( $\sigma_1$  bzw.  $\sigma_v$ ), die kleiner sind als die Spannung aus der Überlagerung. Das dürfte vermutlich auf topographische Effekte zurückzuführen sein (beide Messstellen befinden sich unter ausgeprägten Hanglagen von relativ schmalen Tälern und wenig unterhalb der höchsten Erhebung). Denkbar sind aber auch messmethodenbedingte Ungenauig-

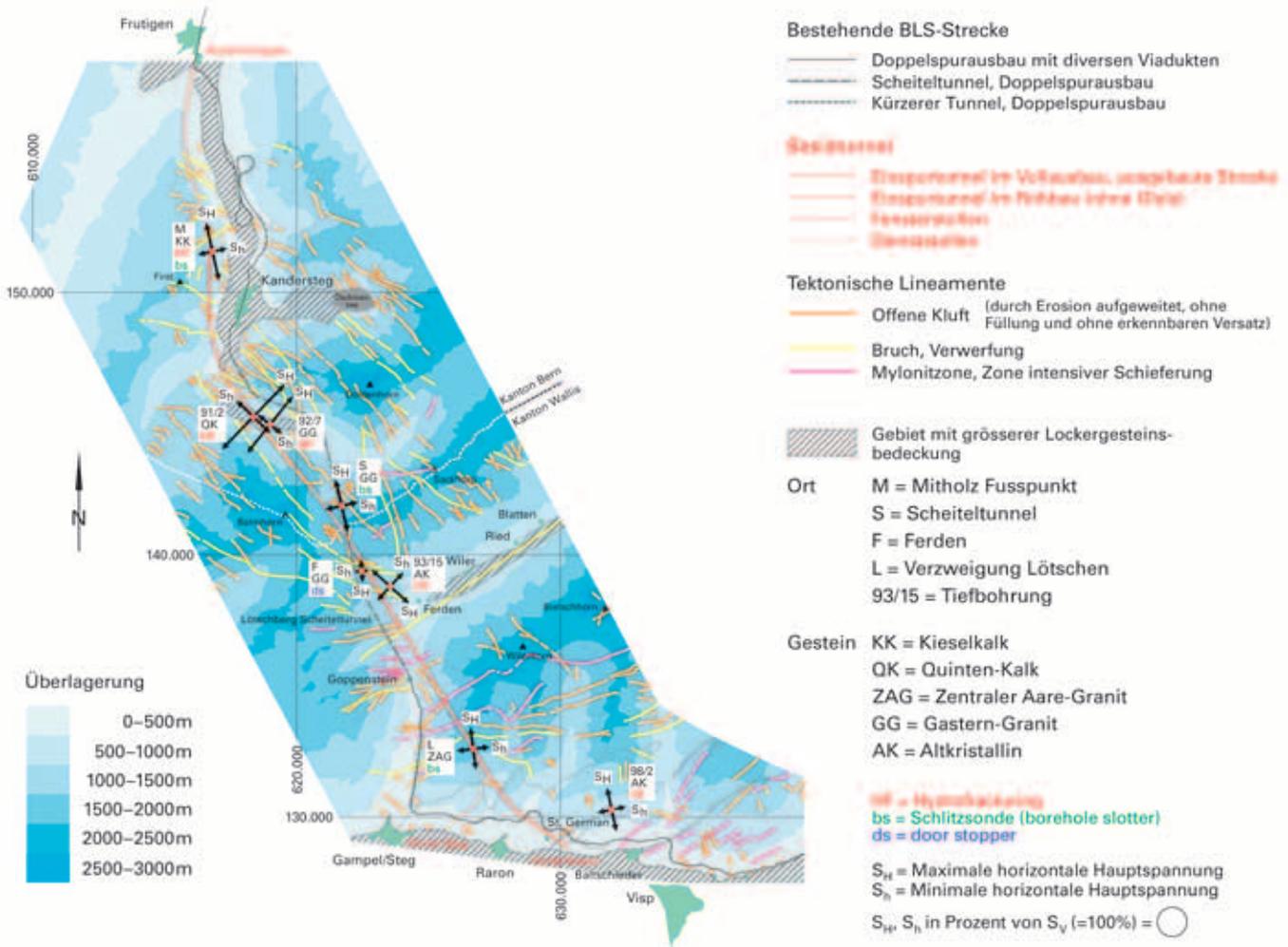


Fig. 5-7 : Zusammenstellung der im Bereich des Lötschberg-Basistunnels durchgeführten Spannungsmessungen (mit Darstellung der Überlagerung und der tektonischen Lineamente) (aus ZIEGLER & HUFSCHMIED 2004).

keiten, wie zum Beispiel die Grösse der für die Spannungsberechnung verwendeten E-Moduli.

Auffallend ist zudem bei beiden Messstellen die ausgeprägte Nord-Süd-Orientierung der grössten horizontalen Hauptspannung ( $\sigma_H$ ). Sie weicht damit deutlich vom regionalen Trend mit seiner normalerweise mehr oder weniger NW-SE-Richtung ab. Wegen der relativ parallelen Richtung der horizontalen Hauptspannung zur Vortriebsrichtung kann aber auch vermutet werden, dass es trotz der relativ grossen Distanz zum Ausbruchrand mit diesen Messungen nicht gelungen ist, einen primären Spannungszustand zu ermitteln.

In der Figur 5-7 sind sämtliche horizontalen Hauptspannungsmessungen, die im Bereich des Lötschberg-Basistunnels ausgeführt wurden, zusammen mit der Überlagerung und den tektonischen Lineamenten dargestellt. Auch unter der Annahme, dass ausser in den Tiefbohrungen mehr oder weniger durch den Tunnel beeinflusste Spannungszustände ermittelt wurden, zeigen die Spannungsmessungen nicht die ausgeprägte Änderung, wie sie aufgrund der Richtungsänderung der tektonischen Lineamente, die von Süden bis in den Bereich des Lötschentals vorwiegend NE-SW und anschliessend NW-SE streichen, hätte vermutet werden können.

## 5.5 Wiederverwendbarkeit

Für die Beurteilung des Ausbruchmaterials bezüglich seiner Wiederverwendbarkeit wurde die in der Prognose gemachte Einteilung verwendet. Die Klasse K1 umfasste dabei wenig geaderte Kalke, Sandsteine, Granite und massige Gneise mit einem Schieferanteil  $< 10\%$ . Die Klasse K2 enthält dieselben Gesteine mit  $10-90\%$  Schieferanteil und die Klasse K3 weist einen Schieferanteil  $< 90\%$  auf. In den Sedimenten auf der Nordseite erstreckte sich wegen der teilweise flachen Schichtlagerung die «Mischklasse» K2 nicht selten über mehrere Abschlüsse hinweg. In Tabelle 5-8 ist die Verteilung der Wiederverwendbarkeitsklassen bezogen auf die jeweilige Streckenlänge für die einzelnen Vortriebe zusammengestellt.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass knapp zwei Drittel des Ausbruchmaterials des Lötschberg-Basistunnels der Wiederverwendbarkeitsklasse K1, aus der unter anderem Betonzuschlagstoffe aufbereitet werden konnten, zugeteilt wurde. Die periodisch von der Materialbewirtschaftung durchgeführten Tests (Kornverteilung, Plattigkeit, Punktlast) an K1-Material zeigten, dass die Anforderungen für Betonzuschlagstoffe in der Regel erfüllt wurden. Damit musste für die Betonherstellung höchstens aus zeitlichen

Tab. 5-8: Verteilung der Wiederverwendbarkeitsklassen bezogen auf die jeweilige Streckenlänge.

| Vortrieb                          | Streckenlänge<br>km | Wiederverwendbarkeitsklassen |    |    |
|-----------------------------------|---------------------|------------------------------|----|----|
|                                   |                     | K1                           | K2 | K3 |
|                                   |                     | %                            | %  | %  |
| Mitholz Richtung Norden (1 Röhre) | 8,438               | 25                           | 32 | 43 |
| Mitholz Richtung Süden            | 19,389              | 36                           | 31 | 33 |
| Ferden Richtung Norden            | 11,277              | 96                           | 2  | 2  |
| Ferden Nothaltestelle             | 1,058               | 48                           | 23 | 29 |
| Ferden Richtung Süden             | 2,097               | 73                           | 12 | 15 |
| Raron/Steg (vorwiegend TBM)       | 20,450              | 89                           | –  | 11 |

Gründen, d.h. wenn gerade kein «gutes» Material ausgebrochen wurde und damit nicht vorrätig war, Fremdmaterial zugeführt werden. Die Aufbereitung von K2-Material zur Gewinnung von Betonzuschlagstoffen wurde generell als zu aufwendig erachtet und nicht durchgeführt.

Das aus dem Ausbruch stammende Material wurde in Mitholz und in Raron (inkl. dem Ausbruchmaterial von Ferden, das per Zug nach Raron und zum Teil nach Mitholz transportiert wurde) soweit wie möglich aufbereitet und zwischengelagert bzw. deponiert. In Mitholz, wo wegen der relativ vielen schiefrigen Sedimentgesteine ungünstigere Verhältnisse vorlagen als in Raron, wurde das K2-Ausbruchmaterial jedoch von der Klasse K3 gesondert deponiert, um eine allfällige spätere Wiederverwendung zu ermöglichen.

Auf folgende Punkte ist speziell hinzuweisen:

- Beim Öhrli-Kalk (DD) wurde die Qualität für Betonzuschlag nicht immer erreicht (zu hoher Feinanteil, Punktlastfestigkeit zu gering), ebenso beim Quinten-Kalk (DD), der jeweils bei der Punktlastprüfung zu geringe Festigkeiten aufwies. In beiden Fällen ist das Gestein durch eine undeutlich ausgebildete, penetrative Schieferung geschwächt.
- Eine spezielle Situation trat im Lauterbrunnen-Kristallin vor dem Antreffen der Karbonzone auf, da dort besonders auf Kluftflächen Pyrit vorhanden war. Weil das daraus entstehende Sulfat im Beton grundsätzlich nicht

erwünscht ist, wurde ein quantitatives Klassierungssystem angewendet. Die tägliche Bestimmung des Pyritgehaltes erfolgte visuell an mindestens 30 faustgrossen Steinen, die in «kein» (von blossem Auge kein Pyrit erkennbar), «wenig» (Pyrit erkennbar) und «viel» (mindestens eine Handstückfläche mit deutlichem Pyritbelag) unterteilt wurden. Je nach Ergebnis wurde das anfallende Material für die Betonzuschlagstoffherstellung mit pyritfreien Sedimentgesteinen gemischt.

- Entgegen der Planung konnte nach ersten, positiv verlaufenden Versuchen auch Ausbruchmaterial aus den TBM-Vortrieben für die Wiederverwendung als Betonzuschlagstoff gebraucht werden. Der Grund lag darin, dass dieses Material grobkörniger anfiel als erwartet und so auch nach dem Brechen noch ausreichend Grobkorn vorhanden war.
- Die Gesteine aus dem Bereich der Asbestgefahrenstufe 3 (s. Kap. 6.4) wurden ungebrochen auf den Deponien Bubikopf bzw. Riedertal abgelagert und sofort überdeckt.

Da die meisten Schichtgrenzen nicht vertikal verlaufen, sondern schief einfallen, sind die Grenzen zwischen den Materialklassen meist nicht identisch mit den Schichtgrenzen. Die lithologische Prognose bezog sich zudem auf die Tunnelachse bzw. Sohlenmitte, während bei der Klassierung des Ausbruchmaterials jeweils das gesamte Ausbruchvolumen beurteilt wurde.

## 6. Übrige Parameter

### 6.1 Gebirgstemperatur

Für die Messung der Fels- bzw. Gebirgstemperaturen wurden am linken Parament der einen Tunnelröhre 5–8 m lange, idealerweise mit 45–70° einfallende Bohrlöcher erstellt und mit Wasser gefüllt. Die Messung erfolgte wenige Tage später mittels einer Kabel-Temperaturmesssonde. Generell wurde alle 200–300 m ein Temperaturmessloch erstellt. Da die Temperaturmessungen auch als Vorauserkundung dienten, wurden sie in kritischen Bereichen wesentlich häufiger angeordnet, so z.B. in der karstgefährdeten Strecke in der Doldenhorn-Decke alle 50 m. In den Temperaturmesslöchern wurden jeweils die Temperaturen alle Meter gemessen. So konnte einerseits die Beeinflussung der Gebirgstemperatur durch den Vortrieb und andererseits die Erwärmung des in die Bohrlöcher gefüllten kalten Wassers auf die Gebirgstemperatur gemessen werden. In jenen Bereichen, in denen die Gebirgstemperatur über 30°C betrug, sank sie jeweils innerhalb einiger Tage bis Wochen deutlich ab, so dass nur der Anfangswert als Mass für die Felstemperatur verwendet werden konnte.

Temperaturbestimmungen des Gebirges wurden im Vortrieb von Mitholz in Richtung Norden wegen der guten Kenntnisse aus dem Sondierstollen beim Bau des Basistunnels nicht mehr gemacht. Vom Fusspunkt Mitholz bis ca. km 26 lagen die gemessenen Felstemperaturen mit 20–22°C im prognostizierten Bereich (Fig. 6-1). Im vorderen Stirnbereich der Kalke der Doldenhorn-Decke (ca. km 26) lag die Felstemperatur bis zu 4°C über der Prognose von 20°C. Im gleichen Bereich waren zahlreiche Wasserzutritte mit Temperaturen bis zu 27°C vorhanden. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Fliesswege des Wassers tendenziell nach oben gerichtet sind und dass bei Kandersteg warme Wässer in den Taltrog exfiltrieren, wodurch das Gebirge lokal erwärmt wird.

Die zunehmende Überlagerung zwischen km 26 und 28 (Jegertosse) blieb für das Temperaturprofil ohne Einfluss. In diesem Abschnitt dürfte ein Gleichgewicht zwischen Wasser- und Felstemperatur geherrscht haben, das erst mit dem Entleeren der Klüfte beim Vortrieb gestört wurde (Wasserzutritt 13,2°C bei einer Felstemperatur von 21,5°C). Dass die Felstemperatur in diesem Bereich trotz zunehmender Überlagerung nicht ansteigt, ist möglicherweise auf den konvektiven Einfluss eines Grundwasserstroms zwischen dem Gasteretal- und dem Kandertaltrog zurückzuführen.

Ganz ähnlich könnte der rasche Anstieg der Felstemperatur nach der Unterquerung des tiefsten Punktes des Gasteretaltröges (ca. km 28,500) erklärt werden, indem angenommen wird, dass die Abkühlung des Gebirges durch

strömendes Grundwasser mit zunehmender Entfernung zum Gasteretal rasch abnimmt. Zwischen km 29,5 und 32,5 liegen die Felstemperaturen generell bis 3°C über der Prognose, jedoch noch innerhalb der Prognosegenauigkeit. Die Temperaturmesswerte der in den Tunnel eintretenden Wässer liegen meist wenige Grad unter der Felstemperatur, was auf ein Nachfliessen von oben schliessen lässt. Eine Ausnahme stellt der mit 47°C warme Wasserzutritt aus der Sohle bei km 30,430 dar, wo das Wasser rund 10°C wärmer als die Felstemperatur ist und daher aus der Tiefe stammen muss.

Zwischen Mitholz und Ferden wurden entsprechend der Überlagerung die höchsten Felstemperaturen gemessen. Die Maximaltemperatur von 45,2°C bei km 34,532 entsprach ausgezeichnet der Prognose von 45°C. Der geothermische Gradient beträgt 2,8°C pro 100 m bezüglich des kürzesten Abstandes zur Terrainoberfläche und 2,3°C pro 100 m bezüglich der vertikalen Überdeckung. In diesem Abschnitt waren die Wassertemperaturen zudem mehr oder weniger gleich hoch wie die Felstemperaturen. Die beiden «Ausreisser» zwischen km 33,280 und 34,920 sind auf die Probennahme (Abkühlung schon im Bohrloch) oder auf eine beschränkte Vermischung des Bergwassers mit Bohrwasser zurückzuführen.

Auch im Bereich der Querung des Lötschentals entsprachen die Gebirgstemperaturen der Prognose. So wurde bei km 37,439 eine Felstemperatur von 36,7°C (Prognose: 35–36°C) und bei km 38,179 eine solche von 32,6°C (Prognose: 31,3°C) bestimmt. Die tiefste Temperatur in diesem Abschnitt wurde bei km 38,319 mit 31,9°C (Prognose: 31,6°C) ermittelt.

Zwischen Ferden und Raron erreichte die Felstemperatur im Tunnel Ost ein Maximum von 39,1°C bei km 43,722, bei einer Überlagerung von 1840 m und einem kürzesten Abstand zur Oberfläche von 1480 m; sie liegt damit rund 4°C höher als prognostiziert. Im Tunnel West wurde bei grösserer Überlagerung (1940 m) und einer vergleichbaren kürzesten Distanz zur Oberfläche eine etwas geringere Temperatur von 37,5°C (km 43,426) gemessen. Der Temperaturanstieg von den Südportalen bis zur höchsten Überdeckung beträgt etwa 2,5°C pro 100 m vertikale Überdeckung und ist deutlich höher als der Temperaturabfall von der höchsten Überdeckung bis in den Einschnitt des Lötschentals. Der Verlauf ist sehr regelmässig, kleinere topographische Unregelmässigkeiten, wie die Einschnitte des Bietschals, zeichnen sich nicht ab. Dies dürfte einer der Gründe sein, warum in diesem Abschnitt die grössten Unterschiede zur Prognose auftraten. Ein anderer könnte darin liegen, dass am nach Süden ausgerichteten Talhang des Rhonetals höhere Bodentemperaturen, die ja die Basis für die Gebirgstemperaturprognose bilden, vorliegen als erwartet.

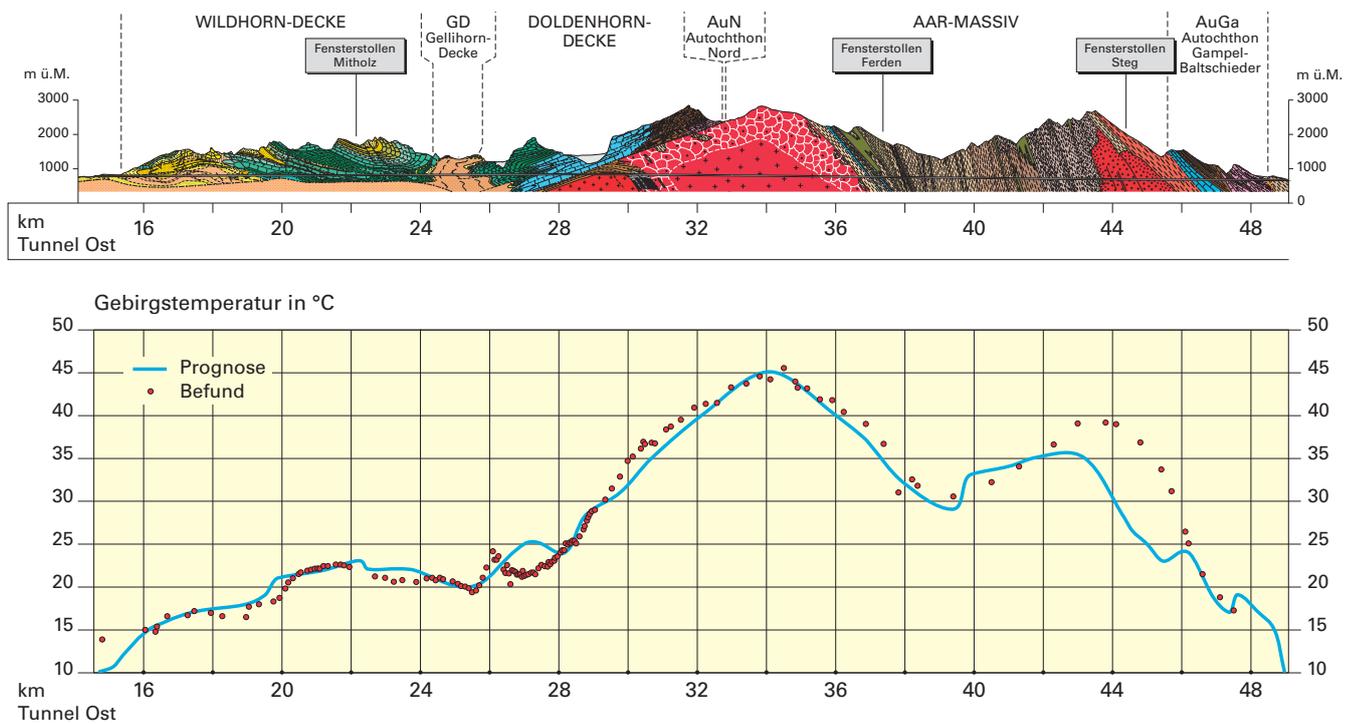


Fig. 6-1: Vergleich der gemessenen mit den prognostizierten Gebirgstemperaturen.

Die langfristige Entwicklung der in den Messlöchern überwachten Gebirgstemperaturen zeigt, dass diese rasch auf die Abkühlung durch die Baulüftung reagierten. Insbesondere bei hohen Ursprungstemperaturen ( $>ca. 35^{\circ}C$ ) konnten zum Teil Abkühlungen von bis gegen  $10^{\circ}C$  innerhalb eines Jahres beobachtet werden. Zudem konnten gemessene Temperaturschwankungen auf veränderte lüftungstechnische Bedingungen zurückgeführt werden, oder sie wurden durch die erhöhte Abwärme bei den Betonarbeiten beeinflusst.

## 6.2 Gasführung

Je nach Gasgefahrenstufe wurde die Überwachung der Tunnelluft im Vortrieb mittels stationärer oder mobiler Gasmessgeräte durchgeführt. In erwarteten oder nachgewiesenermassen Gas führenden Bereichen wurden ab Ortsbrust zusätzlich überlappende Vorbohrungen ausgeführt. Diese hatten zum Ziel, vorhandene Gasvorkommen anzubohren und kontrolliert ausblasen zu lassen. Trotz zum Teil kräftiger Gaszutritte konnten bereits hinter dem Bohrjumbo kaum je bedenkliche Methangaskonzentrationen festgestellt werden.

Die getroffenen Sicherheitsvorkehrungen (Gasvorbohrungen, Überwachung der Gaskonzentration in der Tunnelluft, ausreichende Bewetterung und Erhöhung der Ventilationsleistung bei erhöhter Gaskonzentration, Alarmdispositiv) haben sich in der Praxis bewährt. Die Resultate der Gasüberwachung sind in Figur 6-2 zusammen mit den für den Betrieb des Tunnels festgelegten Gaszonen dargestellt.

Zwischen Frutigen und Mitholz waren die grössten Methangaszutritte erwartungsgemäss in den Palfris-Schiefern (Mélange) zu verzeichnen. In der Schuppe 1 der Wildhorn-

Decke, in der Taveyannaz-Serie und im Flysch FU wurden nur vereinzelt Gaszutritte festgestellt. Innerhalb der einzelnen tektonischen Einheiten sind die festgestellten Gasvorkommen äusserst ungleichmässig verteilt. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, waren die ausströmenden Gas mengen gering. Gaszutritte waren in den Schiefergesteinen häufiger als in den Kalken und Sandsteinen. Bei den angetroffenen Gasvorkommen handelte es sich um einzelne relativ kleine, gefangene Vorkommen in einem bereits teilweise entgastem Gebirge. Daneben war insbesondere in den Palfris-Schiefern bei mehreren Wasserzutritten ein Schwefelwasserstoffgeruch festzustellen. Die Konzentrationen lagen aber stets unterhalb der Nachweisgrenze der Messgeräte.

Von Mitholz Richtung Süden waren die gemessenen Methangaskonzentrationen in den Palfris-Schiefern generell höher als in den Flyschschiefern. Die z.T. heftigen Gaszutritte bei den Gasvorbohrungen mit Konzentrationen bis 70 Vol-% Methan führten dank den getroffenen Massnahmen und Anordnungen zu keinen Behinderungen bzw. Unfällen. In den Palfris-Schiefern bei rund km 23,200 ereigneten sich jeweils nach einer Sprengung Methangas-Abflamungen, die darauf zurückzuführen waren, dass sich ausströmendes Methangas bei der Sprengung entzündete und während mehrerer Minuten abbrannte.

In den Kalken der Doldenhorn-Decke wurden erwartungsgemäss keine grösseren Methangaszutritte festgestellt. Die Gasüberwachung erfolgte hier mit den Karst-Vorausbohrungen (Messung durch den Bohrmeister). Anders als in diesen Kalken, die ein für Gase undichtes System bilden und deshalb als Wirtgestein ungünstig sind, wurden die Schiefer des Autochthons als potentielle Muttergesteine betrachtet, die noch kleine Gasvorkommen enthalten können. Die Gasbohrungen, die im Tunnel West nach Erreichen des Autochthons durchgeführt wurden, zeigten aber

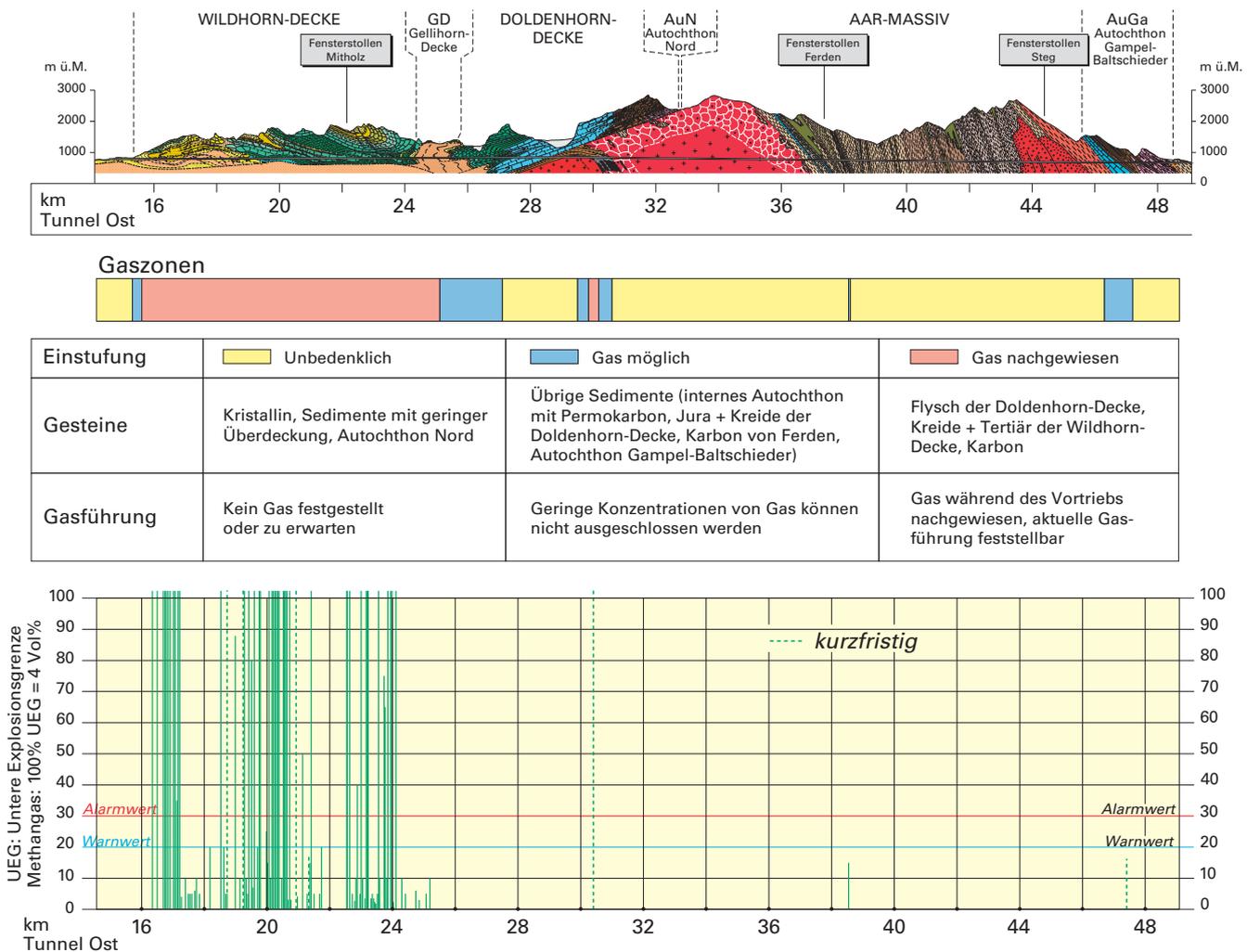


Fig. 6-2: Resultate der Gasüberwachung und die daraus abgeleiteten Gaszonen.

keinerlei Gasvorkommen. Gleiches gilt für die Bohrungen für die Gaserkundung in der Oströhre. Einzig im Karbon wurden in beiden Röhren zwischen km 30,380 und 30,400 in den Vorausbohrungen geringe Gaszutritte und einmal ein Bläser mit 60°C heissem Methan angetroffen. Dieser kam aber nach einigen Minuten zum Versiegen.

Ein Gaszutritt aus der Sohle im Bereich der Quellgruppe W4 (Tunnel West-Süd, km 27,210) war infolge Blasenbildung sehr gut sichtbar und wurde im Labor analysiert. Die Analyse ergab, dass es sich bei diesem Gas nicht um Methan, sondern vorwiegend um Stickstoff handelt mit geringen Anteilen an anderen Gasen (0,14% Methan, 0,28% Kohlendioxid, 0,80% Helium, 0,82% Argon, 1,51% Sauerstoff).

Im Gastern-Granit, im Altkristallin und im Zentralen Aare-Granit wie auch in den Sedimenten des Jungfrau-keils und der Sedimenteinschuppungen wurden keine nennenswerten Gaskonzentrationen festgestellt. Selbst im Bereich des Karbons von Ferden wurden nur geringe Gaskonzentrationen beobachtet. Die höchste Konzentration betrug 15% UEG. Schwefelwasserstoff wurde nirgends festgestellt.

In den Sedimenten des Autochthons Gampel-Baltschieder zeigte einzig eine Messung in einer systematischen Vorausbohrung (km 47,410 Oströhre) mit 16% UEG leicht

erhöhte Methangehalte an. Es bleibt aber offen, ob ein Gerätefehler vorlag oder ob es sich um eine kleine Methantase in der Liaskalk-Einfaltung in den «Aalénien-Schiefern» handelte. Im Tunnel West (SPV) wurden nach Abschluss des Rohbaus sämtliche Bergwasserschächte und Rohre in der «Aalénien»-Strecke kontrolliert: Methan und Schwefelwasserstoff waren nicht nachweisbar.

### 6.3 Radioaktivität

Im Laufe des Vortriebs wurde die Radioaktivität periodisch mit einem Dosisleistungsmessgerät (6150 AD 6) im Bereich der Ortsbrust überwacht. Es handelte sich dabei um ein Strahlungsmess- und Nachweisgerät für Photonenstrahlung (Gamma- und Röntgenstrahlung). Der Richtwert von 0,5 µS/h, wie er vom Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz für beruflich nicht strahlenexponiertes Personal (dauernd besetzter Arbeitsplatz, 40 Stunden pro Woche) festgelegt ist, wurde nur in Einzelwerten erreicht. Die mittlere Strahlenbelastung lag jedoch immer deutlich unter dem Richtwert.

In Ergänzung zu diesen für den Gesundheitsschutz durchgeführten Dosisleistungsmessungen wurden zwischen

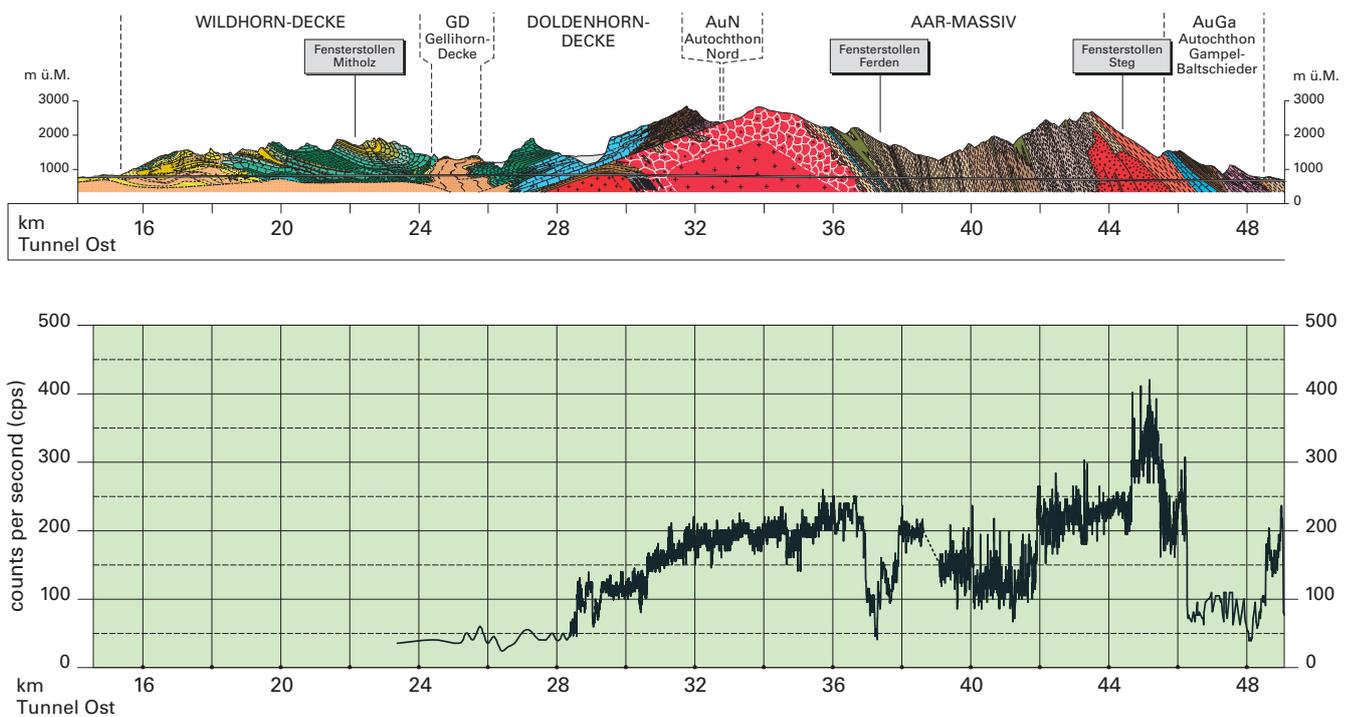


Fig. 6-3: Radioaktivitätsmessungen zwischen Mitholz und Raron.

Mitholz und Raron im Tunnel West am westlichen Parament mit einem Zählrohr alle 2 m die radioaktiven Zerfälle gemessen und so ein Radioaktivitätsprofil erstellt (s. Fig. 6-3). Verwendet wurde ein Szintillometer (S.P.P.2 NF), mit dem die  $\gamma$ -Strahlung in counts per second (cps) gemessen wird.

In den Sedimenten der helvetischen Decken sind die Werte sehr tief. Im Autochthon Nord sind sie etwa vergleichbar mit denjenigen der Karbonstrecke weiter südlich. Die Trias zwischen ca. km 28,900 und 29,100 weist in der ersten Hälfte deutlich höhere Messwerte auf als in der zweiten. Lithologisch lassen sich diese Unterschiede nicht ohne weiteres erklären, weil der gesamte Abschnitt aus einer Anhydritabfolge mit eingeschuppten Dolomitanteilen besteht. Der auffällige Wechsel fällt mit der Umstellung der Ausbruchsicherung von Stahlbögen auf eine Sicherung mit Anker und Spritzbeton zusammen. Er dürfte darauf zurückzuführen sein, dass das Uran wasserlöslich ist und sich darum immer in der Randzone eines Plutons anreichert. Ist derselbe ohne schützende Tonschicht mit Trias bedeckt, wandert das Uran noch weiter bis zur ersten abdichtenden Mergelschicht (= Dogger).

Im Lauterbrunnen-Kristallin wurden Werte mit einer vergleichsweise geringen Streuung zwischen 100 und 140 cps gemessen. Interessanterweise erfolgt der Anstieg nach der Trias nicht sprunghaft, sondern kontinuierlich über eine Strecke von 100 m. In der anschliessenden Karbonstrecke liegen die Werte im gleichen Bereich, weisen aber eine grössere Streuung auf. Südlich km 30,600 steigen die Werte sprunghaft auf durchschnittlich 160 cps, was mit der Grenze zum Gastern-Granit zusammenfällt. Anschliessend steigen die Radioaktivitätswerte bis km 32 relativ kontinuierlich auf rund 200 cps an, um dann auf weiteren gut 3 km im Gas-

tern-Granit um diesen Wert zu schwanken. Einzig zwischen km 34,600 und 34,850 wurden Werte um nur 175 cps beobachtet. Der Randbereich des Gastern-Granits weist leicht höhere Werte (190–220 cps) auf, was neben der obenstehenden Erklärung vermutlich mit dem höheren Anteil an Ganggesteinen zusammenhängt.

Auffallend ist der markante Sprung bei ca. km 36,970, d.h. am Nordrand des Jungfraukeils. Nördlich dieser Stelle weist das Altkristallin die üblichen Werte um 160–190 cps auf. Der nächste markante Sprung zeigt sich bei ca. km 37,910–38,920, d.h. am Nordrand der Dornbach-Störung. Südlich dieser Stelle zeigt das Altkristallin wieder Werte um 200 cps. Nördlich davon, bis zum Nordrand des Jungfraukeils, weisen die anstehenden Gneise, Schiefer und Phyllite jedoch markant tiefere Werte zwischen 50 und 150 cps auf, wie sie normalerweise in reinen Sedimentgesteinen gemessen werden. Es handelt sich hier um den eindeutig am stärksten tektonisch beanspruchten Abschnitt des Altkristallins.

Generell deutlich niedrigere Werte als die weiter südlich folgenden Intrusivgesteine hat auch das restliche Altkristallin zwischen Ferden und Raron. Die niedrigsten Werte im Altkristallin wurden dabei im Amphibolit gemessen. Interessanterweise hat der nördliche Bereich des Zentralen Aare-Granits deutlich niedrigere Werte als der südliche. Im nördlichen Teil sind sie etwa gleich hoch wie jene in den nördlich anschliessenden granitischen Schollengneisen und wie jene im Baltschieder-Granodiorit. Aplite, welche eine erhöhte Radioaktivität besitzen, können von den übrigen Gesteinen des Baltschieder-Granodiorites und des Zentralen Aare-Granits deutlich abgegrenzt werden. Erwartungsgemäss tiefe Werte treten im Bereich der Sedimente des Autochthons von Gampel-Baltschieder auf. Dabei lassen



Fig. 6-4: Asbest (Amiant; Länge der einzelnen Nadeln bis etwa 100 mm).

sich die kalkigeren Sedimente (Malm-Kalk, Lias-Kalk) deutlich von den tonigeren (Dogger-Mergel, «Aalénien-Schiefer») und der Trias unterscheiden.

Das Ausbruchmaterial von Ferden und Raron wurde bei den jeweiligen Portalen mit Messanlagen über dem Förderband zusätzlich überwacht (Tormessanlagen). Zu stark belastetes Material sollte so schon beim Portal abgetrennt und separat abgelagert werden können. Zu Beginn galt es, die Messdistanzen zum unterliegenden Band so einzustellen, dass nur erhöhte Werte zu einer Alarmierung führten. Die im Folgenden gemessenen Werte lagen normalerweise zwischen 0,8 und 2 kp/s. Sie sind jedoch nicht direkt vergleichbar mit jenen der anderen Messgeräte.

#### 6.4 Asbest

Wie aufgrund der Prognose erwartet, wurde zwischen der Nothaltestelle Ferden und den granitischen Schollenneisen nördlich des Zentralen Aare-Granits in Zerrklüften Amiant (Fig. 6-4) angetroffen. Beim Amiant handelt es sich um nadelig bis haarförmig entwickelten Aktinolith, der meist in Zusammenhang mit Amphibol führenden Gesteinen auftritt und in der Region Lötschental relativ verbreitet ist. Er bildet feine Asbestfasern, die, wenn sie eingeatmet werden, in hohem Masse gesundheitsgefährdend sind.

Nach dem zweiten Fund von Asbest im TBM-Vortrieb von Steg Richtung Norden, mit dem diese Zone zuerst gequert wurde, musste der Vortrieb auf Verlangen der SUVA für rund 10 Tage eingestellt und zusammen mit der SUVA ein Massnahmenplan mit Sicherheitsmassnahmen für die definierten Asbestgefahrenstufen ausgearbeitet werden. Dieser Massnahmenplan wurde dann für den Sprengvortrieb von Ferden Richtung Süden in leicht angepasster Form übernommen (Tab. 6-1).

Insgesamt wurden im Altkristallin zwischen Ferden und Raron (Oströhre km 38,325–41,888; Weströhre km 38,384–41,887) rund 120 Zerrklüfte mit faserigem Amiant angetroffen. Gemessen an der gesamten ausgebrochenen Gesteinskubatur war der Anteil an Asbest jedoch sehr gering. Da die

Massnahmen gegen das Einatmen von Asbestpartikel zu dem praktisch identisch sind mit den Massnahmen gegen zu hohe Quarzstaubkonzentrationen, relativiert das die Bedeutung der durchwegs sehr kleinen Asbestvorkommen zusätzlich.

Das Ausbruchmaterial aus den Bereichen mit Asbest führenden Zerrklüften wurde nach Rücksprache mit der Aufsichtsbehörde jeweils direkt entweder auf den Ablagerungsstandort Bubikopf (Material von Ferden) oder auf jenen im Riedertal (Material von den Vortrieben Steg und Raron) gebracht und dort umgehend mit anderem Material überdeckt.

#### 6.5 Rezente Bewegungen

Die im Lötschberg-Scheiteltunnel mit Präzisionsnivelements zwischen 1913 und 1996 gemessenen differentiellen Hebungen im Bereich der Überschiebung der Doldenhorn-Decke und des Jungfraukeils (KELLERHALS & ISLER 1998) lassen die Möglichkeit offen, dass es sich um neotektonische Hebungen handelt und dass auf Niveau Basistunnel ähnliche Phänomene zu erwarten sind. Da die oben erwähnten Messungen Hebungsraten zeigten, die für die vorgesehene Betriebsdauer des Basistunnels von 100 Jahren allenfalls kritisch werden könnten, wurden in beiden Bereichen Messstellen eingerichtet.

##### *Bereich Überschiebung Doldenhorn-Decke*

In der Weströhre wurden bei km 28,550 und bei km 28,865 je eine vertikale Bohrung abgeteuft und mit einem Trivec-Rohr (Messung der Deformationen in allen drei Richtungen) ausgerüstet. Damit können einerseits allfällige Bewegungen an der Grenze der Doldenhorn-Decke zum Autochthon Nord sowie an jener zwischen Autochthon und Kristallin überwacht werden. Bis jetzt lassen die Messungen aber noch keine Aussage über allfällige Bewegungen zu.

##### *Bereich Jungfraukeil*

Es wurde sowohl beim Südkontakt (BWN km 37,024) als auch beim Nordkontakt (BON km 36,936) je eine vertikale Bohrung abgeteuft, die anschliessend mit Trivec-Rohren ausgerüstet wurden. Zusätzlich wurde vom Querschlag QV 68 aus eine horizontale Kernbohrung durch den Jungfraukeil erstellt. In diese Bohrung wurden ein Horizontal-Inklinometer und ein Gleitmikrometer-Messrohr eingebaut.

Die bisherigen Messungen (2003–2007) lassen aber noch keine Aussagen über allfällige Bewegungen zu. Allenfalls werden zukünftige Messungen neue Angaben liefern.

Neben den Messstellen im Tunnel wurden während den Vortriebsarbeiten auch drei Bereiche auf der Südseite an der Erdoberfläche mit geodätischen Messungen überwacht. Sie befanden sich in Scheenbiel auf der Faldumalp (s. Fig. 12-1 in KELLERHALS & ISLER 1998), am Blumhorn und im Jolital (Störung Rote Kuh - Gampel). Auch in diesen drei Gebieten konnten während der fünfjährigen Überwachung keine eindeutigen neotektonischen Bewegungen festgestellt werden.

Tab. 6-1: Massnahmenplan für die verschiedenen Asbestgefahrenstufen (nach SUVA, angepasst).

| Gefährdungsstufe                       | Geologie   | Schutzmassnahmen   | Messungen  | Überwachung im Tunnel  |
|--|--|--|--|--|
| Stufe 0<br>Keine Asbest-<br>gefährdung | Keine Gesteine vor-<br>handen, in denen<br>Amiant auftreten kann   | keine  | keine  | keine  |
| Stufe 1<br>Asbestgefährdung<br>klein   | Vorkommen von<br>amianthaltigen Gesteinen<br>möglich<br><br>In den VDI-Messungen<br>wurde jedoch kein<br>Asbest nachgewiesen                                       | Schutzmassnahmen Asbest müssen<br>in 1–2 Tagen einsatzbereit sein.<br><br>Die P3-Masken sind im Vortrieb<br>vorzuhalten<br><br>(Vorrat für mindestens 3 Tage)  | Luftmessungen mit<br>VDI-Filtern durch IST<br><br>auf Anfrage der OBL<br>(min. 1 x pro Monat)<br><br>Vortriebsbereich und<br>beim Brecher LTF3   | Überwachung<br>der freigelegten<br>Felsoberfläche  |
| Stufe 2<br>Asbestgefährdung<br>gross   | Gesteine, in denen<br>Amiant auftreten kann,<br>wurden nachgewiesen<br>oder prognostiziert<br><br>In den VDI-Messungen<br>wurde jedoch kein<br>Asbest nachgewiesen | Schutzmassnahmen Asbest sind für den<br>sofortigen Einsatz vorzuhalten<br><br>Die P3-Masken sind im Vortrieb<br>bereitzustellen (Vorrat für mindestens<br>7 Tage)  | Luftmessungen mit<br>VDI-Filtern durch IST<br><br>1 x pro Woche<br><br>Vortriebsbereich und<br>beim Brecher LTF3   | Überwachung<br>der freigelegten<br>Felsoberfläche<br><br>Erstellen eines<br>Asbestprotokolls<br>durch den<br>Geologen  |
| Stufe 3<br>Asbest<br>nachgewiesen      | Asbest wurde gefunden<br>bzw. durch VDI-Mes-<br>sungen nachgewiesen  | Tragen Schutzausrüstung<br>(P3-Masken und Overall)<br><br>Overall ist täglich zu waschen<br><br>Alle Bedüsungen sind zu betreiben<br><br>Überdeckung des Amiants mit Mörtel<br><br>Arbeiten in drei verschiedenen, durch<br>Wasserdampf-Bogen getrennten<br>Gefährdungszonen<br><br>Keine Materialbrechung<br><br>Transport des ungebrochenen<br>Materials ohne Umladen auf die<br>Deponie Bubichopf | Luftmessungen mit<br>VDI-Filtern durch IST<br>(1 x pro Woche)<br><br>Luftmessungen mit<br>VDI-Filtern ausserhalb<br>Tunnel durch IST<br>(auf Anfrage OBL)<br><br>Luftmessungen mit<br>PCM-Filtern durch ÖBL<br>(1 x pro Woche in<br>3 Zonen) | Überwachung<br>der freigelegten<br>Felsoberfläche<br><br>Dokumentation<br>der Asbest-<br>vorkommen<br><br>Erstellen eines<br>Asbestprotokolls<br>durch den<br>Geologen |

PCM-Filter = Papierfilter. Unter dem Lichtmikroskop wird die Anzahl lungengängiger Fasern bestimmt (LF-Wert)

VDI-Filter = vergoldete Filter. Unter dem Rasterelektronenmikroskop können die lungengängigen Asbestfasern bestimmt werden (LAF-Wert)

IST = Institut Universitaire Romand de Santé au Travail

OBL = Oberbauleitung

ÖBL = örtliche Bauleitung

## 6.6 Oberflächendeformation Staumauer Ferden

Der Lötschberg-Basistunnel verläuft rund 300 m westlich der Staumauer Ferden und liegt 500 m tiefer als diese. Vom damaligen Bundesamt für Wasser und Geologie (heute BFE) wurde die Einrichtung eines Überwachungssystems verlangt, um so rasch wie möglich sich abzeichnende Gelände- oder Staumauerdeformationen oder eine allfällig anomale Verformung der Staumauer, der Widerlager oder ihrer Umgebung feststellen zu können. Zu diesem Zweck wurde ein Präzisionsnivelement längs der Talstrasse von den Felsaufschlüssen in Goppenstein bis zu jenen bei Chastel (nordöstlich des Dorfes Ferden) installiert. Zudem wurde die bestehende Anlage der ordentlichen Überwachung mit zusätzlichen, talquerenden Distanzmessungen im Bereich der Staumauer und ihrem Vorgelände ergänzt (MÜLLER 2008).

Die mittels Präzisionsnivelement durchgeführten Setzungsmessungen ergaben zwischen 1995 und 2003 keine

signifikanten Höhenänderungen für die im Fels versicherten, aber auch für viele weitere Punkte. Bei vereinzelt, nicht auf festem Fels gegründeten Messpunkten wurden kleinere oder grössere lokale Instabilitäten beobachtet, die in keinem Zusammenhang mit dem Vortrieb stehen.

Die Längenänderungen der talquerenden Distanzmessungen lagen im Überwachungszeitraum 1995–2007 stets innerhalb der Signifikanzgrenze von  $\pm 1,5$  mm (dreifacher mittlerer Messfehler). Schön nachweisen lassen sich einzig die saisonalen Einflüsse zwischen den beiden Staumauerwiderlagern.

Die Wasserführung im Fensterstollen Ferden und im Basistunnel war gegenüber der Prognose mit weniger als 0,1 l/s pro 100 m wesentlich geringer als prognostiziert (Prognose 11 l/s pro 100 m). Wie weit die nicht nachweisbaren Oberflächendeformationen auf die wesentlich geringeren Bergwasserzutritte zurückzuführen sind, ist nicht klar, da ja der Druckabbau auch bei diesen geringen Wassermengen erfolgt ist.

## 7. Vorauserkundung

### 7.1 Systematische Vorausb Bohrungen

Beim Vortrieb des ganzen Löttschberg-Basistunnels wurde mindestens in der vorauseilenden Röhre eine systematische Vorauserkundung durchgeführt. Auf die Vorauserkundung in der nacheilenden Röhre wurde nur verzichtet, wenn eine Extrapolation der geologischen Verhältnisse von einer Röhre in die andere möglich war. Die Vorauserkundung hatte zum Ziel, mächtigere Störungszonen und Wasser führende Zonen sowie Gas führende Bereiche rechtzeitig, d. h. bevor sie mit dem Vortrieb angefahren wurden, zu erkennen.

Je nach prognostiziertem Gefährdungsbild kamen verschiedene Verfahren zur Anwendung (s. Tab. 7-1). Dabei galt der Grundsatz «Je grösser die Gefährdung, desto aufwendiger die Vorauserkundung und die dazugehörigen Sicherheitseinrichtungen».

Aus der Figur 7-1 ist ersichtlich, wo welche Methode eingesetzt worden ist.

#### 7.1.1 Zerstörende Bohrungen mit dem Bohrjumbo oder einem anderen Bohrgerät (Gasvorbohrungen / «normale» Vorauserkundung)

Zwischen km 15,982 und dem Flysch der Doldenhorn-Decke bei km 24,35 wurden systematisch Gasvorbohrungen ausgeführt. Diese wurden mit dem Bohrjumbo ohne Packer leicht steigend von der Ortsbrust aus parallel zur Tunnelachse mit Längen von etwa 30–50 m gebohrt. Dank den Erkenntnissen aus dem parallel zu dieser Strecke verlaufenden Sondierstollen wurden nur geringe Wassermengen und ein maximaler Wasserdruck von 25 bar erwartet. Dies erlaubte

den Verzicht auf eine Vorrichtung zum Verschliessen des Bohrlochs. Die Bohrungen wurden überlappend angeordnet und hatten zum Ziel, Gasvorkommen frühzeitig zu erkennen und das Gas kontrolliert ausströmen zu lassen. Nebst Aussagen über die Gasführung lieferten diese Bohrungen auch Informationen über das aufzufahrende Gebirge.

Dasselbe Vorgehen wurde später in der Karbonstrecke, allerdings nur in der vorauseilenden Weströhre, erneut angewendet, weil auch dort Methangaszutritte nicht ausgeschlossen werden konnten und das Risiko von Wasserzutritten in diesen Gesteinen als sehr klein beurteilt wurde.

Im Los Ferden wurden im Bereich der Nordvortriebe destruktive Vorausb Bohrungen zur Erkundung der Gebirgsverhältnisse und der Wasserführung ausgeführt. Diese Bohrungen mit einer Länge von 40 bis 52 m mit jeweils rund 10 m Überlappung wurden ebenfalls mit einer mobilen Bohrmaschine oder dem Bohrjumbo erstellt. Insgesamt wurden in der vorauseilenden Weströhre 6190 m destruktive Vorausb Bohrungen durchgeführt, 1716 m davon direkt mit dem Jumbo. In der nacheilenden Oströhre konnten dank den Erkenntnissen aus der Weströhre die Vorauserkundungsbohrungen reduziert werden (3798 Bohrmeter, davon 768 m mit dem Bohrjumbo).

Die Auswertungen haben gezeigt, dass vor allem die scharfen Wechsel zwischen Gneisen, Schiefen oder Phylliten gut erkannt werden können. In den Graniten war die Interpretation dagegen deutlich schwieriger. Auf Kluftflächen verlaufende Bohrungen zeigten, vor allem in Intersektionen von steil stehenden K1- bzw. K2-Klüften mit den flach liegenden K3-Klüften, markant höhere Bohrgeschwindigkeiten und täuschten dadurch deutlich weiches Ge-

Tab. 7-1: Schema der systematischen Vorauserkundung.

| Prognostizierte Gefährdung   | Vorausb Bohrungen vorauseilende Röhre   | Vorausb Bohrungen nacheilende Röhre   |
|--|---|---|
| Keine spezielle Gefährdung (Gasführung mit Sondierstollen abgeklärt / kein hoher Wasserdruck erwartet) | Zerstörende Bohrungen mit dem Bohrjumbo oder einem anderen Bohrgerät bzw. mit Lafettenbohrgerät ab TBM                                  | Prognose in vorauseilender Röhre bestätigt:<br>→ keine Vorausb Bohrungen  |
| Keine spezielle Gefährdung; hoher Wasserdruck nicht ausgeschlossen                                     | Zerstörende Bohrungen mit dem Bohrjumbo oder einem anderen Bohrgerät und einfacher Gestängebremse bzw. mit Lafettenbohrgerät ab TBM     | Prognose in vorauseilender Röhre bestätigt, kein hoher Wasserdruck festgestellt<br>→ keine Vorausb Bohrungen                            |
| Gasführung prognostiziert oder nachgewiesen  | «Packerbohrungen» = zerstörende Bohrungen mit Untertagebohrgerät (Diamec) und Standrohr mit Innen- und Aussenpacker, auf 60 bar geprüft | «Packerbohrungen» = zerstörende Bohrungen mit Untertagebohrgerät (Diamec) und Standrohr mit Innen- und Aussenpacker, auf 60 bar geprüft |
| Verkarstungen prognostiziert   | Kernbohrung(en) mit Untertagebohrgerät (Longyear) und Preventeranlage sowie Geophysik (s. Kap. 7.2)                                     | Kernbohrung(en) mit Untertagebohrgerät (Longyear) und Preventeranlage sowie Geophysik (s. Kap. 7.2)                                     |

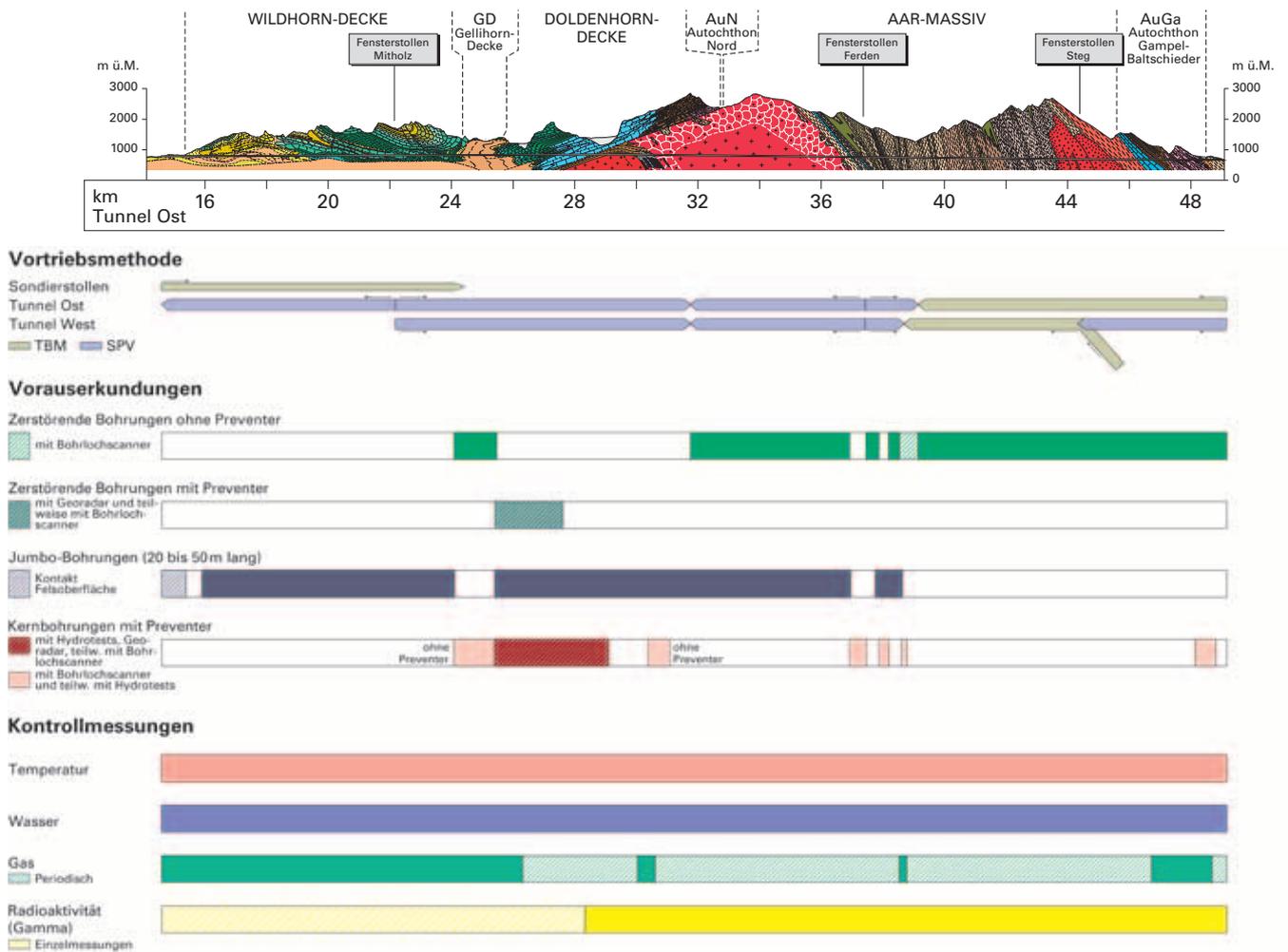


Fig. 7-1: Übersicht über die durchgeführten Vorauserkundungen.

stein vor. Demgegenüber reduzierte sich bei den langen Bohrungen die Nettovortriebsleistung wegen der steigenden Energieverluste bis zum Ende des Bohrlochs beträchtlich. Dies musste bei der Interpretation der Bohrung mitberücksichtigt werden, da sonst die Gesteine am Ende einer Vorausbohrung tendenziell eher als zu massig bzw. zu hart taxiert wurden. Ebenfalls von sehr grossem Nutzen waren die Vorausbohrungen für die Sicherheit gegen überraschende Wassereinträge.

Die Bohrungen wurden häufig rasch abgelenkt und verliefen bereits nach ca. 20 m ausserhalb des Tunnelprofils. Die Ablenkung erfolgte im Altkristallin in der Regel in die Senkrechte zur Hauptschieferung (nur bei kleinen Winkeln zwischen Bohrachse und Hauptschieferung wurde die Bohrung parallel zur Schieferung abgelenkt) und im Granit parallel zu den Klufflächen.

### 7.1.2 Zerstörende Bohrungen mit dem Bohrjumbo oder einem anderen Bohrgerät und einfacher Gestängebremse

Um das aufwendige Versetzen von Standrohr und Preventer zu vermeiden, wurde in Mitholz eine einfache Gestängebremse (Fig. 7-2) entwickelt. Nach entsprechenden

Tests und nach dem erfolgreichen Verlauf des Versuchs, einen Packer in ein Rohr (= simuliertes Bohrloch) mit rund 100l/s Wasserführung und einem Wasserdruck von 60 bar zu versetzen, wurde auf den weiteren Einsatz von Preventern bei den Gasvorausbohrungen im Flysch der Doldenhorn-Decke verzichtet.

Dank den positiven Erfahrungen in Mitholz wurden auch im Bereich der Nothaltestelle Ferden und südlich davon wegen des dort erwarteten hohen Wasserdruckes destruktive Vorausbohrungen von 20 bis 68 m Länge mit einer mobilen Bohrmaschine und einer einfachen Gestängebremse durchgeführt. Die Bohrungen erfolgten jeweils rund 10 m überlappend. In den restlichen Abschnitten in Ferden konnte dank den beim Ausbruch des FST Ferden und der Ansaugstollen gewonnenen Erkenntnissen auf diese Vorausbohrungen verzichtet werden.

### 7.1.3 Zerstörende Bohrungen ab TBM

Diese zerstörenden Vorausbohrungen wurden mit einem fest hinter dem Bohrkopf auf der TBM installierten Lafettenbohrgerät erstellt. Sie wurden jeweils mit einem anfänglichen Steigungswinkel von ca. 7–12° im First über den Bohrkopf der TBM hinweg und in der Achse des Vor-

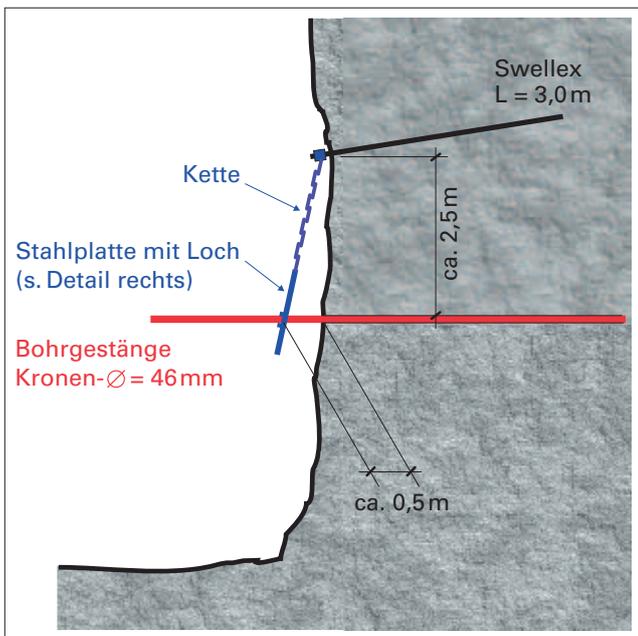
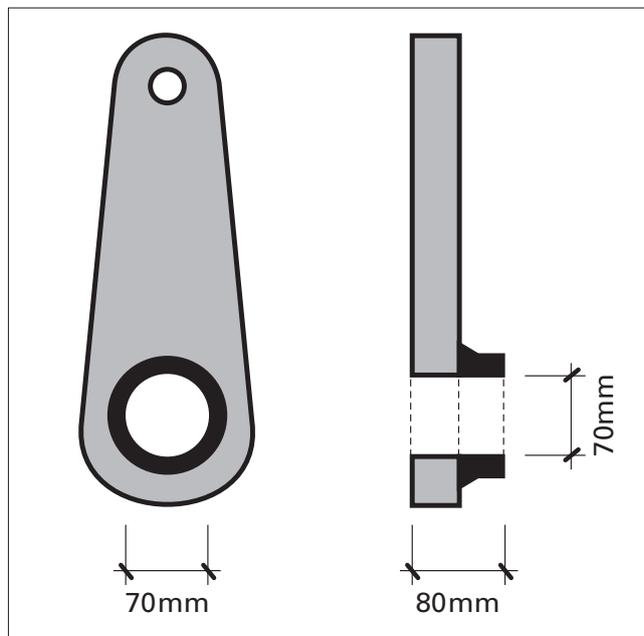


Fig. 7-2: Einfache Gestängebremse.



etriebes gebohrt. Die Bohrparameter Bohrfortschritt, Anpressdruck, Wasserdruck und Drehmoment wurden mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Die Bohrlänge betrug in der Regel 80 m. Da die Bohrungen nicht vermessen wurden, ist der Verlauf der Bohrlöcher nicht bekannt. In einigen Fällen tauchten die steigenden Bohrungen nach wenigen Metern in der Brust auf. Auch eine fallende Bohrung mit seitlicher Abweichung bis in die Tunnelwand konnte einmal nachgewiesen werden.

Es hat sich gezeigt, dass aufgrund der zu Beginn des TBM-Vortriebes ausgeführten destruktiven Vorausbohrungen (ohne Parameteraufzeichnung) lediglich betreffend der Wasserführung eine verlässliche Prognose gemacht werden kann. Auch die destruktiven Vorausbohrungen mit Bohrparameteraufzeichnung ergaben leider kaum belastbare Hinweise bezüglich der Art des Gesteins, der Intensität der Schieferung oder der Klüftung und der Lokalisation von Störungszonen. Die Überlagerung von technisch und geologisch bedingten Bohrparameteränderungen macht diese Art der Aufzeichnung für eine geologische Interpretation sehr unzuverlässig. So war zum Beispiel der scharfe Kontakt des Quinten-Kalks zu den kristallinen Schiefen des Balt-schieder-Granodiorits völlig unauffällig.

Ungünstig für die Qualität der aufgezeichneten Bohrparameter war die Tatsache, dass zwischen der Bohrlafette und dem Bohransatzpunkt am Fels eine freie Strecke von über 5 m vorhanden war, in welcher das Bohrgestänge nur ungenügend gestützt wurde. Dies ergab einen unruhigen Lauf des sehr biegsamen Bohrgestänges, das deshalb oft stark hin- und hergeschlagen wurde. Dies hatte sicherlich einen negativen Einfluss auf die Qualität der aufgezeichneten Bohrparameter.

Zudem konnte mit der vorhandenen Bohrvorrichtung nur schräg aufwärts und parallel zur Stollenachse gebohrt werden. Sinnvoller wäre eine Bohrrichtung senkrecht zur Schichtung/Schieferung gewesen.

Nördlich von km 45,393 wurden in der Oströhre keine systematischen Vorausbohrungen mehr gemacht, da die Geologie vom bereits aufgefahrenen benachbarten Tunnel West ausreichend bekannt war.

#### 7.1.4 «Packerbohrungen» (Gasvorböhrungen)

Sobald mit dem Vortrieb von Mitholz nach Süden der Fylsch der Doldenhorn-Decke erreicht wurde, erfolgten die Vorausbohrungen mittels Untertagebohrgerät mit automatischer Aufzeichnung der Bohrparameter. Ein Standrohr mit Innen- und Aussenpacker, die auf 60 bar geprüft wurden, hätte es erlaubt, das Bohrloch im Bedarfsfall zu verschliessen und mit Mörtel zu verfüllen. Von dieser Möglichkeit musste aber nicht Gebrauch gemacht werden. Bei grösseren Gaszutritten konnten die Packer geschlossen und der sich aufbauende Druck gemessen werden. Beim Gestängewechsel wurde jeweils die Methankonzentration über dem Bohrloch gemessen. Am Ende der Bohrung wurde die Methangaskonzentration 0,1–0,3 m tief im Bohrloch gemessen und protokolliert. Die Ergebnisse sind im Kapitel 6.2 kommentiert. Der Geologe war bei den Bohrarbeiten anwesend, da ausser der Gasüberwachung auch eine Vorauserkundung (Bestimmung Bohrklein, Bohrwasserfarbe, Bohrgeschwindigkeit, Wasserführung) erfolgte.

## 7.2 Vorauserkundung des Karsts

Die ganze Vorauserkundung in der Doldenhorn-Decke hatte zum Ziel, grosse bzw. überraschende Wasser- und Schlammleinbrüche zu verhindern. Deshalb wurde versucht, anhand von diversen Kriterien die Eintretenswahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses abzuschätzen und Gefahrenstufen zu definieren. Dabei wurden als wichtigste die folgenden Kriterien gewählt (s. ZIEGLER 2006):

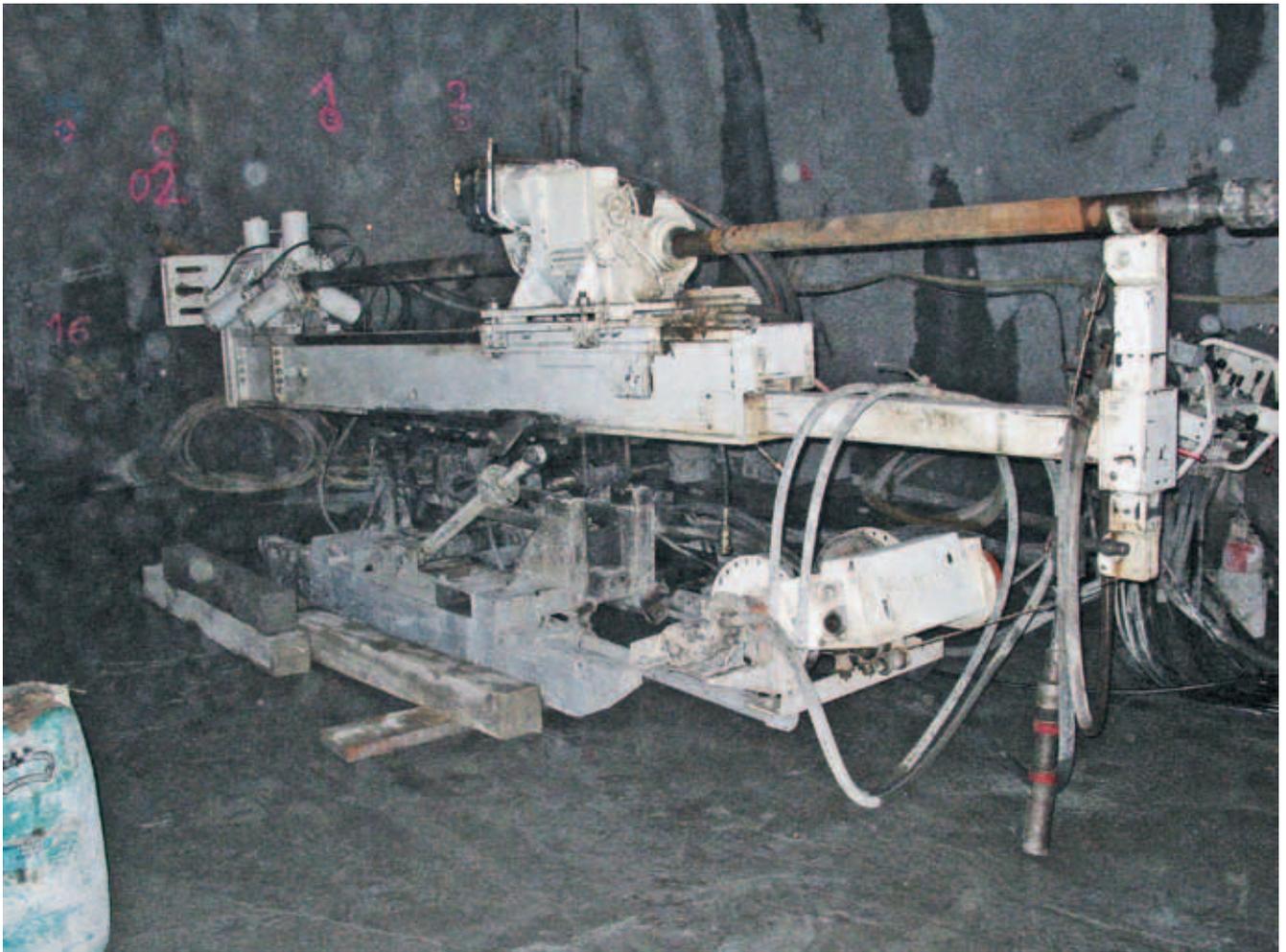


Fig. 7-3: Für die Karstvorauserkundung eingesetzte mobile Bohranlage der kanadischen Firma Morisette.

- Veränderung der Schüttung (stationär, Zu- oder Abnahme)
- Trübung bzw. Materialführung
- Temperatur (ist eine Anomalie gegenüber der Gebirgstemperatur vorhanden?)
- Leitfähigkeit (stark oder schwach mineralisiert)
- Wasserdruck (abnehmend oder stabil)

Anschliessend wurde von einer speziell für diese Fragestellung gebildeten Arbeitsgruppe das Vorauserkundungskonzept entworfen und während der Ausführung laufend den bisherigen Erkenntnissen angepasst. Zum Schluss bestand die Vorauserkundung aus folgenden Arbeiten:

- Ausführung von zwei langen (200–300 m) Vorausbohrungen mit Standrohr pro Erkundungsetappe in der vorauseilenden Röhre (Fig. 7-3).
- Ausführung einer langen Vorausbohrung pro Erkundungsetappe in der nachlaufenden Röhre.
- Sicherstellung einer Überlappung von mindestens 20 m zwischen einer Bohretappe und der nächsten.
- Alle Bohrungen wurden gekernt ( $\varnothing$  96 oder 76 mm) und im Schutz einer Preventeranlage ausgeführt (Fig. 7-5).
- Zur Verhinderung bzw. Reduktion von Umläufigkeiten zwischen Bohrloch und Tunnelbrust wurden in sämtlichen Bohrungen 20 m lange Standrohre versetzt.

- Alle Bohrungen wurden vermessen (Singleshot alle 50 m) und bei zu grosser Abweichung (mehr als 10 m ausserhalb des Tunnelprofils) abgebrochen.
- Pro Röhre wurden in einer Bohrung Georadarmessungen durchgeführt.
- In allen Bohrungen wurde die Wasserführung permanent protokolliert (d.h. Messung bei jeder Kernentnahme).
- In allen Bohrungen wurden Hydrotests gemacht (mindestens ein Auslaufversuch von 1–2 Stunden Dauer nach Abschluss der Bohrarbeiten, normalerweise aber Interferenzversuche und/oder Packertests).
- In einer Bohrung pro Erkundungsetappe wurden Bohrlochscanneraufnahmen gemacht.
- Sämtliche Bohrungen wurden nach Abschluss der Versuche ab Bohrkopf vollständig ausinjiziert, so dass im Gebirge keine neuen Fliesswege entstehen konnten und allenfalls vorhandene bereits etwas abgedichtet wurden.

Speziell darauf hinzuweisen ist, dass erste Resultate der Bohrlochmessungen (inkl. Georadar und Scanner) bzw. -versuche schon während der Messungen vorlagen. Die detaillierten Auswertungen waren innerhalb von 24 Stunden gemacht, was erlaubte, die Gefährdung durch einen Wassereintritt in den kommenden Tunnelabschnitten abzuschätzen.



Fig. 7-4: Zur Erkundung des Jungfraukeils eingesetzte Untertagebohranlage der Firma Stump Foratec SA.

zen und die sich daraus ergebenden Massnahmen rechtzeitig umzusetzen. Diese umfassten entweder eine variierende Zahl von Drainagebohrungen mit dem Bohrjumbo im «normalen» Vortrieb, zusätzliche Jumbobohrungen oder zusätzliche Erkundungsbohrungen.

Die Bohrungen mit dem Bohrjumbo mit Längen von 24 m und einer Überlappung von 8 m ermöglichten durch das vorgängige Anbohren Wasser führender Strukturen eine kontrollierte Gebirgsdrainage. Die Anzahl dieser Bohrungen wurde jeweils aufgrund des Befundes der Vorauserkundung festgelegt und lag zwischen sechs (Normalfall, ausnahmsweise nur zwei) und sechzehn Bohrlöchern. Bei erhöhtem Karstrisiko wurden in der Regel zwölf Bohrungen gemacht, wobei vier davon um die Brustmitte herum gerade nach vorne und die restlichen acht Bohrungen randlich und kegelförmig nach aussen gerichtet wurden.

Die ursprüngliche Absicht, sehr lange Vorausbohrungen aus den Querverbindungen heraus auszuführen (und somit ohne Vortriebsbehinderung zu machen), erwies sich nach den Erfahrungen mit der ersten Bohrung bei km 25,338 (Querverbindung 33) als nicht durchführbar. Wasserzutritte in die Bohrung und Spülverluste führten über Umläufigkeiten zu Wasseraustritten in den parallel laufenden Vortrieben und machten mehrere zeitraubende Zementationen mit anschliessendem Wiederaufbohren des Bohrloches er-

forderlich, so dass die Bohrung nach 541 m (anstelle der geplanten 1000–1200 m) nach einem Klemmer beim Gestängerrückzug endgültig aufgegeben werden musste.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit den durchgeführten Vorauserkundungen (totale Bohrlänge von 15 745 m) die befürchteten grossen Wasser- und Schlamm-einbrüche in den Tunnel verhindert und die Vorgaben in der Plangenehmigung eingehalten werden konnten. Zudem hat sich einmal mehr gezeigt, dass für belastbare geophysikalische Messungen der Befund von Kernbohrungen unerlässlich ist.

### 7.3 Vorauserkundung Trias Raron

Vom Pilotstollen «Trias» aus wurden vier zumindest teilweise gekernte Bohrungen zur Erkundung der Kontakte Altkristallin Süd / Trias und dem Aufbau der Trias ausgeführt. Eine weitere Bohrung, parallel zum Tunnel aus einer Nische neben der Oströhre vorgetrieben, diente der Erkundung und vorgängigen Drainage der Wasser führenden Lias-Kalke. Auch diese Bohrung querte wiederum die Trias.

Auf diese Drainagebohrung in den Lias-Kalken (ab km 48,531 Oströhre), die anfänglich bis 80 l/s Wasser brachte, reagierte die Quelle «Am Bach» in St. German wie er-



Fig. 7-5: Eingesetzte Preventeranlagen.

wartet sofort. Nach knapp einem Monat versiegte die Quelle dann definitiv. Der hydrostatische Druck am Bohrkopf ging von anfänglich 18 bar nach 2 Monaten auf 1 bar zurück. Etwas später versiegten auch die benachbarten Quellen.

#### 7.4 Vorauserkundung Sedimenteinschuppungen / Jungfrau keil

Ab dem Fusspunkt Ferden wurden zur Erkundung der genauen Lage, der Ausbildung und der Wasserführung der Sedimenteinschuppungen und des Jungfrau keiles insgesamt 7 horizontale Kernbohrungen mit einem elektrisch betriebenen Untertagebohrgerät durchgeführt (Fig. 7-4). Wegen der prognostizierten Wasserdrücke von 120 bar wurde ein 20 m langes Standrohr versetzt und darauf eine Preventeranlage, bestehend aus einem Vollabschlussschieber mit «killing and injection line», einem Ringraum- und einem Scherpreventer montiert (Fig. 7-5).

Um ein Weiterbohren bei grossen Wasserzutritten zu ermöglichen, war zusätzlich immer ein Rotationspreventer mit der dazugehörenden Schleuse für die Kernentnahme auf Platz. Er musste jedoch nie verwendet werden. Sämtliche Bohrungen wurden in Lage und Neigung vermessen und zur Bestimmung der genauen Orientierung der Strukturen mit dem Bohrlochscanner aufgenommen.

Nach Erreichen des Fusspunkts des Zugangsstollens wurde eine erste Kernbohrung mit einer Länge von 452 m ausgeführt (Fig. 3-10). Der Bohransatzpunkt befand sich in einem Sicherheitsabstand von rund 50 m zum von den Oberflächenbohrungen her bekannten südlichen Rand der Sedimentzonen. Diese erste Bohrung bestätigte die in den Oberflächenbohrungen festgestellte Aufteilung der Sedimente in zwei Zonen: dem eigentlichen Jungfrau keil und den beiden südlich davon gelegenen Schuppen. Dazwischen wurden auf einer Länge von rund 170 m altkristalline Gneise durchbohrt. Dagegen wurden bei der Wasserführung gegenüber den Oberflächenbohrungen sehr unterschiedliche Verhältnisse angetroffen. Die Wasserführung erfolgte hauptsächlich in den Sedimenteinschuppungen und nicht – wie erwartet – im eigentlichen Jungfrau keil.



Mit den Resultaten aus dieser Bohrung wurde das weitere Vorgehen festgelegt:

- Vortrieb bis 50 m vor die erwartete Wasser führende Zone
- Horizontale Kernbohrung mit Preventer, Länge: 100–120 m (bis ins Altkristallin)
- Vortrieb bis 20 m vor die Wasser führende Zone
- Kontrollbohrung (gekernt) und falls notwendig Bohrungen für die Abdichtungsinjektionen.

Dieses Vorgehen wurde in allen Vortrieben bei der Querung der Sedimenteinschuppungen und des Jungfrau keiles entsprechend wiederholt (insgesamt also 6-mal). Es ist dabei klar, dass mit zunehmenden Kenntnissen der lokalen Verhältnisse geringfügige Anpassungen gemacht wurden. So wurden zum Beispiel die Sicherheitsabstände für die Bohretappen bei den letzten Bohrungen etwas kürzer gewählt als zu Beginn. Dank dem gewählten Vorgehen war es mit einem vertretbaren Aufwand möglich, die Auflagen der Plangenehmigung einzuhalten und eine Beeinträchtigung der Thermalquellen von Leukerbad zu verhindern (s. Kap. 8.2.2). Wegen der günstigen Lage der Sedimentschuppen und des Jungfrau keiles in Bezug auf das Bauwerk (direkt nördlich der Nothaltestelle Ferden) konnte der jeweilige Vortrieb für Bohrungen eingestellt und die Leute in einem anderen Vortrieb beschäftigt werden. Dies hat die ganze Erkundung insofern entschärft als immer genügend Zeit für die Bohrungen zur Verfügung stand.

#### 7.5 Vorauserkundung Karbon / Kristallin

Aus dem unerwartet langen Karbon-Abschnitt nördlich des Gastern-Granits heraus wurden insgesamt vier Bohrungen angesetzt mit dem Ziel, die noch aufzufahrende Länge der Sedimentstrecke und die Beschaffenheit des Kristallins zu erkunden. Die ersten drei Bohrungen in der Oströhre blieben bereits nach kurzer Zeit im druckhaften Gebirge stecken. Erst mit der vierten Bohrung aus der Weströhre, die im südlichsten Karbonabschnitt in Sandsteinen angesetzt wurde, konnten 471,3 m erfolgreich erbohrt werden.

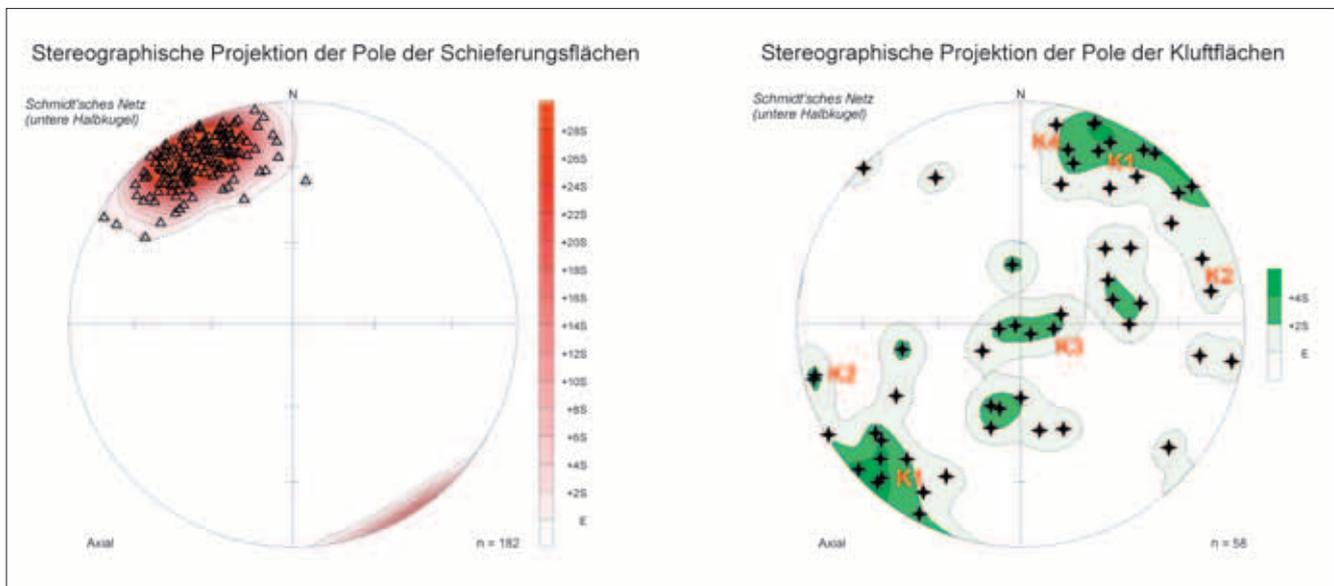
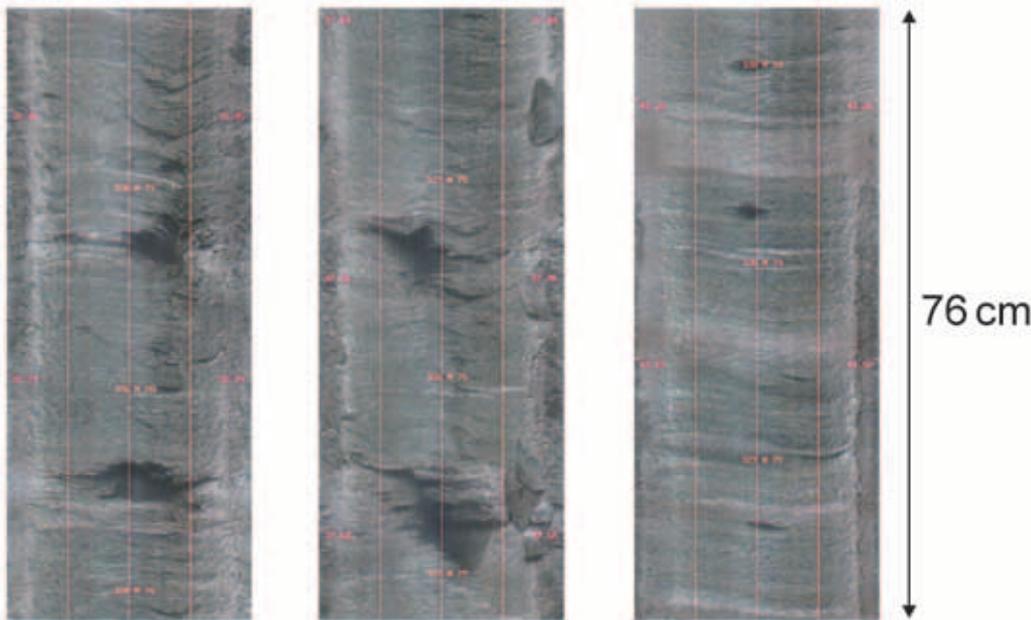


Fig. 7-6: Scanneraufnahmen und dazugehörige Strukturauswertung.

## 7.6 Vorauserkundung Phyllitzone Dornbach, Karbon von Ferden und Phyllitzone Faldumbach

Zur Erkundung der Phyllitzone Dornbach und des Karbons von Ferden wurden in den Vortrieben von Ferden Richtung Süden zwei Kernbohrungen mit Längen von 244 m und 301 m durchgeführt. Für die Erkundung der Phyllitzone Faldumbach wurde im Osttunnel keine Kernbohrung mehr angesetzt, da hier bereits auf die geologischen Aufnahmen des von Steg her ausgebrochenen Westtunnels zurückgegriffen werden konnte.

Aufgrund der Erfahrungen beim Vortrieb des Zugangstollens des Zwischenangriffes Ferden mit der Querung der Phyllitzone Faldumbach und des Karbons von Ferden bestand die Möglichkeit, erstere mit der TBM, die sich von

Steg/Niedergesteln in Richtung Norden vorarbeitete, zu durchfahren und erst kurz vor dem Karbon von Ferden – und nicht wie ursprünglich vorgesehen schon wesentlich weiter südlich – den TBM-Vortrieb zu beenden. Damit bestand die Chance, einen erheblichen Zeit- und Kostengewinn zu realisieren. Aus diesem Grund kam eine Vorauserkundung zum Einsatz, die etwas detaillierter war als sonst bei den beiden TBM-Vortrieben auf der Südseite des Lötschberg-Basistunnels üblich (s. Kap. 7.1.3). Wegen der gemachten Erfahrungen wurde entschieden, die zerstörenden Bohrungen beizubehalten, in diesen aber mit ergänzenden Scanneraufnahmen die Bohrlochwand zu begutachten sowie die räumliche Lage der angetroffenen Strukturen zu bestimmen (Fig. 7-6). Mit diesen zusätzlichen Angaben war es möglich, das vermutete Gebirgsverhalten genauer zu prognostizieren und so den Entscheid zu fällen, den TBM-Vortrieb fortzusetzen.

Um Wartezeiten beim Vortrieb zu verhindern, musste der ganze Ablauf so organisiert werden, dass sofort nach Abschluss der Erkundungsarbeiten ein Entscheid über das weitere Vorgehen gefällt werden konnte. Zu diesem Zweck trafen sich die verantwortlichen Personen (Bauleitung, Geologe, Unternehmung) jeweils gegen das Ende einer Vorauserkundungsetappe vor Ort, betrachteten gemeinsam die laufenden Scanneraufnahmen und fällten anschliessend sofort ihren Entscheid. Dies setzte von allen Beteiligten eine grosse Flexibilität voraus.

Gleichzeitig lieferten die Scanneraufnahmen auch eine Bohrlochvermessung. Dabei wurde festgestellt, dass sich sämtliche Bohrlöcher, die über den Bohrkopf hinweg angesetzt wurden, schon nach relativ kurzen Strecken wieder im Ausbruchprofil befanden. Der Grund dafür ist in den steil gegen den Vortrieb zu einfallenden Schieferungsflächen zu suchen, auf die sich die Bohrungen mehr oder weniger senkrecht ausrichteten.

Rückblickend lässt sich festhalten, dass sich das gewählte Vorgehen bewährt hat:

- Wie der nachfolgende Vortrieb zeigte, wurde richtig erkannt, dass die Phyllitzone Faldumbach mit der TBM gequert werden konnte.
- Der TBM-Vortrieb wurde rechtzeitig vor Erreichen des Karbons von Ferden gestoppt.

Das Karbon von Ferden wurde anschliessend von Norden her im Schutz eines Rohrschirmes mit dem Microbenching-Verfahren (d.h. der Stross befand sich immer einen Abschlag hinter der Kalotte) ausgebrochen. Zur Sicherung wurden sofort Stahlbögen, Anker und Spritzbeton eingebaut.

## 7.7 Vorauserkundung bei Spezialfragen

### 7.7.1 Tastbohrungen

Wegen der Erfahrungen mit dem Sondierstollen, bei dem im Bereich Adelnrain südlich von Frutigen Moräne durchfahren wurde, wurden in der Ost- (km 15,350–15,080) und der Weströhre (km 15,347–15,096) zur Sicherstellung einer minimalen Felsüberdeckung jeweils zwei mit 30° schräg nach oben gerichtete Bohrungen mit dem Bohrumbo ausgeführt. Die einzelnen Bohretappen wiesen normalerweise 30 m Länge auf und wurden so angeordnet, dass eine ausreichende Überlappung gewährleistet war. In der Oströhre wurde zwischen km 15,305 und 15,250 die Felsobergrenze durchbohrt, d.h. die vertikale Felsüberdeckung beträgt in diesem Abschnitt zwischen 5 und 15 m, wobei die geringste Überdeckung (<5 m) bei km 15,305 festgestellt wurde. In der Weströhre wurde die Felsoberfläche mit diesen Bohrungen nie erreicht.

Vor Erreichen der Losgrenze wurden sowohl in der Ost- (km 14,847–14,655) als auch in der Weströhre (km 14,896–14,677) erneut Tastbohrungen ausgeführt. In der

Oströhre wurde ab km 14,710 bis Vortriebsende die Felsoberfläche regelmässig erbohrt. Die geforderte vertikale Minimalüberdeckung von 5 m wurde bei km 14,677 erstmals unterschritten und der Vortrieb von Süden Richtung Norden in der Folge eingestellt. In der Weströhre wurde die Felsoberfläche bei km 14,710 bei einer vertikalen Überdeckung von 12 m erstmals durchbohrt. Ab dort nimmt die Überdeckung bis zum Minimum von 5,5 m bei km 14,675 ab und steigt anschliessend wieder an. Bei der Losgrenze beträgt die vertikale Felsüberdeckung 7 m.

### 7.7.2 Drainagebohrungen

Vor dem Anfahren der Basis der Doldenhorn-Decke und der kakiritischen Schiefer des als Autochthon Nord prognostizierten Abschnitts wurden im Sohlbereich beider Vortriebe je sechs fächerförmig angeordnete Drainagebohrungen ausgeführt. Diese Bohrungen hatten zum Ziel, allfällig vorhandene Wasserdrücke abzubauen und Wasserzutritte von den empfindlichen Kakiriten abzuleiten. Diese Drainagebohrungen wiesen Längen von 55 bis 80 m auf. Die Bohrlöcher waren jeweils bis einige Meter in die Trias hinein mit HQ-Gestänge verrohrt und somit abgedichtet.

Die Wasserzutritte konzentrierten sich auf den voraus-eilenden Tunnel West. Hydraulische Versuche an den Drainagebohrungen ergaben für das Triasintervall einen Ruhe-Druck von rund 45 bar und zeigten, dass der Triasabschnitt eine sehr geringe Durchlässigkeit aufweist. Die Messungen im Westen waren jedoch durch die Gebirgsdrainage etwas beeinflusst, für die Oströhre wurde eine Transmissivität von  $7,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  bestimmt. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde auf zusätzliche Drainagebohrungen in der Kalotte verzichtet.

Vergleiche der Wasserchemie haben gezeigt, dass der einzige in der Oströhre festgestellte Wasserzutritt (0,51/s) in einer dieser Bohrungen damit zusammenhing, dass diese Bohrung in hydraulischer Verbindung mit der Erkundungsbohrung 94/19 (eine der Erkundungsbohrungen im Gasteretal, s. KELLERHALS & ISLER 1998) stand. Die Bohrung 94/19 wurde später auch im Vortrieb angefahren.

Auch auf der Südseite wurden beim Übergang vom Altkristallin Süd zur Trias zuerst beim Vortrieb und später vor dem Einbau der Innenschalen auf beiden Achsen je zwei Drainageschirme ausgeführt. Damit sollte verhindert werden, dass Wasser entlang der Abdichtung vom Kristallin in die poröse und zum Teil Gips führende Rauwacke gelangen kann. Die Bohrungen wurden in einem Winkel von 10° zur Achse und 10° steigend ausgeführt, mit variablen Längen zwischen 4 und 12 m.

Im ganzen Basistunnel wurden weitere, mehr oder weniger systematische Bohrungen in Wasser führenden Abschnitten angeordnet, teilweise senkrecht zum Parament, teilweise in Vortriebsrichtung schräg nach unten. Die Drainagewirkung war oft ausgezeichnet. Die meisten Bohrungen führten nach wenigen Tagen bis höchstens Wochen kein Wasser mehr.

## 8. Besondere Massnahmen

### 8.1 Querung der Bergstrecke in Frutigen

Für die Stützung des BLS-Dammes im Bereich des Tunnelportals Frutigen wurde eine 75 m lange aufgelöste Bohrpfehlwand erstellt (Fig. 8-1). Die 14–19 m langen Bohrpfähle mit einem Durchmesser von 1 m wurden von einer an den BLS-Damm angeschütteten Arbeitsplattform aus mit einem Fels-Schneckenbohrgerät gebohrt. Die Pfähle sind zu  $\frac{1}{2}$  bis  $\frac{3}{4}$  ihrer Länge im dichten Schieferfels und der sehr dicht gelagerten Grundmoräne eingebunden. Die Felsoberfläche steigt gegen NW an und ist beim Westportal höher als beim Ostportal. Darüber lagert in stark schwankender Mächtigkeit (1–6 m) Moräne und der 2–6 m mächtige Bahndamm. Dieser ist sehr inhomogen aus lokalem Abbaumaterial aufgebaut (Fels aus dem Einschnitt Tellenburg, Moräne, Schwemmschichten), das seinerzeit schlecht verdichtet worden war.

Im Bereich der Tunnelröhren wurde die Pfehlwand rechtwinklig in eine hangseitige Widerlagerwand rückverankert und der Damm dadurch eingespannt. Weil die Tunnelachse schief zur Pfehlwand verläuft, befindet sich dieses Widerlager über dem Tunnel West. Seitlich der auszubrechenden Tunnelröhren wurde die Pfehlwand mit geneigten Ankern direkt im Fels verankert.

Die Ausbruchsicherung erfolgte auf den ersten rund 90 m der Weströhre im Schutz eines in 6 Etappen gebohrten Rohrschirmes (Rohrdurchmesser 14 cm, Fig. 8-2). Bis Etappe 3 überspannte der Schirm die Kalotte von 9 bis 3 Uhr, mit einem Rohrabstand von 28 cm. Ab Etappe 4 (Widerlagerwand unterfahren, guter Fels) wurde er auf 10 bis 2 Uhr reduziert und die Rohrabstände auf 35 cm erhöht. In der Oströhre wurde gleich vorgegangen. Nur musste der Rohrschirm hier wegen der tieferen Lage der Felsoberfläche auf eine Länge von 98 m (7 Etappen) erstellt werden, und eine Reduktion konnte erst ab der fünften Etappe vorgenommen werden.

Die durchhörten Lithologien in der Weströhre sind vorwiegend Dachschiefer der Taveyannaz-Serie. Eigentlicher Taveyannaz-Sandstein wurde ab km 14,628 in einzelnen Bänken (0,3–2,0 m) angetroffen. Die Dachschiefer bestehen aus einer heterogenen Abfolge von Ton- und Silt-schiefern mit eingelagerten harten Bänken aus mergeligen Silt- und feinen Sandsteinen. Die Bankung variiert im cm-bis 4-dm-Bereich. Im Portalbereich und bis ca. km 14,580 (Bereich Widerlagerwand) sind die Dachschiefer stark schiefrig und oft entlang kakiritisierter Scherzonen zerschert. In gewissen Abschnitten erscheint der Schichtverband in der Kalotte über solchen Zonen hakenwurfartig abgeknickt. Die Felspakete im Hangenden solcher Scher-



Fig. 8-1: Ansicht der Pfehlwand beim Portal Frutigen (aus STRAUMANN et al. 2004).



Fig. 8-2: Vortrieb im Schutz eines Rohrschirmes (Unterquerung der BLS-Bergstrecke beim Portal Frutigen).

zonen führten vermehrt Sickerwasser und die Klüfte sind rostig angewittert (Fig. 8-3).

Ab km 14,580 wird die Bankung dicker (1–5 dm); die harten, splittig brechenden Silt- und Feinsandsteine überwiegen deutlich. Auch dieser Fels ist zonenweise stark verfaltet und längs kakiritisierter Scherflächen zerschert.

Im Ostvortrieb wurden insgesamt mehr Lockergesteine angetroffen als im Westvortrieb. Über dem Fels liegt bis

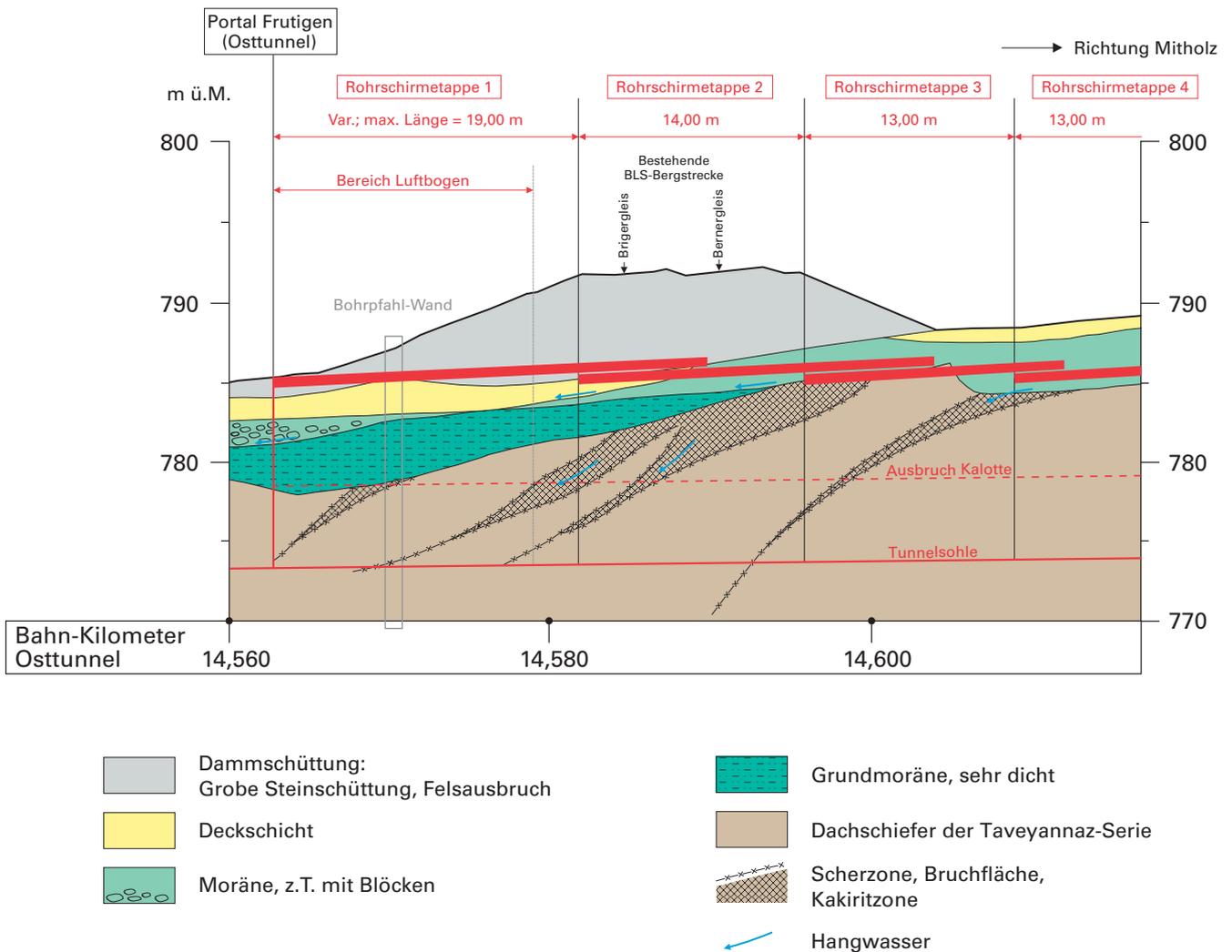


Fig. 8-3: Geologischer Befund in der Oströhre des Rohrschirmvortriebs unter der BLS-Bergstrecke.

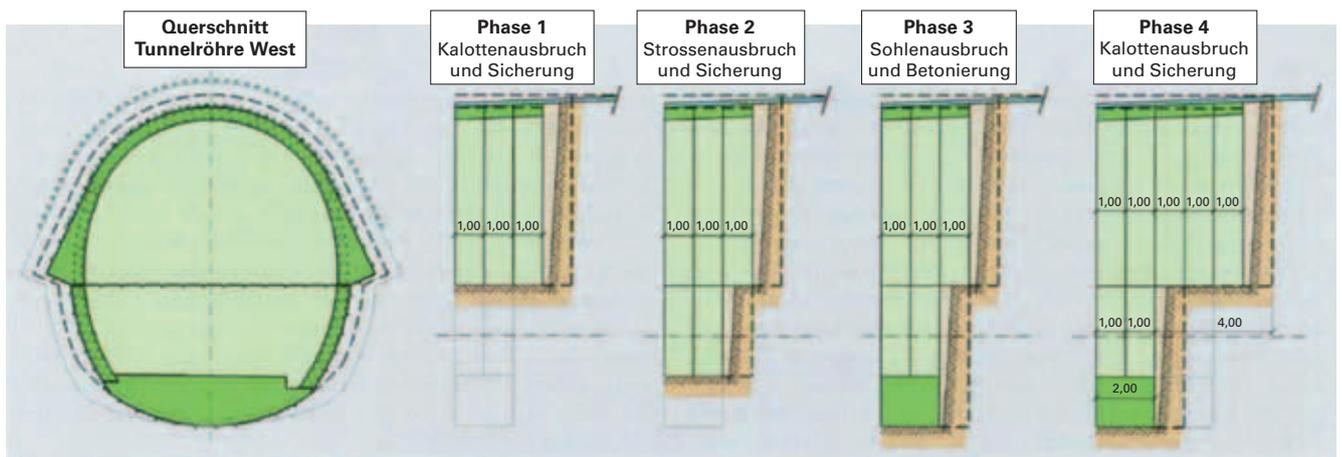


Fig. 8-4: Abfolge der einzelnen Vortriebsphasen (aus STRAUMANN et al. 2004).

km 14,570 sehr dicht gelagerte, 1–3 m mächtige Grundmoräne von generell dunkelgrauer, in gewissen Bereichen aber auch brauner Farbe, die von weniger dicht gelagerter Obermoräne überlagert ist. Die unter dem Rohrschirm angetroffene, standfeste Moräne enthielt immer wieder Blöcke. Die durch Verwitterung und biogene Prozesse beeinflusste

Deckschicht besteht ebenfalls aus Moränenmaterial und ist deutlich weniger standfest. Der Bahndamm ist auf diese Deckschicht geschüttet und besteht aus sehr heterogenem und z.T. schlecht verdichtetem Kies mit wechselhaftem Gehalt an Sand, Steinen und kleinen Blöcken. Wie beim Tunnel West beträgt die Überlagerung auch im Tunnel Ost le-

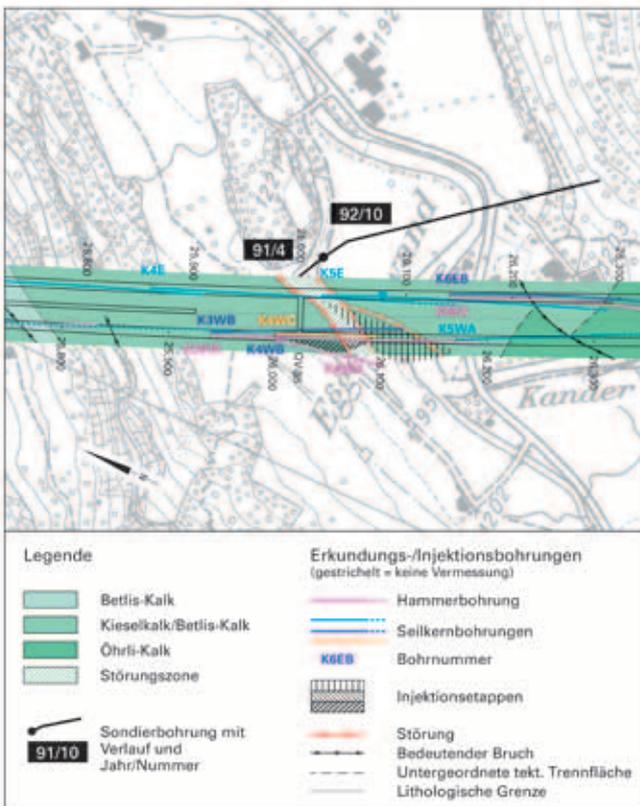


Fig. 8-5: Horizontalschnitt mit Erkundungsbohrungen und abgedichteter Störungszone im Bereich der Talquerung bei Eggeschwand.

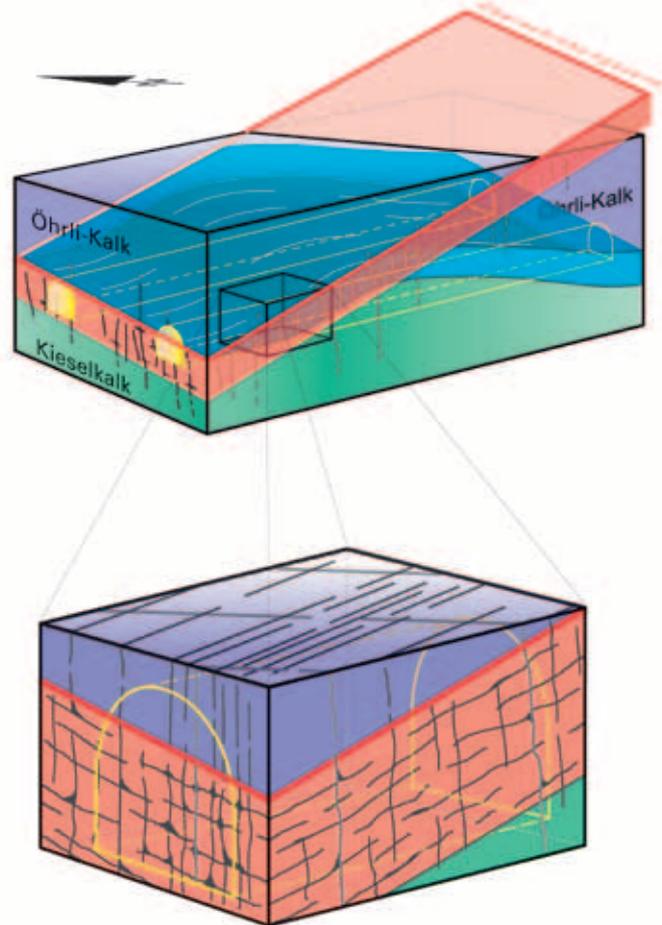


Fig. 8-6: Hydrogeologisches Modell der verkarsteten Überschiebungszone bei km 26.

diglich 5–10 m, wobei die Basis des Bahndamms bis maximal 1 m unter die Firste reicht. Aus diesem Grund musste das locker gelagerte Schüttmaterial über dem Rohrschirm mittels Zementinjektion stabilisiert werden. Die Felsoberfläche steigt vom Portal her an, erreicht nach 60 m die Firste und taucht bei km 14,674 nochmals bis ins Tunnelprofil hinunter. Ab km 14,640 liegt der Tunnel vollständig im Fels. Zwischen km 14,575 und 14,605 ist der Gesteinsverband in den obersten 1–2 m weitgehend entfestigt.

Die Schichtflächen fallen mehrheitlich mittelsteil nach NW bzw. SE ein. Die Schichtung streicht demzufolge in einem Winkel von ca. 30° zur Tunnelachse. Die Klüftung ist untergeordnet. Meist handelt es sich um eine auf die einzelnen Bänke beschränkte Kleinklüftung. Das Gebirge wird durch einige über den Tunnelbereich hinaus reichende Scherzonen und Bruchflächen durchtrennt und ist teilweise völlig kakiritisiert. Diese Zonen fallen mit 30–60° nach NW ein.

Wegen der unsicheren Lage der Felsoberfläche bzw. der nicht völlig auszuschliessenden Möglichkeit von moränengefüllten, Wasser führenden glazialen Felsrinnen, die bis in den Tunnelquerschnitt reichen, wurden ab der vierten Rohrschirmetappe mit dem Bohrrjumbo zerstörende, schräg nach oben gerichtete Vorausbohrungen ausgeführt.

Der Wasseranfall war während des Vortriebes gering. Es handelte sich meist nur um Tropfwasser, selten um kleine Quellen, die vorzugsweise entlang der Rohrschirm- oder Vorbohrungen aussickerten. Häufig bildeten flach bis mittelsteil liegende, kakiritisierte Scherzonen in der Kalotte

lokale Stauhohizonte für das Hangwasser. Der Fels darunter war trocken und frisch, darüber jedoch vernässt und entlang der schieferigen Bankfugen und der Kleinklüftung rostig angewittert. Die Wasserzutritte reagierten während des ganzen Jahres und bei jedem Vortriebsstand stark und internet weniger Stunden auf Niederschläge.

Um mit dem Vortrieb unter dem Bahndamm hindurch nur möglichst kleine Setzungen zu erzeugen, wurde versucht, so schnell wie möglich einen Ringschluss zu erstellen (Fig. 8-4). Diese Vorgehensweise hat sich als sinnvoll erwiesen, da die gemessenen Setzungen über dem Osttunnel, wo sie am grössten waren, insgesamt nur 25 mm betragen.

In enger Zusammenarbeit mit dem BLS-Unterhaltungsdienst wurden die Gleise regelmässig nivelliert und bei Bedarf ausgeglichen. Die Bohrpfahlwand wurde geodätisch überwacht. Ein halbes Jahr nach Vortriebsende betrug die Auslenkung der Bohrpfähle senkrecht zur Portalwand beim Portal Ost <25 mm, beim Portal West <10 mm. An einem 42 m langen horizontalen Extensometer in der Brust wurde zusätzlich die Felsauflockerung während des Vortriebes überwacht. Mit maximal 6 mm aufsummierter Deformation erwies sich die Tunnelbrust stets als stabil. Es zeigte sich dabei auch, dass die Auflockerung bis ungefähr 20 m in den Berg reichte.

Trotz all dieser Massnahmen ereignete sich bei Tm 18 in der Oströhre ein Tagbruch: Feinkörniger, vorwiegend plattiger und ungenügend verfestigter Kies und Sand aus

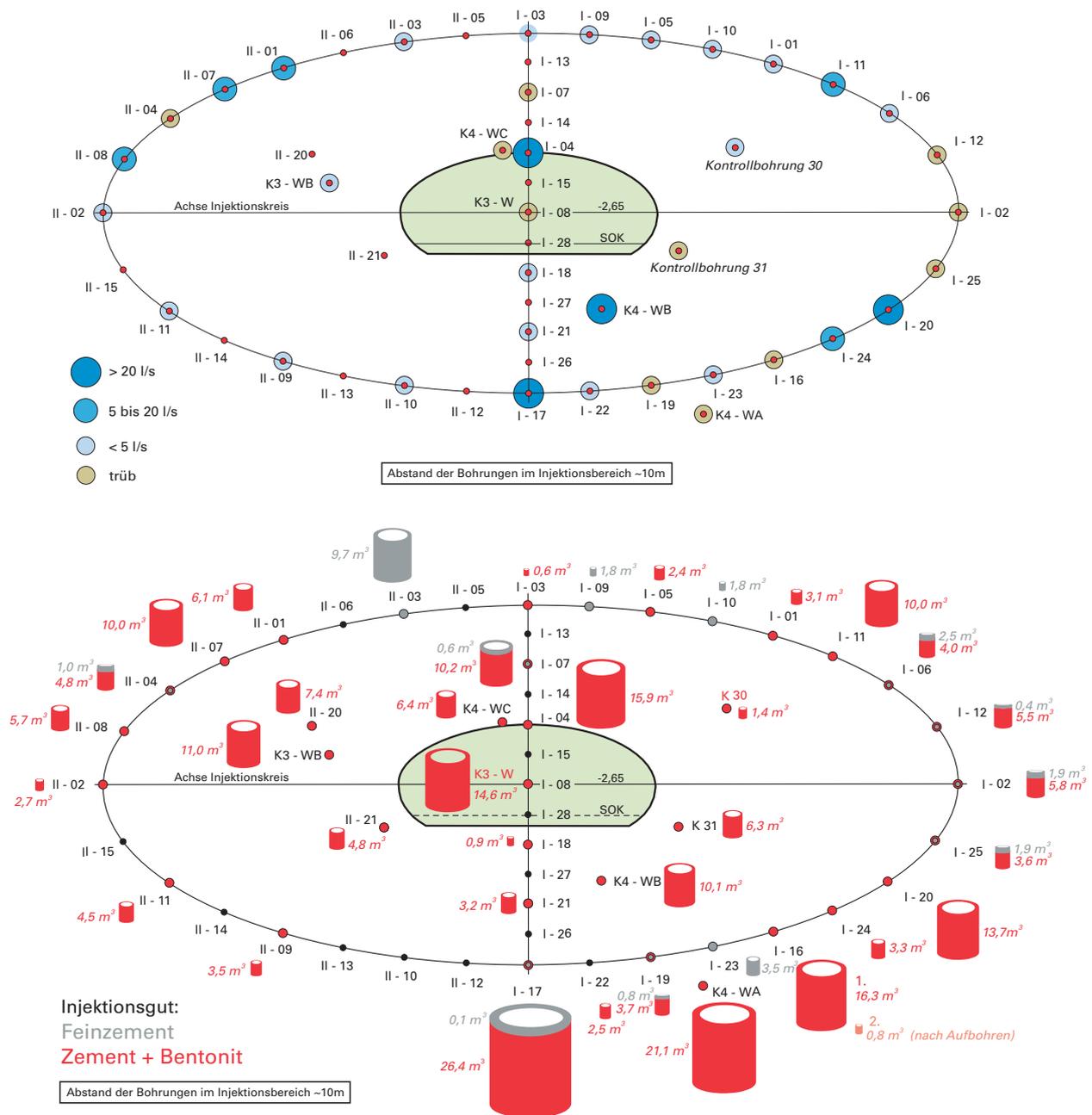


Fig. 8-7: Wasserführung (oben) und Injektionsmengen (unten) in der verkarsteten Überschiebungszone bei km 26 (Vertikalschnitt der Injektions-ebene).

dem Damm rieselte im Bereich der Firste zwischen den Schirmrohren hindurch. Erst nach ca. zwei Stunden gelang es, diesen Prozess mittels Spritzbeton zu stoppen. Unmittelbar neben dem östlichen, d.h. talseitigen Gleis entstand in der Folge ein Einsturztrichter von rund 1,5 m Breite und über 2 m Tiefe. Innert kürzester Zeit konnte der Trichter mit über 6 m<sup>3</sup> Beton verfüllt werden. Der Bahnverkehr musste wegen dieses Vorfalls lediglich für einige Stunden unterbrochen werden.

## 8.2 Abdichtungsinjektionen

### 8.2.1 Karst bei km 26

Mit der Vorauserkundungsbohrung ab km 25,940 in der Weströhre wurden bei Bohrmeter 130 etwa 501/s stark trübes Wasser angefahren. Entsprechend dem Vorauserkundungskonzept wurde eine zweite Kernbohrung durchgeführt, die den Befund der ersten bestätigte (Fig. 8-5). Daraufhin wurde entschieden, den Vortrieb an die Wasserführende Zone anzunähern und eine Detailerkundung zu machen. Aufgrund der Befunde in den drei zusätzlichen Bohrungen wurde beschlossen, diese Zone abzudichten.

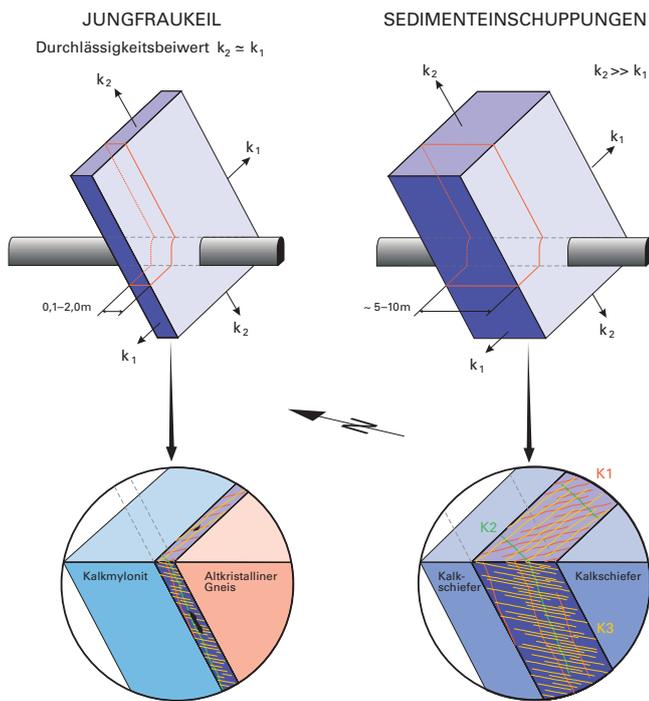


Fig. 8-8: Hydrogeologisches Modell Jungfrau keil/Sedimenteinschuppungen.

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass diese verkarstete Zone in Zusammenhang mit einer flach gegen NW einfallenden Überschiebung und steilstehenden Klüften des Kluftsystems K1 (NW-SE streichend) steht. Es handelt sich somit um eine Wasser führende «Störung» entlang der Grenze Öhrli-Kalk/Kieselkalk mit steil stehenden Klüften (Fig. 8-6); sie entspricht damit einem der prognostizierten hydrogeologischen Modelle. Insgesamt handelte es sich nicht um eine eigentliche Karströhre, sondern um ein Wasser führendes Netzwerk aus mehr oder weniger stark verkarsteten Kluft-, Schicht- und Überschiebungsf lächen. Die Wasserführung bzw. der stärker verkarstete Bereich beschränkte sich vorwiegend auf den westlichen Teil der Weströhre. In der Oströhre wurden keine grösseren Verkarstungen festgestellt.

Anschliessend an die Erkundung wurde sofort mit den ersten Injektionsbohrungen begonnen. Dabei mussten diese wegen dem ungünstigen Verschnitt der Wasser führenden und verkarsteten Störzone mit dem Tunnel in zwei Etappen ausgeführt werden (1. Etappe ab km 26,001 Weströhre und ab km 26,020 Oströhre, 2. Etappe ab km 26,038 Weströhre).

Die insgesamt 34 Bohrungen der ersten Etappen (23 Bohrungen aus der Weströhre, 11 Bohrungen aus der Oströhre) mit einer Gesamtlänge von 3784 Bohrmeter zeigten Wasserführungen von <11/s bis über 1001/s mit Geröllführung (Fig. 8-7 oben) und bestätigten das hydrogeologische Modell. Nach Abschluss der zweiten Etappe der Injektionsarbeiten (8 Bohrungen mit einer totalen Länge von 446 m) konnte diese Zone mit zusätzlichen, innerhalb des Injektionsschirmes liegenden Drainagebohrungen problemlos durchquert werden. Wie aus Figur 8-7 unten ersichtlich ist, wurden insgesamt rund 250 m<sup>3</sup> Zement mit

Bentonit und rund 30 m<sup>3</sup> Feinzement injiziert. Wie schon die Wasserführung variierten auch die Injektionsmengen je nach Bohrung sehr stark. Beim anschliessenden Vortrieb war nur im Bereich der Hauptstörung, wo diese in der Firste verlief, etwas Überprofil zu verzeichnen. In der Oströhre war die Wasserführung so gering, dass die Injektion der Erkundungsbohrung ausreichte, um diese Zone ohne Erschwernisse zu durchqueren.

## 8.2.2 Sedimenteinschuppungen / Jungfrau keil

Aufgrund der im Jungfrau keil und in den Sedimenteinschuppungen zu erwartenden Wasserzutritte waren weitergehende Vorabklärungen bezüglich Lage und Mächtigkeit der Wasser führenden Schichten notwendig. Da ein Zusammenhang dieser Wasserzutritte mit dem Thermalwasservorkommen von Leukerbad nicht definitiv ausgeschlossen werden konnte, wurde eine Drainagelimita festgelegt, mit einer maximal aus allen drei Tunnelröhren abzudrainierenden Wassermenge von 21/s. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Abdichtungsmassnahmen durchgeführt, an die wegen der speziellen Verhältnisse wie hoher Wasserdruck (~120 bar), hohe Temperatur (~40°C), hoher Sulfatgehalt des Wassers (~2 g/l) und kleine Kluftöffnungsweite (≤0,1 mm) grosse Anforderungen gestellt wurden. Nachfolgend werden diese Arbeiten am Beispiel der Abdichtungsarbeiten bei der Querung der Sedimenteinschuppungen im Zugangs- und Lüftungstollen (ZLS) kurz erläutert.

In einem ersten Schritt wurde mit einer ersten, rund 452 m langen, gekernten Horizontalbohrung die genaue Lage der Sedimenteinschuppungen sowie des Jungfrau keils auf Basistunnelniveau bestimmt. Danach wurde der Zugangstollen bis Sm 69 (rund 23 m vom Beginn der südlichen Sedimenteinschuppung) vorgetrieben und von dort aus eine weitere gekernte Horizontalbohrung (JFK2) erstellt, die es erlaubte, die Wasser führenden Zonen in den Sedimenteinschuppungen näher zu definieren (Fig. 8-8) und die Injektionsbohrungen entsprechend anzuordnen. Da der Bereich der Triasgesteine trocken war, konnte der Stollen vor Injektionsbeginn bis zum Sm 108 weiter vorgefahren werden.

Insgesamt wurden ab dem Sm 108 19 Bohrungen (923 Bohrmeter; jede Bohrung mit 20 m langem Standrohr, Fig. 8-9) erstellt und in diese total 23,5 m<sup>3</sup> Rheosil und Silisol injiziert. Zwei Bohrungen wurden als Kontrollbohrungen gekernt ausgeführt. In den einzelnen Injektionsringen wurden laufend Druck- und Schüttungsmessungen vorgenommen, um die einzelnen Injektionsphasen optimieren zu können.

Danach wurde der Stollen mit Abschlagslängen von 1,5 m und Presplitting rund 12 m weiter vorgetrieben und im Zentrum der Brust eine Kernbohrung mit Preventer ausgeführt. Anschliessend folgten drei zerstörende Bohrungen mit Preventer (12 Uhr, 4 Uhr und 8 Uhr) und siebzehn radiale zerstörende Bohrungen ohne Preventer (Total 534 Bohrmeter). Alle zerstörenden Bohrungen wurden in der Folge injiziert, wobei rund 30 m<sup>3</sup> Injektionsgut eingebracht wurde (Fig. 8-11). Die Bohrungen waren so angelegt, dass das Injektionsgut in einem Ring mit rund 20 m radialem

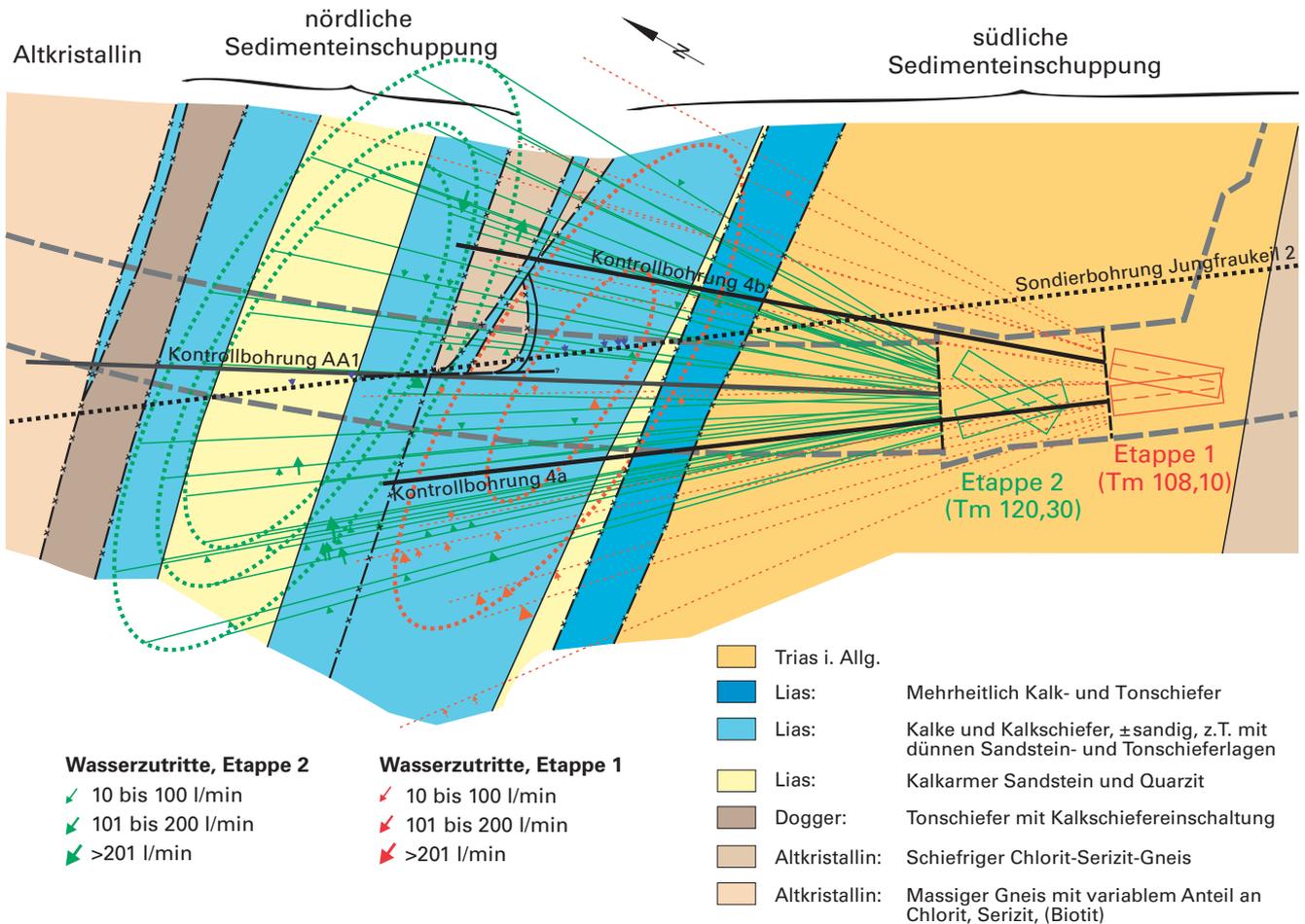


Fig. 8-9: Schema der Injektionsbohrungen der Etappen 1 und 2 im Zugangs- und Lüftungsstollen.

Abstand vom Tunnel eingebracht wurde. Als Nächstes wurde ein erster innerer Ring (Fig. 8-12) mit einem radialen Abstand von 15 m von der Wasser führenden Zone zur Stollenwand und 12 Bohrungen mit einer Gesamtlänge von 538 m gebohrt.

Nach erfolgten Injektionen (Injektionsmenge: 25,2 m<sup>3</sup>) wurde ein dritter, noch näher zum Tunnel liegender Injektionsring in einem Abstand von rund 10 m von der Stollenwand erstellt und injiziert. Dabei wurden neun Bohrungen ausgeführt (totale Bohrlänge: 411 m) und rund 5 m<sup>3</sup> injiziert. Zuletzt wurden im Stollenbereich vier destruktive Kontrollbohrungen mit einer totalen Länge von 128,6 m erstellt. Dabei zeigte sich, dass die Abdichtungsmassnahmen sehr wirkungsvoll waren, betrug doch die Gesamtschüttung aus allen vier Bohrungen nur noch 91/min. Daraufhin konnte der Vortrieb wieder aufgenommen werden. Dieser erfolgte im Bereich der Wasser führenden Zonen der Sedimenteinschuppung mit radialen Drainagebohrungen von je 4 m Länge.

Bei der Querung der Sedimenteinschuppungen mit den Basistunnelröhren sowie bei der Querung des eigentlichen Jungfrau keils wurde nach einem ähnlichen Schema vorgegangen. Um die Bohrarbeiten zu beschleunigen, wurde dabei eine spezielle Installation konstruiert, die es erlaubte, gleichzeitig mit zwei Bohrgeräten arbeiten zu können (Fig. 8-10). In Tabelle 8-1 sind die insgesamt ausgeführten Bohrungen und injizierten Mengen zusammengestellt.

Tab. 8-1: Zusammenstellung der Injektionen im Bereich der Sedimenteinschuppungen und des Jungfrau keils (ZLS = Zugangs- und Lüftungsstollen; BTW = Basistunnel West; BTO = Basistunnel Ost).

|                  |                | Injektionen Sedimentschuppungen |      |      |       |
|------------------|----------------|---------------------------------|------|------|-------|
|                  |                | ZLS                             | BTW  | BTO  | total |
| Anzahl Bohrungen | Stk.           | 51                              | 41   | 40   | 132   |
| Bohrlänge        | m              | 2406                            | 1795 | 1710 | 5911  |
| Injektionen      | m <sup>3</sup> | 81                              | 56   | 94   | 234   |
|                  |                | Injektionen Jungfrau keil       |      |      |       |
|                  |                | ZLS                             | BTW  | BTO  | total |
| Anzahl Bohrungen | Stk.           | –                               | 20   | 20   | 40    |
| Bohrlänge        | m              | –                               | 940  | 1076 | 2016  |
| Injektionen      | m <sup>3</sup> | –                               | –    | –    | 0     |



Fig. 8-10, oben: Doppelbohrinstallation im Basistunnel; unten: ausinjizierte Bohrungen (ZLS, Sm 108).

Die Situation bei der Querung des Jungfraukeils kann wie folgt beschrieben werden: Nach Erstellen der ersten Injektionsbohrungen wurde in beiden Basistunnelröhren mit Auslaufversuchen überprüft, ob eine Abdichtung erforderlich ist. In der Weströhre wurde ein rund zweiwöchiger Auslaufversuch durchgeführt. Dabei ging der Wasseranfall aus allen Bohrungen von anfänglich rund 110l/min auf rund 20l/min zurück, und in der Oströhre, die generell weniger Wasser führte, betrug der totale Wasseranfall beim Auslaufversuch nur rund 12l/min. Aufgrund der geringen Schüttung konnte daher auf eine Injektion verzichtet und der Jungfraukeil in beiden Basistunnelröhren im Schutz von Drainageringen durchörtert werden.

### 8.3 Querung des Karbons von Ferden

Von der Sondierbohrung Ferden und vom Bau des Fensterstollens her war die Karbonzone einigermaßen bekannt. Trotzdem bestanden noch immer erhebliche Unsicherheiten bezüglich ihrer Lage und Ausbildung auf Niveau des Basistunnels. Deshalb wurde sie durch eine rund 244 m lange horizontale Kernbohrung aus der Oströhre (ab km 38,329) erkundet. Die Bohrrichtung wurde so angelegt, dass die Querung des Karbons im Bereich der Weströhre erfolgte und somit die Begrenzungen des bau-

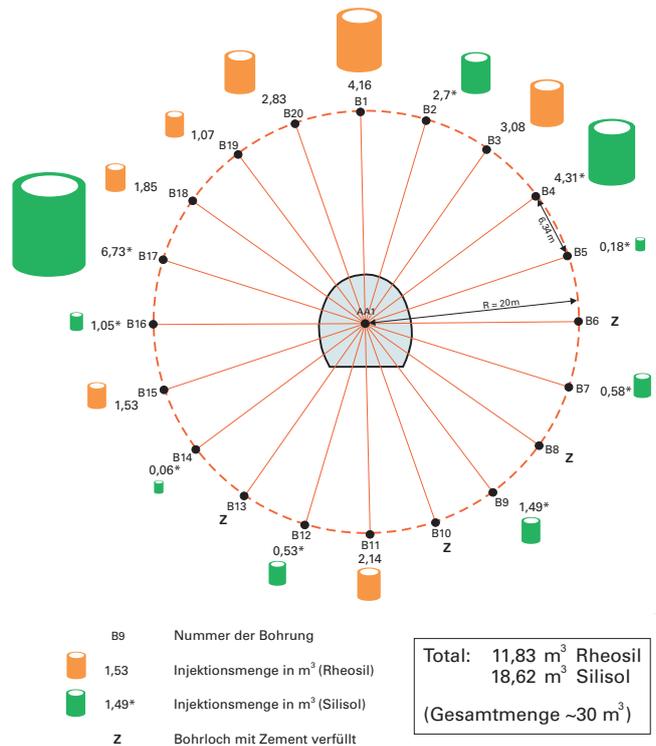


Fig. 8-11: ZLS, Etappe 2: Injektionsschema im ersten Ring.

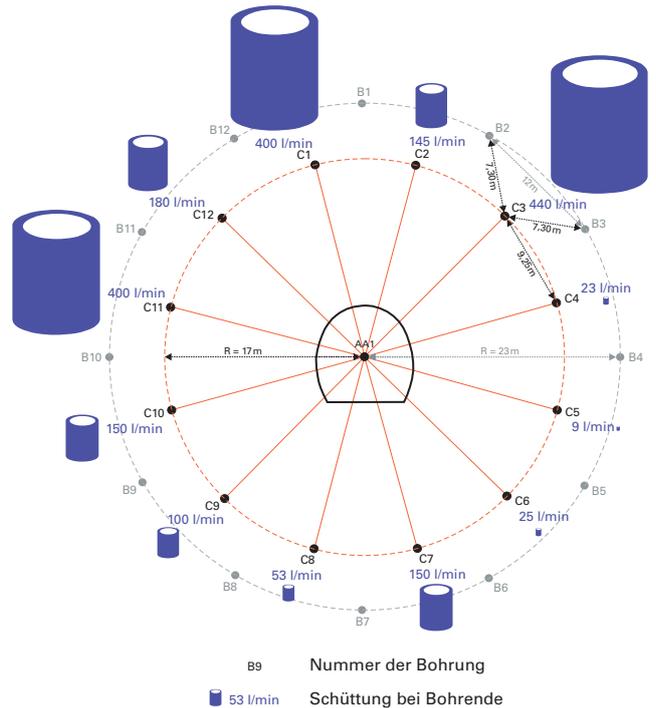


Fig. 8-12: ZLS, Etappe 2: Wasserführung im zweiten Ring.



Fig. 8-13, oben: Kontakt Altkristallin (links) / Karbon (rechts); unten: Durchörterung Karbon: Einbau des Sohlsprengrers.

technisch schwierigen Abschnitts in der vorausseilenden Röhre vorausgesagt werden konnten. Um den Beginn des Karbons auch in der Kalotte exakt voraussagen zu können, wurden in beiden Röhren jeweils rund 25 m vor Beginn des Karbons zwei zusätzliche 50 bzw. 40 m lange zerstörende Vorausbohrungen erstellt. Der Vortrieb erfolgte dann im Schutz eines 20 m langen Injektionsrohrschirmes als Kalottenvortrieb (Abschlagslänge = 1,50 m) mit Stahlausbau und Sohlsprengrer (Fig. 8-13).



Fig. 8-14, oben: Kalottenvortrieb bei km 48,480; unten: Stross- und Sohlenabbau bei km 48,481 (Oströhre).

#### 8.4 Querung der Phyllitzone Dornbach (Dornbach-Störung)

Der Aufbau der Dornbach-Störung war aufgrund der beim Fensterstollen Ferden gewonnenen Erkenntnisse in groben Zügen bekannt. Zur weiteren Abklärung wurde ab Ende der Nothaltestelle eine rund 300 m lange horizontale Kernbohrung in Richtung Süden ausgeführt, die es erlaubte, die beiden Äste der Dornbach-Störung sowohl bezüglich ihrer Lage als auch der Lithologie besser zu definieren.

In der vorausseilenden Weströhre konnte der Nordast mit Ankern und Spritzbeton mit Stahlfasern durchörtert werden. Die beiden den Beginn und das Ende des Nordastes der Dornbach-Störung markierenden, 1 m bzw. 0,5 m mächtigen Phyllite stellten bautechnisch kein Problem dar. Beim Südast hingegen erforderten die bautechnisch zum Teil schwierigen Gesteine einen Einbau mit Stahlbögen und Sohlsprengrern, und auf einer Strecke von fast 40 m musste auf Kalottenvortrieb umgestellt und zusätzlich ein Spiessschirm erstellt werden. Nach Querung dieser bautechnisch ungünstigsten Zone wurde der Vortrieb auf das Micro-Benching-Verfahren umgestellt. Die Abschlagslänge betrug 2–3 m, mit jeweils einer um einen Abschlag versetzten

Strosse. Die Sicherung bestand aus Spritzbeton mit Stahlfasern und Ankern. Damit konnten auch Zonen mit schlechterer Felsqualität (Schiefer mit phyllitischen Zwischenlagen und graphitischen Gleitflächen) meist problemlos durchörtert werden. Einzig an einer Stelle kam es am westlichen Parament zu einem kleineren Niederbruch von rund 5 m<sup>3</sup> Gesteinsmaterial.

In der Oströhre erfolgte die Durchörterung des Nord- und Südastes der Dornbach-Störung analog zum Westtunnel. Bis auf einen kleineren Niederbruch (ca. 4 m<sup>3</sup>) im Bereich des Nordastes verlief der Vortrieb ebenfalls problemlos.

## 8.5 Trias Raron

Aufgrund der Resultate der Sondierungen im Bereich der Trias des Autochthons Gampel-Baltschieder wurde gefolgert, dass eine Querung der Trias mit einer TBM nicht möglich sei. Deshalb wurde beschlossen, einen Pilotstollen in den Bereich der Trias vorzutreiben und von dort aus die

Oströhre durch die Trias hindurch konventionell aufzufahren. Diese knapp 170 m messende Tunnelstrecke wurde vor Ankunft der TBM erstellt; anschliessend wurden die TBM durch die Trias hindurchgezogen (SEINGRE 2006).

Das Portal des Pilotstollens befindet sich rund 120 m westlich des Westportals des Basistunnels. Von dort aus wurde zuerst die Strasse nach St. German bergmännisch unterquert und anschliessend bei km 48,970 die Weströhre erreicht. Von dort bis zum direkt südlich der Trias gelegenen Querschlag verläuft der Pilotstollen in der Weströhre, so dass beim nachfolgenden Sprengvortrieb der Weströhre diese Strecke nur noch aufgeweitet werden musste. Beim oben erwähnten Querschlag führte der Pilotstollen rund 10 m vor der Trias in die Oströhre, wo für die folgenden Ausbrucharbeiten eine zusätzliche Installationsnische ausgebrochen wurde.

Der Ausbruch erfolgte im Kalottenvortrieb mit Stahleinbau und nachträglichem Strossenabbau (Fig. 8-14). Für Details sei auf SEINGRE (2006) verwiesen. Wie die Erfahrungen beim konventionellen Ausbruch zeigten, war der Entscheid, die Trias nicht mit der TBM aufzufahren, sicher richtig.

## 9. Besondere Vorkommnisse

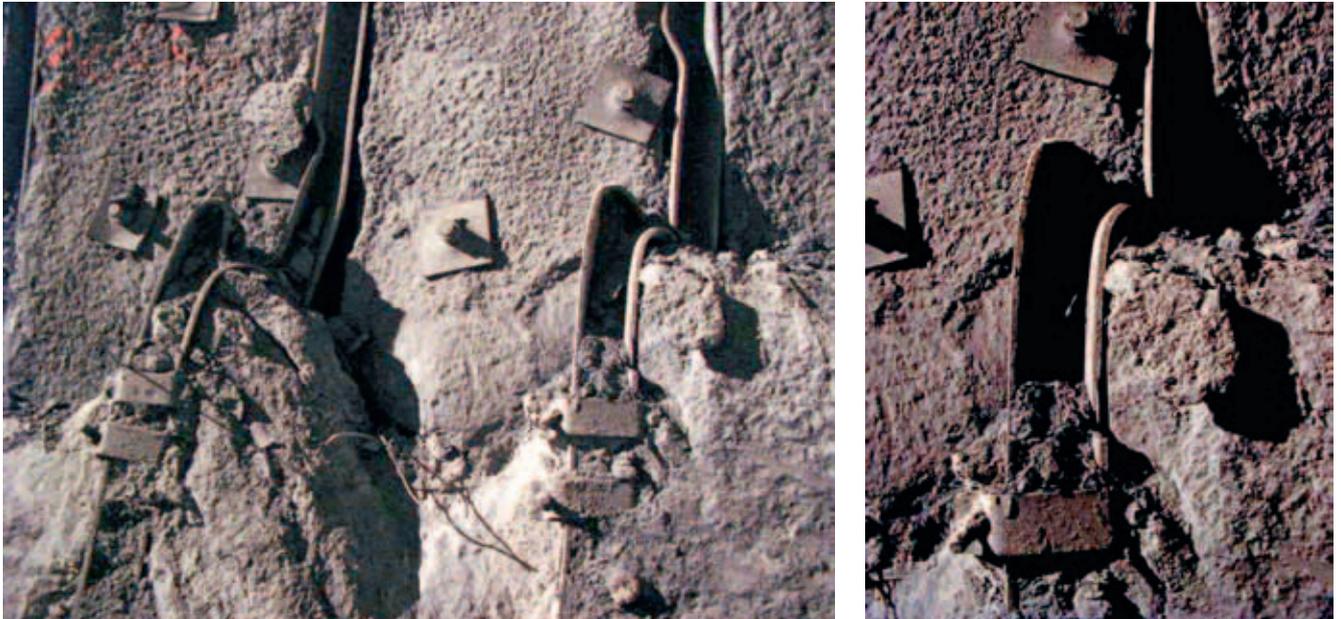


Fig. 9-1: Schäden an den Sicherungen im Karbon.

### 9.1 Karbontrog nördlich des Gastern-Granits

Die grösste Überraschung des gesamten Vortriebes kündigte sich am 1. Dezember 2003 in der Kalotte des Westvortriebes an, wo auf rot gefärbtem Kristallin Trias-Quarzit zum Vorschein kam. Nach Querung der Trias, die eindeutig weniger tektonisch beansprucht worden war als jene auf der Nordseite des Lauterbrunnen-Kristallins, und des Doggers wurde eine gut 500 m lange Permokarbon-Strecke angetroffen. Zunächst verlief der Vortrieb weiterhin mehr oder weniger problemlos. Erst mitten in den Kohleflöze führenden Schichten erfolgte beim Durchschlag der Querverbindung 48 (km 30,338) ein Niederbruch, der sich mit Spritzbetonabplatzungen und Rissen in beiden Tunnelröhren bis zur Ortsbrust fortpflanzte, was umfangreiche Sanierungsmassnahmen zur Folge hatte.

Von da an erwies sich die Karbonstrecke mit ihren stark deformierten, Anthrazit führenden Phylliten als äusserst druckhaft und machte aufwendige Sicherungsmassnahmen mit teleskopierbaren TH-Stahlringen, Stauelementen und langen Injektionsankern erforderlich. Trotz dieser Massnahmen traten teilweise erneut Schäden auf (Fig. 9-1), und die Sicherung musste lokal mehrmals mit zusätzlichen und längeren Ankern (bis 16 m) verstärkt und der zerrissene Spritzbeton erneuert werden.

Aus praktischer Sicht war die Aufhängung der Nachläuferinstallation in den druckhaften Bereichen besonders problematisch, weil im Nachläuferbereich Reparaturarbeiten am Gewölbe wegen der beschränkten Zugänglichkeit kaum möglich waren und weil herunterfallende Gunitplatten die Installationen zu beschädigen drohten. In der Karbonstrecke musste die Ortsbrust zudem meist zusätzlich mit 4 bis 16 GFK-Ankern gesichert werden.

In den weniger stark deformierten, eher siltigen Partien der Karbonstrecke wurden zahlreiche Pflanzenabdrücke gefunden (Kap. 11). Die Flora erlaubte eine Datierung als Spätes Karbon (Westphalien B [international: Grenzbereich Moscovien/Kasimovien]).

### 9.2 Setzungen St. German

In Bezug auf die Auswirkung der Tunneln auf die Drainage des Bergwassers waren keine Überraschungen zu verzeichnen. Wie erwartet, wurde die Quelle «Am Bach» in St. German abdrainiert, worauf sie trockenfiel. Die danach einsetzende grössere Absenkung des Geländes und die damit verbundenen Schäden an zahlreichen Bauwerken wurden hingegen nicht erwartet. Besonders stark wirkte sich die Entwässerung auf lokal auftretende, in mehreren Metern





Bei der Abklärung der Ursachen wurde auch festgestellt, dass sich die ganze Bergsturzmasse seit langer Zeit vor Ausbruch des Lötschberg-Basistunnels in Bewegung befand. Auf Grund von detaillierten digitalen photogrammetrischen Auswertungen von Orthophotos aus den Jahren 1981, 1991, 1999 und 2002 konnten Bewegungsraten von 1 bis 5 cm pro Jahr nachgewiesen werden. Es ist denkbar, dass durch die Absenkung des Wasserspiegels diese Bewegungen nun etwas verlangsamt werden.

Wie schon erwähnt, wurde das Abdrainieren der Quelle «Am Bach» erwartet. Deshalb wurden schon lange vor Baubeginn mit der Eigentümerin dieser Quelle, der Gemeinde Raron, Lösungen für die Ersatzwasserbeschaffung studiert. Da für die Gemeinde eine Grundwasserfassung im Rhone-

tal nicht in Frage kam, wurde im Basistunnel bei km 46,5 eine trinkwasserkonforme Wasserfassung im Malm-Karst erstellt (Kap. 4.3). Dieses Wasser war während des Vortriebs mit einer Vorausbohrung erschlossen worden. Leider stellte sich nach einiger Zeit heraus, dass dieses Wasser zeitweise nach wie vor – zwar von blossem Auge nicht sichtbar – trüb war. Zudem war dieses Wasser chemisch nicht genau gleich wie das abdrainierte aus dem Lias-Karst, so dass im Leitungsnetz der Gemeinde vermehrt Korrosionsprobleme auftraten. Aus diesen Gründen wurde Ende 2008 neben dem Reservoir der Gemeinde in St. German eine 150 m tiefe Brunnenbohrung abgeteuft, die das Wasser aus dem weiter westlich gelegenen Teil des Liaskalk-Aquifers bezieht.

## 10. Erfahrungen

### 10.1 Allgemein

Im Folgenden werden einige generelle Erfahrungen erwähnt. Anschliessend wird etwas ausführlicher auf die beiden Vortriebsarten eingegangen.

- Die teilweise grosse Überlagerung hat sich vor allem in bautechnisch ungünstigeren Gesteinen ausgewirkt. Dabei hat sich auch gezeigt, dass selbst die massivsten Einbauten die vorhandenen Kräfte nicht übernehmen können. In solchen Bereichen sind Deformationen ganz bewusst zuzulassen, aber zu kontrollieren.
- Als sehr wichtiger Faktor für das Gebirgsverhalten haben sich erwartungsgemäss die Lage (bezüglich des Bauwerks) und die Ausbildung der bestimmenden Strukturen (Schieferungs-, Kluftflächen usw.) erwiesen. So haben sich zum Beispiel die Schieferzonen im Abschnitt Ferden im Basistunnel, wo sie mehr oder weniger senkrecht gequert wurden, überhaupt nicht ausgewirkt. In den Logistikkavernen und im knapp über dem Basistunnel liegenden Abluftsystem, wo sie mehr oder weniger parallel zum Bauwerk verlaufen, führten die genau gleichen Zonen dagegen zu massiven Deformationen und erforderten mehrmalige aufwendige Sanierungen.
- Im Vergleich zur Tektonik spielt die Lithologie nur eine untergeordnete Rolle. So traten in Sandsteinen, Kalken oder Gneisen, wenn überhaupt, die gleichen Probleme auf. Einzig bei der Beurteilung der Abrasivität (Quarzgehalt) ist sie – neben anderen Faktoren – nicht zu vernachlässigen.
- Einmal mehr hat sich die alte Weisheit bestätigt, dass das Gebirgsverhalten auch von der Vortriebsgeschwindigkeit beeinflusst wird. So traten in den flach liegenden Sedimenten auf der Nordseite dank den guten Vortriebsleistungen wesentlich weniger Probleme auf, als sie aufgrund der Lagerung hatten erwartet werden müssen.
- Das ausgeführte Vorauserkundungskonzept mit zerstörenden Bohrungen und Kernbohrungen hat sich bewährt. Die Anzahl überraschender Ereignisse konnte so stark reduziert werden. Dabei hat sich auch klar gezeigt, dass es für die Ausführung der Bohrungen und Tests mit solchen Arbeiten erfahrene Spezialisten braucht.
- Nach wie vor dürfte die Wasserprognose wohl einer der schwierigsten Teile einer geologischen Tunnelprognose sein. Der Grund liegt unter anderem darin, dass singuläre Ereignisse, wie zum Beispiel das Anfahren einer einzelnen, viel Wasser führenden Kluft, nicht prognostiziert werden können.
- Ähnlich verhält es sich mit der Prognostizierbarkeit von Karst. Obwohl die lithologischen Einheiten, in denen

Verkarstungen generell auftreten können, bekannt sind, ist es nach wie vor nicht möglich, das effektive Vorhandensein und die genaue Lokalisierung von Karst zu prognostizieren.

- Mit einer relativ einfachen Temperaturprognose mit einigen Messresultaten aus Sondierbohrungen und bestehenden Bauwerken kann für die Temperatur zurzeit eine mindestens gleichwertige Prognosegenauigkeit erreicht werden wie mit einer aufwendigen und kostenintensiven Modellierung.
- Rückblickend kann festgehalten werden, dass sich der Aufwand für die seinerzeitigen Erkundungen mit Sicherheit gelohnt hat. Insbesondere sind der Bau des Sondierstollens Kandertal sowie die Tiefbohrungen, die auf die als bautechnisch relevant eingeschätzten Zonen abgeteuft wurden, sicher zweckmässig gewesen. Dies zeigt sich schon nur daran, dass die geologische Prognose relativ gut mit dem Befund übereinstimmt und dass nur wenige so genannte unerwartete Ereignisse, die immer einen erheblichen Zeit- und Kostenbedarf zur Folge haben, eintraten.

### 10.2 Sprengvortrieb

Bezogen auf die vollständig erstellte Oströhre wurden etwa 70% des Lötschberg-Basistunnels im konventionellen Sprengvortrieb ausgebrochen. Davon entfallen knapp zwei Drittel auf Ausbruchstrecken in Sedimentgesteinen, der Rest auf Kristallingestein. Die Abschlagslängen variierten zwischen 1 m und 5,5 m. Die Sicherungsmittel wurden jeweils nach jedem Abschlag versetzt. Sie bestanden im einfachsten Fall aus Ankern und Netz in der Kalotte und reichten in kurzen, bautechnisch schwierigen Strecken bis zum Einbau von (z.T. deformierbaren) Stahlbögen und allenfalls einer zusätzlichen Unterteilung des Ausbruchquerschnittes. Es ist klar, dass die Ankeranzahl und -längen sowie die Spritzbetonstärken den jeweiligen lokalen Verhältnissen angepasst wurden.

In Tabelle 10-1 sind die in der Oströhre eingesetzten Sicherungsmassnahmen zusammengefasst. Dabei fällt auf, dass in den Sedimentgesteinen vorwiegend Anker, Netz und Spritzbeton eingesetzt wurden, während in den Kristallingesteinen der grösste Teil nur mit Anker und Netz gesichert werden konnte. Dieser markante Unterschied ist aber nicht auf die Gesteinsart, sondern auf die Raumlage der wichtigsten Strukturen zurückzuführen: In den Sedimenten lagen die dominanten Strukturen, die Schicht- und Schieferungsflächen, vorwiegend flach und führten so zu Ablösungen in der Kalotte, was mit der aufgebrachten

Tab. 10-1: Zusammenstellung der Sicherungsmassnahmen im Sprengvortrieb (SPV) der Oströhre (in % der Streckenlänge).

| Oströhre              | Anker + Netz<br>% | Anker,<br>Netz + Spritzbeton<br>% | Stahlbögen (starr<br>und deformierbar)<br>% | Teilausbruch<br>% | Nachträglicher<br>Einbau Sohlgewölbe<br>% |
|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|---|-------------------|---|
| <b>Sprengvortrieb</b> |                   |                                   |   |                   |   |
| Sedimente             | 20                | 75                                | 4   | 1                 | 33  |
| Kristallin            | 75                | 23                                | 1   | 1                 | 0   |
| <b>Total SPV</b>      | <b>42</b>         | <b>54</b>                         | <b>3</b>                                    | <b>1</b>          | <b>20</b>                                 |

Tab. 10-2: Zusammenstellung der Sicherungsmassnahmen im TBM-Vortrieb der Oströhre (L1\* = Arbeitsbereich direkt hinter dem Bohrkopf; in % der Streckenlänge).

| Oströhre            | Anker + Netz<br>% | Anker,<br>Netz + Spritzbeton<br>im L1*<br>% | Anker,<br>Netz + Firstkappe<br>% | Anker, Netz,<br>Firstkappe + Spritzbeton<br>im L1*<br>% | Stahlbögen<br>(starr)<br>% |
|---------------------|-------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------|
| <b>TBM-Vortrieb</b> |                   |   |                                  |   |                            |
| Sedimente           | 54                | 0   | 20                               | 21  | 5                          |
| Kristallin          | 32,3              | 3   | 64,4                             | 0,3   | 0                          |
| <b>Total TBM</b>    | <b>37</b>         | <b>2</b>                                    | <b>55</b>                        | <b>5</b>  | <b>1</b>                   |

Spritzbetonschicht verhindert werden konnte. Im Kristallin dagegen waren die wichtigsten Strukturen (Kluft- und Schieferungsflächen) vorwiegend steilstehend, was die Gefahr der Ablösung von Platten stark reduziert.

In den schiefrigen Lithologien (Palfris-Schiefer, Flysch-schiefer) wurde wegen der geringen, aber lang anhaltenden Deformationen als Folge des Auflockerungsdruckes nachträglich, d.h. vor Erstellung der Innenschale, ein Sohlgewölbe eingebaut.

Neben den oben aufgeführten Sicherungsmassnahmen an der Tunnellaubung mussten bei grösseren Überlagerungen (>1000 m) und der rund 9 m hohen Ortsbrust im Bereich von steilstehenden Kluft- und Schieferungsflächen Sicherungsmassnahmen auch an der Ortsbrust gemacht werden. Diese bestanden normalerweise aus einer Brustankerung und/oder einem teilweisen bis ganzen Einspritzen der Ortsbrust mit Spritzbeton. Je nach Unternehmer wurden für die Brustankerung entweder normale Swellex-Anker oder GFK-Anker verwendet. Bei beiden Ankertypen ergaben sich etwa die gleichen Probleme bei der Materialabförderung (Aufschlitzen des Förderbandes, Verklemmer bei Übergabestellen), wobei aber die metallischen Swellex-Anker mit Metalldetektoren einfacher aussortiert werden konnten.

Auf den Einbau des speziell für die Sicherung bei erhöhtem Bergschlagrisiko vorgesehenen «Hühnergitters» (Maschendrahtnetz) wurde verzichtet, da sich in der Versuchsstrecke zeigte, dass diese Sicherung nicht zweckmässig war. Der Grund lag darin, dass das Aufbringen von Spritzbeton bei montiertem Netz wegen des stark erhöhten Rückpralls kaum möglich war. Auch wären für die Gittermontage die Mineure für eine zu lange Zeit im ungeschützten Be-

reich am Arbeiten gewesen. Es zeigte sich, dass die Verkürzung des Rasters für die Reibrohranker von 1,5 auf 1 m die zweckmässigere Methode war, dem Bergschlagrisiko zu begegnen.

Im Weiteren hat sich gezeigt, dass grössere Abschlagslängen, wie sie in Ferden gemacht wurden, kaum zu einer Erhöhung der Vortriebsleistung führen. Dagegen haben sie aber mit Sicherheit grössere Überprofile zur Folge, die je nach Innenausbau anschliessend wieder mit Beton verfüllt werden müssen.

Grundsätzlich haben sich beim Ausbruch des Löttschberg-Basistunnels die ausgeführten Sprengvortriebe bewährt. Insbesondere erlaubten die nachziehbaren Hängebühnen für die ganzen Vortriebsinstallationen auch in den relativ schmalen und dafür hohen Ausbruchsprofilen, wie sie für Bahntunnel typisch sind, ein reibungsloses Arbeiten.

Trotz der deutlich geringeren Vortriebsleistungen (rund 4 m/Tag in Ferden und gut 5,5 m/Tag in Mitholz; gemittelt, inkl. Ferien und technischen Unterbrüchen) kann beim Vorliegen von speziellen geologischen Verhältnissen, wie zum Beispiel in verkarsteten Zonen oder bei grösseren Störungszonen, bei längeren Tunnels wohl auch weiterhin nicht auf Sprengvortrieb verzichtet werden.

### 10.3 TBM-Vortrieb

Der Fensterstollen Steg sowie die Weströhre zwischen der Verzweigung Löttschen und Ferden und die Oströhre zwischen Raron und Ferden wurden mit je einer TBM mit Durchmesser 9,40 m ausgebrochen. Auf gut  $\frac{3}{4}$  der TBM-

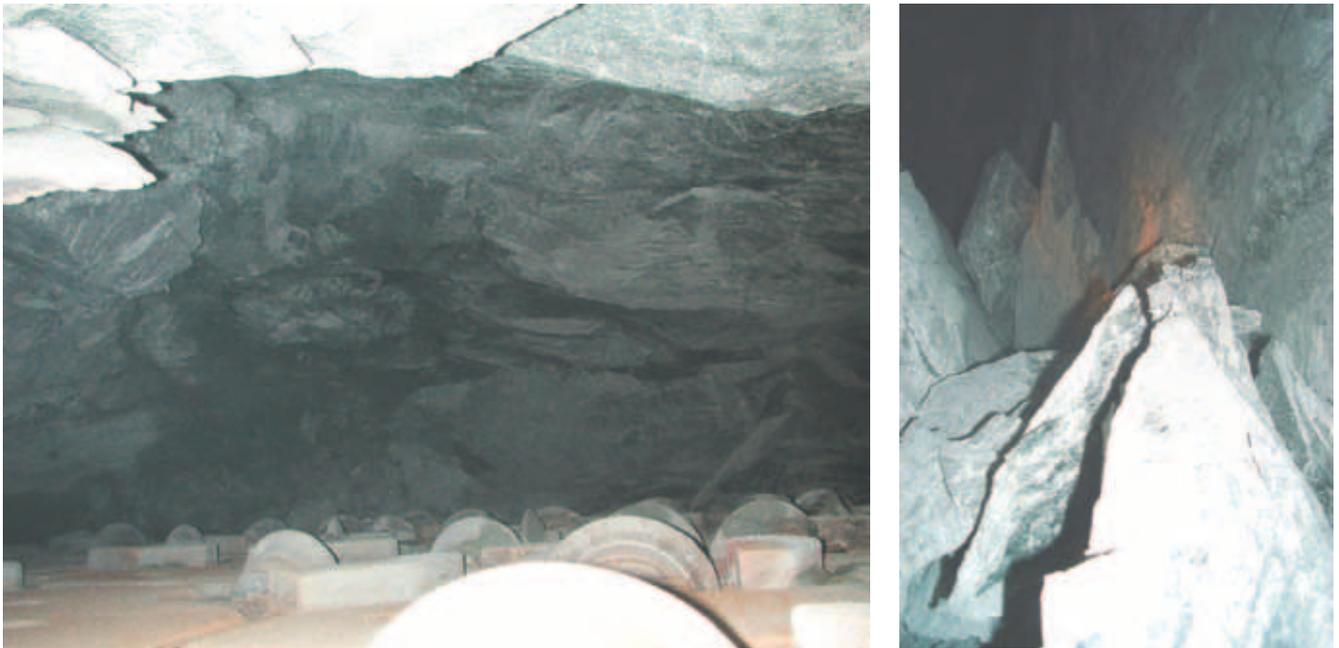


Fig. 10-1: Blockbildung in der Ortsbrust.

Strecke wurden Kristallingesteine, auf der restlichen Strecke Sedimentgesteine durchquert. Für die Felssicherung wurden unmittelbar hinter dem Bohrkopf in der Kalotte Netze versetzt, welche mit Swellex-Ankern und zum Teil zusätzlich mit Teilbögen (Firstkappen) befestigt wurden. Spritzbeton wurde mit Ausnahme von einigen kurzen Strecken in gestörten Bereichen nie direkt hinter dem Bohrkopf (L1\*), sondern erst im Nachläuferbereich (L2\*) aufgebracht. Grundsätzlich erwies sich der Fels der aufgefahrenen TBM-Strecke auch längerfristig als standfest.

Die eingesetzten Sicherungen in der Oströhre sind aus der Tabelle 10-2 ersichtlich. Auffallend ist dabei, dass das Aufbringen von Spritzbeton im L1\* vorwiegend und das Versetzen von Stahlbögen ausschliesslich in Sedimentgesteinsabschnitten notwendig war. Dies dürfte seine Ursache darin haben, dass im Kristallin in den bautechnisch eher ungünstigeren Gesteinen (kristalline Schiefer und verschieferte Gneise) die Raumlage der Haupttrennflächen (= Schieferung) sehr günstig zum Tunnel verlief. Dagegen dürfte der vermehrte Einsatz von Firstkappen im Kristallin wohl auch aufgrund eines besseren Sicherheitsgefühls bei den grossen Überlagerungen und auf eine gewisse Industrialisierung der Vortriebsarbeiten zurückzuführen sein.

Besondere Vorkommnisse, welche für die Durchführung und den Terminplan von grösserer Bedeutung waren und in der Prognose nicht erwähnt worden waren, sind in keiner Tunnelröhre aufgetreten. Überraschend waren einzig die instabilen Verhältnisse in den Lias-Kalken. Bogeneinbauten waren eher in den «Aalénien-Schiefen» erwartet worden (s. unten). Daneben führten auch die Blockbildungen vor dem Bohrkopf in massigen Gesteinen bei grösseren Überlagerungen zu gewissen Erschwernissen beim Vortrieb (Kap. 10.4).

Der Lias-Kalk des Autochthons Gampel-Baltschieder wurde von Raron aus in der Oströhre mit einer TBM und

in der Weströhre konventionell aufgefahren. Der Vortrieb in den beiden Röhren erfolgte bei absolut gleichen lithologischen Verhältnissen und gleichen Gebirgseigenschaften. Trotzdem wurde ein stark unterschiedliches Gebirgsverhalten festgestellt: In der Oströhre war das Gebirge stark nachbrüchig, in der Weströhre dagegen standfest.

Eine Erklärung für dieses unterschiedliche Gebirgsverhalten dürfte vermutlich darin liegen, dass die freie Stützweite im Sprengvortrieb mit Abschlagslängen von rund 3,5m und sofortiger Sicherung ausreichte, um das Niederbrechen von Kluftkörpern zu verhindern. Im TBM-Vortrieb war dagegen die freie Stützweite mit etwa 5m deutlich grösser (erste Sicherung erst hinter dem Bohrkopf möglich) und für dieses Gebirge vermutlich zumindest teilweise zu gross. Deshalb entstand eine deutliche Auflockerung, und grössere Partien konnten sich beim Vortrieb auf die TBM absetzen, was aufwendige Sicherungsmassnahmen (Einbau von Stahlbögen, zusätzliche Ankerungen) notwendig machte. Da die Gripper der TBM sich auf die Stahlbögen abstützten, waren Deformationen der Profile nicht zu vermeiden, so dass die ganze Strecke später aufwendig saniert werden musste.

Aus geologischer Sicht ist rückblickend festzuhalten, dass sich die eingesetzten offenen Hartgestein-TBM mit einem möglichst kurzen Bohrkopf bewährt haben. Die angetroffenen Gebirgsverhältnisse konnten im Grossen und Ganzen relativ problemlos gemeistert werden. Die erzielten mittleren Vortriebsleistungen übertrafen mit rund 12 m/Tag (über alles gemittelt, inkl. Ferien und technischen Unterbrüchen) die Erwartungen. Bestätigt hat sich auch, dass eine Vorauserkundung mit Kernbohrungen in einem TBM-Vortrieb aus Kosten- und Zeitgründen nicht realistisch ist. Als wenigstens teilweiser Ersatz von Kernbohrungen hat sich der Einsatz eines Bohrlochscanners in Kombination mit zerstörenden Bohrungen bewährt.

## 10.4 Blockbildung in der Brust im TBM-Vortrieb

In den TBM-Vortrieben in Richtung Norden ab Steg bzw. Raron traten ab einer Überlagerung von etwa 1400 m im Zentralen Aare-Granit und den nördlich anschliessenden granitischen Gneisen (Schollengneise) Blockbildungen in der Ortsbrust auf (Fig. 10-1). Auch im weiter nördlich folgenden restlichen mit der TBM aufgefahrenen Altkristallin trat dieses Phänomen mehr oder weniger ausgeprägt auf. Wegen der in diesen Bereichen etwas stärker ausgeprägten Schieferung handelte es sich aber eher um Ausbrüche von Platten und weniger um solche von Blöcken.

Die Ursache der Blockbildungen liegt einerseits in den als Folge der Überlagerung vorhandenen Spannungsverhältnissen (s. Kap. 5.4). KAISER (2006) stellt einige Erläuterungen und Berechnungen zu diesem Phänomen vor. Es gilt aber auch zu berücksichtigen, dass durch die Lage von Schieferung und Foliation ( $\pm$  senkrecht zum Tunnel streichend und steil gegen den Vortrieb einfallend) das Ausknicken von Platten mit der vorhandenen Belastung auch in gutem Fels «normal» ist (EINSTEIN 2006).

Die Blockbildungen in der Ortsbrust führten zu einer deutlichen Abnahme der Vortriebsleistung, da die TBM für die Verkleinerung dieser Blöcke stellenweise mehr als

«Brecher» denn als «Bohrer» arbeiten musste. Durch aufprallende und herunterfallende Blöcke traten sehr viele so genannte Gewaltschäden an den Bohrmeisseln und Räumern auf (Abschlagen von Meisselteilen und Räumern, Blockierung der Meissel durch Lagerschäden usw.). Dies führte zu einem sehr stark erhöhten Unterhalt (im Extremfall betrug die Meisselstandzeit noch einen Bohrmeter) und einem entsprechend höheren Zeitbedarf für diesen. Hinzu kam, dass durch die mitdrehenden Blöcke die aussenliegende Bohrkopfbedüsung zerstört wurde und deshalb extrem hohe Temperaturen im Bohrkopf auftraten (bis gegen 200°C). Dies führte zu zusätzlichen Wartezeiten, da der Bohrkopf zuerst abgekühlt werden musste, bevor überhaupt mit dem Unterhalt begonnen werden konnte. Durch Modifikationen am Bohrkopf und den Bohrwerkzeugen konnte das Auftreten der Blockbildung zumindest im nachfolgenden Vortrieb von Raron in Richtung Ferden etwas reduziert werden.

Es ist aber darauf hinzuweisen, dass in jenen Abschnitten, wo kaum Blockbildungen auftraten, d.h. vor allem in den feinkörnigeren Bereichen des Zentralen Aare-Granits und den feinkörnigen granitischen Gneisen, die Penetration teilweise gegen Null tendierte. Deshalb kann man auch sagen, dass dank der Blockbildung überhaupt noch einigermaßen Vortrieb erzielt werden konnte.

## 11. Mineral- und Fossilfunde

Die mit dem Lötschberg-Basistunnel durchquerten Gesteinseinheiten lieferten nur wenige Makrofossilien. Auch die Anzahl der Mineralfunde war relativ bescheiden, die Reichhaltigkeit und Formenvielfalt aber beachtlich (Fig. 11-2).

Bei den Fossilfunden sind vor allem die prachtvollen versteinerten Pflanzen (Farne, Schachtelhalme) aus dem Karbon der Nordseite (Fig. 11-1; BROUSMICHE DELCAMBRE & MENKFELD-GFELLER 2007) sowie stark deformierte Korallen im obersten Teil des Quinten-Kalks der Doldenhorn-Decke zu erwähnen.

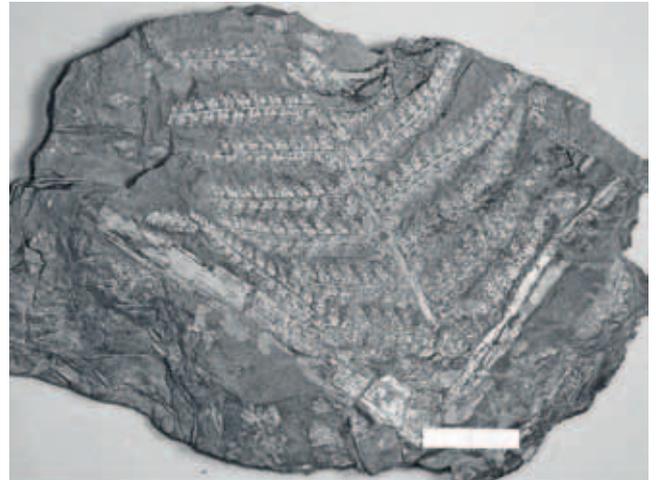
An Mineralien wurden im Flysch und in der Taveyanaz-Serie verschiedentlich Zeolithe und in den Karbonatgesteinen Calcit als Kluftfüllung angetroffen. Besonders erwähnenswert sind zwei ca. 30 cm grosse und weniger als 1 cm dicke klare, scheibenförmige Calcitkristalle aus dem Autochthon Gampel-Baltschieder der Südseite (HENZEN 2004). Lokal wurden in den Sedimenten zudem Ankerit, Apophyllit, Baryt, Coelestin, Dolomit und Erz (Pyrit, Bleiglanz) gefunden.

In den Graniten und kristallinen Gneisen wurde in kleineren und grösseren Klüften Quarz, Adular, Klinochlorit, Albit, Fluorit, Fluorapatit, Fluorapophyllit, Chabasit, Epidot, Titanit, Rutil sowie Pyrit, Chalkopyrit, Pyrrhotin und Zinkblende festgestellt (ANSERMET 2005). Im Baltschieder-Granodiorit wurde ausserdem an mehreren Stellen Molybdänglanz beobachtet (RÜEGG 2008), der im 2. Weltkrieg am Alpjahorn im Baltschiederthal bergmännisch abgebaut wurde. Innerhalb der Amphibolite und Amphibol führenden Gneise traf man erwartungsgemäss auf Asbest (Amiant) führende Klüfte. Da die Asbestfasern krebsfördernd sind, mussten beim Vortrieb in diesen Gesteinen umfangreiche Spezialmassnahmen (Kap. 6.4) getroffen werden.

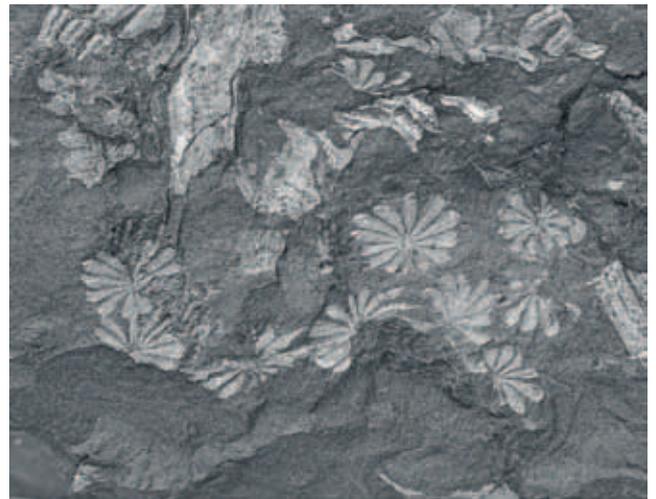
Der wohl aufsehenerregendste Fund bildete ein tafeliger Einzelkristall («Schwimmer») von Pyrrhotin (Fig. 11-3), der einen Durchmesser von 12,7 cm aufweist und aus einer mit Chloritsand gefüllten Kluft geborgen wurde. Er dürfte den zweitgrössten je in der Schweiz gefundenen Pyrrhotin darstellen (HENZEN 2004).

Pyrrhotin liess sich schon während des Vortriebs lokalisieren. Die Metallsensoren im TBM-Kopf reagierten nämlich auf diese Vererzungen und lösten so mehrere TBM-Stillstände aus.

Ein einige cm mächtiger Erzgang mit Bleiglanz wurde bei km 40,633 auf der westlichen Seite des Tunnels Ost angetroffen. Die Zugehörigkeit dieser Vererzung zur Bleiglanz-Lagerstätte beim Bahnhof Goppenstein bleibt aber fraglich.



*Dicksonites pluckenetii*



*Annularia sphenophylloides*

Fig. 11-1: Pflanzenfunde (Farn, Schachtelhalm) aus dem Karbon nördlich des Gastern-Granits.



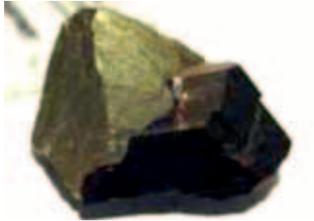
1



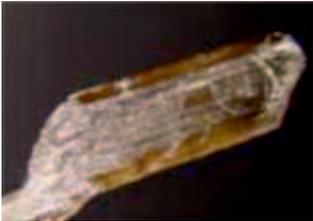
2



3



4



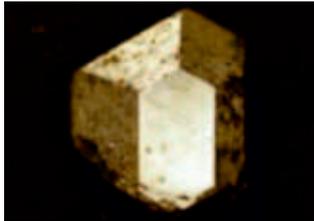
5



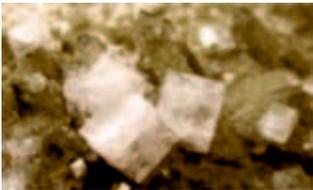
6



7



8



9



10

Fig. 11-2: Beispiele von Mineralien aus dem Lötshberg-Basistunnel:  
1 Adular; 2 Apophyllitkristalle auf Bergkristall; 3 Calcitafel mit Pyritwürfelchen; 4 Chalkopyrit (Kupferkies) mit Pyrrhotin (Magnetkies); 5 Epidot; 6 Fluorit; 7 Pyrit; 8 Pyrrhotin (Magnetkies); 9 Chabasit neben Bergkristall und Chlorit; 10 Adular (aus HENZEN 2004).

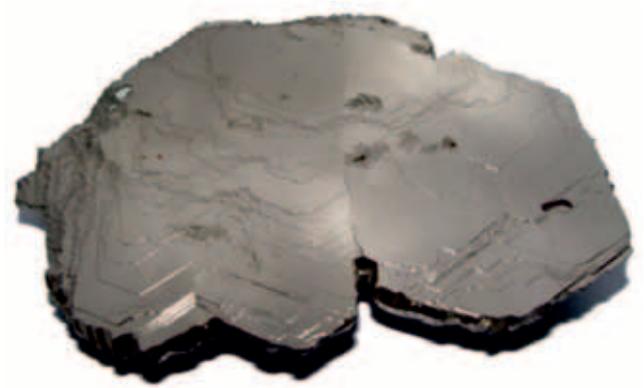


Fig. 11-3: Einzelkristall («Schwimmer») von Pyrrhotin: Vorderseite (oben), Rückseite (unten) (HENZEN 2004).

## 12. Dokumentation

### 12.1 Daten, Berichte

Sämtliche im Zusammenhang mit dem Lötschberg-Basistunnel erstellten geologischen Berichte sind bei der Geologischen Informationsstelle bei der Landesgeologie (swisstopo) in Wabern bei Bern archiviert. Diese Berichte enthalten auch die gesammelten Daten. Die Originalbrustaufnahmen sowie die Dünnschliffe sind beim Geologiebüro Kellerhals+Haefeli AG in Bern hinterlegt.

### 12.2 Handstücksammlungen, archivierte Bohrkerne

Eine repräsentative Handstücksammlung sowie ausgewählte Bohrkerne aus den Sondier- und den Vorausböhrungen wurden ebenfalls der Landesgeologie übergeben. Ausgewählte Handstücke finden sich auch in den Archiven der geologischen Institute der Universitäten Bern und Lausanne.

## Literaturverzeichnis

- ADRIAN, H. (1915): Geologische Untersuchungen der beiden Seiten des Kandertales im Berner Oberland. – *Eclogae geol. Helv.* 13/3, 228–351.
- ANSERMET, S. (2005): Verborgene Schätze im Lötschberg-Basistunnel. – *Tec* 21, 123/27–28, 10–14.
- BROUSMICHE DELCAMBRE, C. & MENKVELD-GFELLER, U. (2007): La macroflore carbonifère du tunnel du Lötschberg (Oberland bernois, Suisse). – *Rév. de Paléobiologie* 26/2, 645–663.
- BWG [BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE] (Hrsg.) (2005): Tektonische Karte der Schweiz 1:500 000.
- COLLET, L.-W. (1947): La géologie du versant Sud du massif de Gastern. – *Eclogae geol. Helv.* 40/2, 257–281.
- CRESTIN, G. (1990): Géologie du Lötschenpass (Valais). Relations sédimentaires et structurales dans le flanc renversé de la nappe du Doldenhorn. – Diplomarb. Univ. Lausanne (unpubl.).
- DOLIVO, E. (1982): Nouvelles observations structurales au SW du massif de l'Aar entre Visp et Gampel. – *Matér. Carte géol. Suisse* [n.s.] 157.
- EINSTEIN, H. H. (2006): TBM-Penetration, TBM-Verschleiss, Brustinstabilitäten. – *Ber. z.H. BLS AlpTransit* (unpubl.).
- HÄNNI, R. (1999): Der geologische Bau des Helvetikums im Berner Oberland. – Diss. Univ. Bern.
- HENZEN, A. (2004): Mineralien im Lötschberg-Basistunnel (Beispiele). – [www.henzen.com/mineralogie/min-uebersicht.html](http://www.henzen.com/mineralogie/min-uebersicht.html) (31.5.2013).
- HÜGI, T., LEDERMANN, H. & SCHLÄPPI, E. (1988): Blatt 1268 Lötschental. – *Geol. Atlas Schweiz*, 1:25 000, Erläut. 82.
- HÜGI, T., LEDERMANN, H., SCHLÄPPI, E., COLLET, L.-W., FREY, M. & PARÉJAS, E. (1985): Blatt 1268 Lötschental. – *Geol. Atlas Schweiz* 1:25 000, Karte 82.
- KAISER, P. K. (2006): Tunnel stability in highly stressed, brittle ground-rock mechanics considerations for Alpine tunneling. In Löw, S. (Hrsg.): *Geologie und Geotechnik der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg*. – vdf Hochschulverl., Zürich.
- KELLERHALS, P. & ISLER, A. (1998): Lötschberg-Basistunnel: geologische Voruntersuchungen und Prognose. – *Geol. Ber. Landeshydrol. u. -geol.* 22.
- LABHART, T. P. & RYBACH, L. (1980): Radiometrische Stollenprofile durch zentralmassivische Granite im Bereich der Schweizer Geotransverse. – *Eclogae geol. Helv.* 73/2, 571–581.
- LEDERMANN, H. (1945): Petrographische Untersuchungen in der nördlichen Schieferhülle des zentralen Aaregranits im oberen Lötschental/westliches Aarmassiv. – *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 25/2, 383–530.
- LLS [LITHOSTRATIGRAPHISCHES LEXIKON DER SCHWEIZ] (o.J.): *Helvetikum/Helvétique*. – [www.stratigraphie.ch/?page=strat&strat=Helvetikum](http://www.stratigraphie.ch/?page=strat&strat=Helvetikum) (31. 5. 2013).
- LOUP, B. (1992): Evolution de la partie septentrionale du domaine helvétique en Suisse occidentale au Trias et au Lias: contrôle par subsidence thermique et variations du niveau marin. – Thèse Univ. Genève.
- MENKVELD-GFELLER, U. (1993): Stratigraphie und Paläogeographie des Eocäns der helvetischen Decken der Westschweiz (Diablerets- und Wildhorn-Decke). – Diss. Univ. Bern.
- MÜLLER, R.W. (2008): Die verstärkte Überwachung der Talsperren beim Bau der Tunnels der neuen Alpentransversalen am Gotthard und am Lötschberg (Schweiz). – *Wiss. Z. Hochsch. Mittweida* 2008/1, 5–13.
- OLSEN, N., JOHNSON, C. M., BEARD, B. L. & BAUMGARTNER, L. P. (2000): New U-Pb zircon data and constraints on the age and mode of magmatization in the Aar massif, Central Alps. – *Europ. J. Mineral.* 12/6, 1245–1260.
- OTTIGER, R. (2006): Hydrogeologie Vortrieb Ferden. In: Löw, S. (Hrsg.): *Geologie und Geotechnik der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg* – vdf Hochschulverl., Zürich.
- RAHN, M. K. & MULLIS, J. (1999): Very low-T metamorphism, fluid development and exhumation history of the Helvetic Alps along the Lötschberg exploration tunnel. – *EUG* 10, Strasbourg; *J. of Conf. Abstr.* 4/1, 703.
- RÜEGG, H.-R. (2008): Molybdänit im Lötschberg-Basistunnel. – *Schweizer Strahler* 2008/3, 19–26.
- RUTISHAUSER, H. (1973): Die Beziehungen zwischen dem Lauterbrunner Kristallin und dem Gastern-Granit. – *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 53/3, 472–474.
- RUTISHAUSER, H. & HÜGI, T. (1978): Der Kontakt zwischen Gasterngranit und Lauterbrunner Kristallin im Gasterntal (Aarmassiv, Schweiz). – *Mitt. natf. Ges. Bern* [N.F.] 35, 3–53.
- SCHALTEGGER, U. (1993): The evolution of the polymetamorphic basement of the Central Alps unravelled by precise U-Pb zircon dating. – *Contrib. Mineral. Petrol.* 113, 466–478.
- (1994): Unravelling the pre-Mesozoic history of Aar and Gotthard massifs (Central Alps, Switzerland) by isotopic dating – a review. – *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 74, 41–51.
- SCHLÄPPI, E. (1980): Geologische und tektonische Entwicklung der Doldenhorn-Decke und zugehöriger Elemente. – Diss. Univ. Bern.
- SEINGRE, G. (2006): Querung der Trias Raron. In: Löw, S. (Hrsg.): *Geologie und Geotechnik der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg*. – vdf Hochschulverl., Zürich.
- STRAUMANN, U., ROGGLI, C. & ZIEGLER, H.-J. (2004): Lötschberg base tunnel – passing under the BLS mountain railway line at Frutigen. – *Felsbau* 2004/4, 31–37.
- WAGNER, R. (2002): Geologischer Bau des Jungfraukeils am Lötschberg. – Diplomarb. Univ. Bern (unpubl.).
- WILLIAMS, D. J. A., HOFMANN, B. A. & GLASSPOOL, I. G. (2008): Coalification in Carboniferous sediments from the Lötschberg base tunnel. – *Swiss J. Geosci.* 101/3, 651–658.
- ZIEGLER, H.-J. (2006): Vorauserkundung im Karst der Doldenhorn-Decke. In Löw, S. (Hrsg.): *Geologie und Geotechnik der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg* – vdf Hochschulverl., Zürich.
- ZIEGLER, H.-J. & HUFSCHMIED, P. (2004): Measurement and application of in-situ stress data at the Lötschberg base tunnel. – *Rock mechanics – theory and practice*, 2<sup>nd</sup> colloq., Vienna.
- ZWAHLEN, P. (1986): Die Kandertal-Störung, eine transversale Diskontinuität im Bau der helvetischen Decken. – Diss. Univ. Bern.
- (1993): Das Bundstock-Element, eine diskontinuierliche helvetische Telidecke an der Kandertal-Störung. – *Eclogae geol. Helv.* 86/1, 65–86.