Ceneri-Basistunnel: Geologie, Geotechnik, Hydrogeologie und Bautechnik

Zusammenfassender Schlussbericht

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

Jean-Pierre Hürzeler, Michael Bergamini, Diego Pozzorini, Pierre-François Erard und Stefano Morandi

AlpTransit Gotthard San Gottardo

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Landestopografie swisstopo
www.swisstopo.ch

Ceneri-Basistunnel: Geologie, Geotechnik, Hydrogeologie und Bautechnik

Zusammenfassender Schlussbericht

Berichte der Landesgeologie

Jean-Pierre Hürzeler, Michael Bergamini, Diego Pozzorini, Pierre-François Erard und Stefano Morandi

AlpTransit Gotthard San Gottardo

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Landestopografie swisstopo
www.swisstopo.ch

Herausgeber
Landesgeologie

Empfehlung für die Angabe in einem Literaturverzeichnis
Hürzeler, J.-P., Bergamini, M., Pozzorini, D., Erard, P.-F. & Morandi, S. (2020): Ceneri-Basistunnel: Geologie, Geotechnik, Hydrogeologie und Bautechnik. Zusammenfassender Schlussbericht. – Ber. Landesgeol. *I2.*

Titelbild
Sprengung der Kaverne Ost im Verzweigungsbauwerk Sarè km 240.574 (Foto IG ITC).

Auflage
800 Exemplare

Bestellungen
swisstopo, CH-3084 Wabern, oder E-Mail an mapsales@swisstopo.ch

Copyright
© swisstopo, CH-Wabern, 2020

ISSN 1661-9285
ISBN 978-3-302-40113-3

Vorwort des Herausgebers

Die nunmehr drei grossen Basistunnel durch die Schweizer Alpen bilden das Rückgrat der Neuen Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT). Noch nie wurden in den Alpen so lange Tunnelstrecken mit einer derart mächtigen Gebirgsüberlagerung realisiert. Der 15,5 Kilometer lange Ceneri-Basistunnel verbindet den Verkehrsknoten Camorino im Sopraceneri mit der Grossregion Lugano im Sottoceneri und macht es möglich, dass die die Reisezeit zwischen Sopraceneri und Sottoceneri nur noch halb so lange dauert. Zusammen mit dem Gotthard-Basistunnel bildet er den östlichen Ast der Neuen Alpentransversalen in der Schweiz. Die Landesgeologie veröffentlichte 2013 die Publikation «Lötschberg-Basistunnel – zusammenfassender geologischer Schlussbericht» (Nr. 4 der «Berichte der Landesgeologie») sowie 2016 die Publikation «Gotthard-Basistunnel – Geologie, Geotechnik, Hydrogeologie – zusammenfassender Schlussbericht» (Nr. 7 der «Berichte der Landesgeologie»). Es freut uns, dass die Serie zu den grossen Basistunneln mit dem Schlussbericht zum Ceneri-Basistunnel im gleichen Sinne weitergeführt werden kann.

Geologische Detailkenntnisse über die Beschaffenheit des Untergrundes sind eine zwingende Voraussetzung für die Planung und den Bau von solcherart grossen Anlagen. Die ersten Erkundungsbohrungen wurden im Rahmen der Vorstudien zwischen 1991 und 1994 durchgeführt und dienten zu einer ersten Erhebung von lithologischen und felsmechanischen Grunddaten der Gesteine entlang des Tunnelkorridors zwischen Sant'Antonino und Lugano. Die eigentlichen Hauptbohrungen zur ausführlichen Erkundung erfolgten zwischen 1997 und 1999. Nachdem 1999 der Bundesrat das definitive Tunnelsystem «zwei Einspurtunnel» genehmigt hatte, erfolgten entlang der endgültigen Linienführung weitere ergänzende Erkundungsbohrungen.

Das Tunnelsystem besteht aus zwei Einspurtunnel und durchfährt das Grundgebirge der Südalpen zwischen Vigana und Vezia. Die beiden Tunnelröhren sind durch 48 Querschläge verbunden. Rund 2 km vor dem Südportal Vezia wurde das unterirdische Verzweigungsbauwerk Sarè ausgebrochen, von welchem zwei 150 m lange Stollen ausgehen, die den Bau einer zukünftigen Verlängerung des Tunnels nach Süden ermöglichen.

Die geologischen Feld- und Karteninformationen von der Erdoberfläche konnten dank der Vortriebsarbeiten im Ceneri-Basistunnel mit den Daten in der Tiefe vervollständigt werden. Beeindruckend sind ebenfalls die herausragenden Ingenieurleistungen bei der Planung und Ausführung der Bauwerke mittels der geo- und sicherheitstechnischen Massnahmen über das gesamte Bauprojekt. Der vorliegende Bericht gibt einen zusammenfassenden Einblick in diese einzigartigen Erkenntnisse aus den Tunnelvortrieben.

Bauherr des Ceneri-Basistunnels war die AlpTransit Gotthard AG. Die Ingenieurgemeinschaft CBT (ITC) war für die Projektierung und Bauleitung zuständig. Partner der Ingenieurgemeinschaft waren Pini Swiss Engineers SA, AFRY Schweiz AG und Amberg Engineering AG. Die geologische Prognose des Ceneri-Basistunnels erstellte das Geologiebüro Dr. Baumer SA. Die Materialbewirtschaftung erfolgte durch das Ingenieurbüro Pagani & Lanfranchi SA, während die IFEC Ingegneria SA für den Bereich Umwelt beauftragt wurde.

Am Rohbau des Ceneri-Basistunnels waren die Arbeitsgemeinschaften Consorzio Matro Sud (Baulos Vigana), Consorzio Condotte Cossi (Baulos Sigirino) und Consorzio CPV (Baulos Vezia) beteiligt.

Während der Ausführung bei Vollbetrieb zählte das Geologenteam im Jahre 2010 bis zu sieben Geologen für insgesamt neun Vortriebe. Zum Geologenteam, welches unter Mitwirkung des Projektgeologen Dr. Diego Pozzorini die Vortriebsarbeiten geologisch begleitete, gehörten Dr. Stefano Morandi, Dr. Pierre-François Erard, Dipl. Geol. Jean-Pierre Hürzeler, MSc. Geol. Reto De Paoli, Dr. Andrea Galli, MSc. Geol. Laurent Thum, MSc. Ing. Geol. Auro Lunghi, Dipl. Geol. François Ghirlanda und MSc. Geol. Laurie Cortesi.

Es ist uns ein wichtiges Anliegen, allen Mitwirkenden und den Vertretern der AlpTransit Gotthard AG herzlich zu danken.

Die Autoren Jean-Pierre Hürzeler, Michael Bergamini, Diego Pozzorini, Pierre-François Erard und Stefano Morandi stellten die zu publizierenden Teilresultate zusammen und verfassten den dazugehörenden Text.

Die Verantwortung für Textinhalte, Illustrationen und Beilagen ist Sache der Autoren.

Dr. Olivier Lateltin
Leiter Landesgeologie

Préface de l'éditeur

Les trois grands tunnels de base qui traversent actuellement les Alpes suisses constituent l'épine dorsale de la Nouvelle ligne ferroviaire à travers les Alpes (NLFA). Jamais auparavant des sections de tunnel aussi longues n'avaient été construites dans les Alpes sous une couverture de roche aussi massive. Le tunnel de base du Ceneri, long de 15,4 kilomètres, relie le nœud routier de Camorino dans le Sopraceneri à la région de Lugano dans le Sottoceneri et permet de réduire de moitié la durée du trajet. Avec le tunnel de base du Gothard, il constitue la branche orientale de la nouvelle transversale alpine en Suisse. En 2013, le Service géologique national a publié le rapport du Service géologique national n° 4 «Lötschberg-Basistunnel – zusammenfassender geologischer Schlussbericht» et en 2016 le rapport n° 7 «Gotthard-Basistunnel: Geologie, Geotechnik, Hydrogeologie – zusammenfassender Schlussbericht» de la même série. C'est très réjouissant que le présent rapport soit aussi publié dans cette série sur les tunnels de base.

Des connaissances précises sur les propriétés géologiques du sous-sol sont une condition préalable essentielle à la planification et à la construction de ces grands ouvrages. Les premiers sondages ont été réalisés entre 1991 et 1994 dans le cadre de premières études géologiques et ont permis d'obtenir des données lithologiques et mécaniques de base sur les roches le long du couloir du tunnel entre Sant'Antonino et Lugano. Les principaux sondages ont été réalisés entre 1997 et 1999. Suite à la décision du Conseil fédéral en 1999 en faveur de deux tubes séparés, d'autres sondages supplémentaires ont été réalisés le long du tracé final.

Le tunnel composé de deux tubes à voie unique traverse le substratum rocheux des Alpes du sud entre Vigana et Vezia. Les deux tubes du tunnel sont reliés par 48 passages transversaux. Environ 2 km avant le portail sud de Vezia, la structure souterraine de bifurcation Sarè a été prévue. Deux tunnels de 150 m de long sont creusés, en prévision de la construction d'une extension future du tunnel vers le sud.

Les travaux de creusement dans le tunnel de base du Ceneri ont offert l'opportunité unique de compléter les données de terrain et les cartes de surface avec les données inaccessibles en profondeur. Il est également impressionnant de constater les remarquables réalisations techniques dans la planification et l'exécution des ouvrages en utilisant les mesures géotechniques et de sécurité tout au long du projet de construction. Le présent rapport fournit un résumé de ces résultats uniques issus des travaux de percement du tunnel.

La société AlpTransit Gotthard SA a assuré le rôle de maitre d'ouvrage pour le tunnel de base du Ceneri. La planification du projet et de la gestion de la construction a été confiée au consortium d'ingénierie CBT (ITC). Les partenaires du consortium d'ingénierie étaient Pini Swiss Engineers SA, AFRY Suisse SA et Amberg Engineering SA. Les prévisions géologiques pour le tunnel de base du Ceneri ont été établies par le bureau de géologie Dr Baumer SA. La gestion des matériaux a été assurée par le bureau d'ingénierie Pagani & Lanfranchi SA, tandis que l'IFEC Ingegneria SA a été mandatée pour le secteur environnemental.

Les travaux d'excavation ont été distribués par lot ainsi: Le consortium Matro Sud pour l'exécution de travaux souterrains du lot à Vigana, le consortium Condotte Cossi pour le lot à Sigrino et le consortium CPV pour le lot à Vezia.

En 2010, l'équipe de géologues était composée de jusqu'à sept géologues pour un total de neuf creusements pendant l'exécution du projet. Les géologues Dr Stefano Morandi, Dr Pierre-François Erard, dipl. géol. Jean-Pierre Hürzeler, MSc. géol. Reto De Paoli, Dr Andrea Galli, MSc. géol. Laurent Thum, MSc. géol. ing. Auro Lunghi, dipl. géol. François Ghirlanda et MSc. géol. Laurie Cortesi ont suivi les travaux souterrains avec l'assistance du Dr Diego Pozzorini.

Il est très important pour nous d'exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes impliquées et aux représentants de la société AlpTransit Gotthard SA.

Les auteurs Jean-Pierre Hürzeler, Michael Bergamini, Diego Pozzorini, Pierre-François Erard et Stefano Morandi ont rassemblé les résultats partiels publiés pour rédiger ce rapport final.

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

Dr Olivier Lateltin
Responsable du Service géologique national

Prefazione dell'editore

Le tre grandi gallerie di base che oggi attraversano le Alpi svizzere rappresentano ormai la spina dorsale delle Nuove ferrovie transalpine (NFTA). Mai prima d'ora nelle Alpi sono stati costruiti tracciati di tunnel così lunghi con una copertura rocciosa così importante. La Galleria di base del Ceneri, lunga 15,4 kilometri, collega il nodo di Camorino con la Regione del Luganese e consente di percorrere il tragitto tra il Sopra- e il Sottoceneri in metà del tempo. In combinazione con la galleria di base del San Gottardo, la Galleria di base del Ceneri costituisce il ramo orientale della Nuova trasversale alpina in Svizzera. Nel 2013, il Servizio geologico nazionale ha pubblicato la relazione «Galleria di base del Lötschberg – Rapporto geologico finale sintetico» (n. 4 dei «Rapporti del Servizio geologico nazionale») e in seguito, nel 2016, la relazione «Galleria di base del San Gottardo – Geologia, geotecnica, idrogeologia – Rapporto finale sintetico» (n. 7 dei «Rapporti del Servizio geologico nazionale»). Con la relazione finale sulla Galleria di base del Ceneri siamo molto lieti che la serie sui grandi tunnel di base possa continuare con lo stesso spirito iniziale.

Una conoscenza geologica dettagliata delle proprietà del sottosuolo è un prerequisito essenziale per la progettazione e la costruzione di grandi opere. I primi sondaggi d'esplorazione sono stati effettuati tra il 1991 e il 1994 nell'ambito degli studi preliminari e hanno permesso di ottenere le caratteristiche litologiche e meccaniche del massiccio roccioso lungo il corridoio della galleria tra Sant'Antonino e Lugano. I sondaggi principali per l'esplorazione dettagliata sono stati in seguito eseguiti tra il 1997 e il 1999. Dopo l'approvazione da parte del Consiglio federale del sistema definitivo di gallerie «due gallerie a binario unico» nel 1999, sono stati eseguiti dei sondaggi d'esplorazione supplementari lungo il tracciato finale.

L'opera è costituita da due gallerie a binario unico che attraversano la base delle Alpi meridionali tra Vigana e Vezia. Le due canne del tunnel sono collegate tramite 48 cunicoli trasversali. Circa 2 km prima del portale sud di Vezia è stata scavata la diramazione sotterranea di Sarè. Da qui partono due gallerie lunghe 150 m che permetteranno la costruzione di un futuro ampliamento del tunnel verso sud.

Le informazioni geologiche della superficie hanno potuto essere completate grazie ai dati raccolti in profondità durante i lavori di scavo della Galleria di base del Ceneri. Impressionanti sono anche le soluzioni ingegneristiche eccezionali realizzate nell'ambito della pianificazione e esecuzione dell'opera. Il presente rapporto riassume questi risultati unici provenienti dai lavori di scavo della galleria.

L'impresa appaltatrice della Galleria di base del Ceneri è stata la AlpTransit San Gottardo SA, mentre il consorzio di ingegneria CBT (ITC) era responsabile della progettazione e della direzione locale dei lavori. I partner del consorzio di ingegneri sono stati Pini Swiss Engineers SA, AFRY Svizzera SA e Amberg Engineering AG. Lo Studio di geologia Dr. Baumer SA ha realizzato la prognosi geologica. La gestione dei materiali è stata effettuata dallo studio di ingegneria Pagani & Lanfranchi SA, mentre IFEC Ingegneria SA è stata commissionata per il settore ambientale.

Le seguenti imprese hanno preso parte nei lavori di scavo della Galleria di base del Ceneri: il Consorzio Matro Sud per l'esecuzione dei lavori del lotto Vigana, il Consorzio Condotte Cossi per il lotto Sigirino e il Consorzio CPV per il lotto Vezia.

Nel 2010, il team di geologi contava fino a sette geologi che hanno assistito le nove fasi di avanzamento. Il team che ha accompagnato i lavori di avanzamento, assistito dal geologo principale del progetto Dr. Diego Pozzorini, comprendeva Dr. Stefano Morandi, Dr. Pierre-François Erard, Dipl. geol. Jean-Pierre Hürzeler, MSc. geol. Reto De Paoli, Dr. Andrea Galli, MSc. geol. Laurent Thum, MSc. ing. geol. Auro Lunghi, Dipl. geol. François Ghirlanda e MSc. geol. Laurie Cortesi.

Il Servizio geologico nazionale tiene particolarmente a ringraziare tutti i collaboratori e i rappresentanti di AlpTransit San Gottardo SA.

Gli autori Jean-Pierre Hürzeler, Michael Bergamini, Diego Pozzorini, Pierre-François Erard e Stefano Morandi hanno consolidato i risultati parziali e redatto il rapporto finale.

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

Dr. Olivier Lateltin
Responsabile del Servizio geologico nazionale

Preface from the editor

Three large base tunnels through the Swiss Alps now form the backbone of the New Railway Link through the Alps (NRLA). Never before have such long tunnel sections been built in the Alps with such a massive mountain overburden. The 15.4-kilometer-long Ceneri Base Tunnel connects the Camorino traffic junction in the Sopraceneri with the Greater Lugano region in the Sottoceneri and makes it possible for the journey between Sopraceneri and Sottoceneri to take only half the time. Together with the Gotthard Base Tunnel, it forms the eastern branch of the NRLA in Switzerland. In 2013 the Swiss Geological Survey published the report "Lötschberg Base Tunnel – Summary Final Geological Report" (No. 4 of the "Reports of the Swiss Geological Survey") and in 2016 the report "Gotthard Base Tunnel – Geology, Geotechnics, Hydrogeology – Summary Final Report" (No. 7 of the "Reports of the Swiss Geological Survey"). We are pleased that the series focusing on the large base tunnels can be continued in the same spirit with this final report on the Ceneri Base Tunnel.

Detailed geological knowledge about the composition of the subsurface is an essential prerequisite for the planning and construction of such large installations. The first exploratory drilling was carried out between 1991 and 1994 as part of the preliminary studies and served to obtain basic lithological and rock mechanical data along the tunnel corridor between Sant'Antonino and Lugano. The main drilling involving detailed exploration was performed between 1997 and 1999. After the Federal Council had approved the definitive tunnel system as "two single-track tunnels" in 1999, supplementary exploratory borehole data were obtained along the final route.

The tunnel system consists of two single-track tunnels and traverses the bedrock of the Southern Alps between Vigana and Vezia. The two tunnel tubes are connected by 48 cross passages. About 2 km before reaching the south portal of Vezia, the underground branch-off structure Sarè was excavated, from which two 150-m-long tunnels start. These are foundations for the construction of a future extension of the tunnel towards the south.

Thanks to the excavation work in the Ceneri Base Tunnel, the geological field and map information from the ground surface could be completed with the data from depth. Also impressive are the outstanding engineering achievements in the planning and implementation of the structures by means of geotechnical and safety measures throughout the entire construction project. The present report provides a summary of these unique findings from the tunnel drives.

The contractor for the Ceneri Base Tunnel was AlpTransit Gotthard Ltd. The engineering consortium CBT (ITC) was responsible for project planning and construction management. Partners of the engineering consortium were Pini Swiss Engineers SA, AFRY Switzerland Ltd. and Amberg Engineering Ltd. The geological forecast for the Ceneri Base Tunnel was prepared by Geologiebüro Dr. Baumer SA. The materials management was carried out by the engineering office Pagani & Lanfranchi SA, while IFEC Ingegneria SA was commissioned for the environmental sector.

The consortium Consorzio Matro Sud (Vigana lot), the consortium Consorzio Condotte Cossi (Sigirino lot) and the consortium CPV (Vezia lot) were involved in the shell construction of the Ceneri Base Tunnel.

In 2010, a team of up to seven geologists accompanied a total of nine drives during the execution of the project. The team, which geologically accompanied the driving work with the assistance of project geologist Dr Diego Pozzorini, included Dr Stefano Morandi, Dr Pierre-François Erard, Dipl. geol. Jean-Pierre Hürzeler, MSc. geol. Reto De Paoli, Dr Andrea Galli, MSc. geol. Laurent Thum, MSc. eng. geol. Auro Lunghi, Dipl. geol. François Ghirlanda and MSc. geol. Laurie Cortesi.

We express our deepest thanks to the participants and to the representatives of AlpTransit Gotthard Ltd.

The authors Jean-Pierre Hürzeler, Michael Bergamini, Diego Pozzorini, Pierre-François Erard and Stefano Morandi compiled the partial results to be published and wrote the corresponding text.

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

Dr. Olivier Lateltin
Head of the Swiss Geological Survey

Vorwort AlpTransit Gotthard AG

Mit dem Ceneri-Basistunnel (CBT) als Fortsetzung des Gotthard-Basistunnels (GBT) wird die neue Gotthard-Basisstrecke erst zu einer durchgehenden Flachbahn für den Personen- und Güterverkehr durch die Alpen. Im Dezember 2020 werden die Projekte der Neuen Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT) mit der kommerziellen Inbetriebnahme des Ceneri-Basistunnels vollendet. Für den Bund als Besteller, die AlpTransit Gotthard AG als Erstellerin und die Schweizerischen Bundesbahnen SBB als künftige Betreiberin bedeutet dies das Erreichen eines Meilensteins bei der Umsetzung der Ziele der schweizerischen Verkehrspolitik. Mit der NEAT stellt die Schweiz eine moderne, leistungsfähige Bahninfrastruktur auf dem europäischen Nord-Süd-Korridor durch die Alpen zur Verfügung – als umweltschonende Alternative zur Strasse für den Güter- und Personenverkehr. Damit wird die Vision einer Flachbahn mitten durch die Alpen Wirklichkeit. Neben schnelleren und häufigeren nationalen und internationalen Bahnverbindungen eröffnet der Ceneri-Basistunnel auch neue Möglichkeiten für den Regionalverkehr in Form eines attraktiven S-Bahn-Netzes im Kanton Tessin. Mit der «Bretella Locarno – Lugano» wird eine Direktverbindung zwischen Lugano und Locarno geschaffen, mit der die Reisezeit zwischen den beiden Städten halbiert werden kann.

Mit einer Länge von 15,4 Kilometern ist der aus zwei Einspurröhren bestehende Ceneri-Basistunnel nach dem Gotthard- und dem Lötschberg-Basistunnel das drittgrösste Bauprojekt der NEAT und der fünftlängste Bahntunnel der Schweiz. Die Tunnelportale liegen im Norden in Vigana (Camorino) und im Süden in Vezia. Im Tunnel, ca. 2,5 km nördlich des Portals Vezia, liegt die unterirdische Verzweigung von Sarè. Sie ermöglicht eine künftige Verlängerung des Tunnels Richtung Süden (nach Chiasso bzw. Como).

1997 bis 2001 wurde in Sigirino ein 3,1 km langer Erkundungsstollen bis zu den geplanten Tunnelachsen ausgebrochen, der wertvolle Informationen über die geologischen Verhältnisse geliefert hat. 2008 brach eine Tunnelbohrmaschine den 2,3 km langen Fensterstollen Sigirino aus. Am Ende des Stollens entstanden zwei unterirdische Kavernen, die ab 2010 Ausgangspunkt für die Sprengvortriebe Richtung Süden und Norden waren. Von den Portalen Vigana und Vezia wurden Gegenvortriebe ausgeführt. Der Hauptdurchschlag des Tunnels erfolgte am 21.01.2016 in der Weströhre zwischen Sigirino und Vigana, einige Tage später am 26.01.2016 folgte der Durchschlag der Oströhre. Damit waren die Hauptvortriebe abgeschlossen und die geologischen Unsicherheiten überwunden. In den folgenden Jahren wurde der Innenausbau des Tunnels fertiggestellt sowie die bahntechnischen Ausrüstungen eingebaut und getestet. Am 1. September 2020 werden die Anlagen des Ceneri-Basistunnels durch die Alptransit Gotthard AG (ATG) als Erstellerin den Schweizerischen Bundesbahnen SBB als Betreiberin übergeben.

Die geologische Prognose, welche die geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Verhältnisse des Gebirges beschreibt, bildete eine wesentliche Grundlage bei der Projektierung, der Ausschreibung und der Ausführung des Ceneri-Basistunnels. Aufgrund der Prognose wurden Kosten und Termine abgeschätzt. Während der Bauausführung wurde mit zusätzlichen Untersuchungen und Sondierungen die Prognose laufend verfeinert, so dass jederzeit ein genügend abgesicherter Wissensstand über die auf den nächsten Metern des Vortriebs zu erwartenden Verhältnisse vorhanden war. Die angetroffenen geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Verhältnisse wurden durch die Geologen erfasst und dokumentiert. Sie bildeten zusammen mit geotechnischen Messungen eine wichtige Grundlage bei der Festlegung der Ausbruchsicherung während dem Bau und natürlich auch einen wesentlichen Bestandteil der Bauwerksakten.

Dadurch ist auf einer Länge von 15,4 km zwischen den Portalen Vigana und Vezia eine ausführliche Dokumentation der angetroffenen geologischen Verhältnisse entstanden. Die umfangreiche Schlussdokumentation wurde in acht Teilberichte unterteilt und durch die AlpTransit Gotthard AG dem Bundesamt für Landestopografie swisstopo übergeben und kann dort eingesehen werden. Somit ist sichergestellt, dass die geologischen Erkenntnisse aus den Tunnelvortrieben zugänglich bleiben. Der hier nun vorliegende zusammenfassende Schlussbericht stellt eine Synthese der gesamten Schlussdokumentation dar.

Die AlpTransit Gotthard AG dankt dem gesamten Geologenteam und allen weiteren Projektbeteiligten für ihre hervorragende Leistung und ihren grossen und unermüdlichen Einsatz bei der Realisierung des Ceneri-Basistunnels. Den Autoren danken wir für das Verfassen der vorliegenden Publikation und den Vertretern des Bundesamtes für Landestopografie swisstopo für die stets gute Zusammenarbeit.

Prefazione dell'AlpTransit Gotthard AG

Con la Galleria di base del Ceneri (GbC) come proseguimento della Galleria di base del San Gottardo (GbG), la nuova linea di base del San Gottardo diventerà dapprima un collegamento ferroviario in pianura per il traffico passeggeri e merci attraverso le Alpi. Nel dicembre 2020, i progetti della Nuova ferrovia transalpina (NFTA) saranno completati con la messa in esercizio commerciale della Galleria di base del Ceneri. Per la Confederazione in qualità di committente, AlpTransit San Gottardo SA in qualità di costruttore e le Ferrovie Federali Svizzere FFS in qualità di futuro gestore, ciò significa il raggiungimento di una pietra miliare nell'attuazione degli obiettivi della politica svizzera dei trasporti. Con la NFTA, la Svizzera offre un'infrastruttura ferroviaria moderna ed efficiente sul corridoio europeo nord-sud attraverso le Alpi – come alternativa ecologica al trasporto su strada per merci e passeggeri. La visione di un collegamento ferroviario di pianura attraverso le Alpi diventa così realtà. Oltre ai collegamenti ferroviari nazionali e internazionali più veloci e frequenti, la Galleria di base del Ceneri apre anche nuove opportunità per il trasporto regionale sotto forma di un'interessante rete di S-Bahn nel Canton Ticino. La «Bretella Locarno – Lugano» creerà un collegamento diretto tra Lugano e Locarno, che dimezzerà i tempi di viaggio tra le due città.

Con una lunghezza di 15,4 chilometri, la Galleria di base del Ceneri, costituita da due canne a binario unico, è il terzo progetto di costruzione della NFTA dopo le gallerie di base del San Gottardo e del Lötschberg e la quinta galleria ferroviaria più lunga della Svizzera. I portali delle gallerie si trovano a Camorino (Vigana) a nord e a Vezia a sud. Nella galleria, a circa 2,5 km a nord del portale di Vezia, si trova il ramo sotterraneo di Sarè. Permette un futuro ampliamento del tunnel a sud (verso Chiasso o Como).

Dal 1997 al 2001 è stato scavato a Sigirino un cunicolo esplorativo lungo 3,1 km fino agli assi di galleria previsti, che ha fornito preziose informazioni sulle condizioni geologiche. Nel 2008 una fresa meccanica ha scavato la Finestra di Sigirino, lunga 2,3 km. Alla fine del tunnel sono state create due caverne sotterranee, che dal 2010 sono state il punto di partenza per i brillamenti a sud e a nord. Dai portali di Vigana e Vezia si è proceduto al controavanzamento. La caduta del diaframma principale della galleria ha avuto luogo il 21 gennaio 2016 nella galleria ovest tra Sigirino e Vigana, seguito il 26 gennaio 2016 dalla caduta del diaframma nella canna est. Ciò ha segnato il completamento degli avanzamenti e la fine delle incertezze geologiche. Negli anni successivi, l'interno del tunnel è stato completato e le attrezzature ferroviarie sono state installate e testate. Il 1° settembre 2020 gli impianti della Galleria di base del Ceneri saranno consegnati dal costruttore AlpTransit San Gottardo SA (ATG) alle Ferrovie Federali Svizzere FFS, il gestore.

La previsione geologica, che descrive le condizioni geologiche, idrogeologiche e geotecniche del massiccio roccioso, ha costituito una base essenziale per la progettazione, l'appalto e la costruzione della Galleria di base del Ceneri. Sulla base delle previsioni, sono stati stimati i costi e le scadenze. Durante la costruzione, sono stati effettuati ulteriori indagini e sondaggi per affinare continuamente le previsioni, in modo da disporre di uno stato di conoscenza sufficientemente affidabile delle condizioni attese durante i successivi metri di scavo. Le condizioni geologiche, idrogeologiche e geotecniche incontrate sono state raccolte e documentate dai geologi. Insieme alle misurazioni geotecniche, hanno costituito una base importante per la determinazione della protezione dello scavo durante la costruzione e, naturalmente, anche una parte essenziale delle pratiche di costruzione.

Ne è risultata una documentazione dettagliata delle condizioni geologiche incontrate su una lunghezza di 15,4 km tra i portali di Vigana e Vezia. L'ampia documentazione finale è stata suddivisa in otto relazioni parziali e consegnata da AlpTransit San Gottardo SA all'Ufficio federale di topografia swisstopo, dove può essere visionata. In questo modo si garantisce che i ritrovamenti geologici provenienti dagli scavi delle gallerie rimangano accessibili. La relazione finale sintetica qui presentata rappresenta una sintesi dell'intera documentazione finale.

AlpTransit San Gottardo SA ringrazia l'intero team di geologi e tutti gli altri partecipanti al progetto per le loro eccellenti prestazioni e per il loro grande e instancabile impegno nella costruzione della Galleria di base del Ceneri. Ringraziamo inoltre gli autori della presente pubblicazione e i rappresentanti dell'Ufficio federale di topografia swisstopo per l'ottima collaborazione.

Zusammenfassung

Der Ceneri-Basistunnel (CBT) ist ein 15,4 km langer, aus zwei richtungsgetrennten Tunnelröhren bestehender Eisenbahntunnel im Kanton Tessin. Er wurde im Rahmen des Projekts Neue Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT) erstellt und wird dem Gotthard-Basistunnel als südlicher Zubringer dienen.

Geographisch verbindet er das Sopraceneri mit dem Sottoceneri und ist deswegen für den regionalen öffentlichen Verkehr von grosser Bedeutung. Der Bau der «Bretella Locarno–Lugano» beim Nordportal schafft eine Direktverbindung zwischen den Städten Lugano und Locarno und reduziert die Bahnreisezeit von heute 60 auf 30 Minuten.

Die Oströhre des CBT erreicht zwischen dem Nordportal in Vigana und dem Südportal in Vezia eine Länge von 15,475 km. Der Rohbau des CBT wurde in fünf Baulosen ausgeschrieben. Das gesamte Bauwerk gliedert sich von Norden nach Süden in die Portalzone Nord in Vigana, den Tunnel Ceneri Nord, den Zwischenangriff Sigirino mit dem Fensterstollen (FIS), den Erkundungsstollen (CPS), den Tunnel Ceneri Süd und die Portalzone Süd in Vezia. Der Zwischenangriff Sigirino entspricht dem eigentlichen Hauptangriffspunkt und stellt deshalb ein zentrales Element des Vortriebskonzeptes dar. Untertage umfasst er neben den beiden Zugangsstollen CPS und FIS die Logistikkavernen (CAOP) für den Vortrieb der beiden Einspurtunnel Richtung Norden und Süden. Das Baustellendorf, der Installationsplatz Prati di Regada und die benachbarte Ablagerung des Aushubs für nicht wiederverwendbares Ausbruchmaterial gehören zur Infrastruktur des Aussenbereichs.

Zu den Nebenbauwerken zählen in diesem Bericht die 48 Querschläge, welche die beiden Einspurtunnel im Mittel alle 316 m verbinden. Sie sind zugleich Bestandteil des Sicherheitskonzepts im Ereignisfall. Die Kaverne für die Betonanlage (CPC), zwei baulogistische Bypässe sowie der Anschluss Lugano–Bellinzona am Nordportal (Bretella Lugano–Bellinzona) sind weitere Nebenbauwerke. Die ausgebrochene Strecke aller Haupt- und Nebenbauwerke zusammengezählt summiert sich auf 39,780 km.

Der bestehende 3,1 km lange Erkundungsstollen CPS diente bis zur Fertigstellung des Fensterstollens FIS der logistischen Versorgung mit Baumaterial und der Entsorgung des Ausbruchmaterials für den Bau der Logistikkaverne CAOP. Der Vortrieb des 2,3 km langen Fensterstollens fand mit einer offenen Tunnelbohrmaschine (TBM) statt. Für alle anderen Haupt- und Nebenbauwerke des CBT erfolgte der Ausbruch des Festgesteins im Sprengvortrieb.

Der Ausbruchquerschnitt der beiden Einspurtunnel liegt je nach Ausbruchsicherungstyp zwischen 62 und 87 m². Die Kavernen des Anschlussbauwerks Vigana, der CAOP und des Verzweigungsbauwerks Sarè erreichen maximale Ausbruchquerschnitte von 232 m², 238 m² respektive 298 m².

Der CBT liegt auf seiner gesamten Länge im Grundgebirge der Südalpen. Die Südalpen wurden im Projekt in drei tektonische Zonen gegliedert.

Die Ceneri-Zone (CZ), in der Literatur oft Strona-Ceneri-Zone (StrCZ) genannt, grenzt im Norden an die Insubrische Linie und deckt zwei Drittel des Tunnels ab. Die restliche Strecke wird durch die Val-Colla-Linie und die südlich anschliessende Val-Colla-Zone gebildet. Die Val-Colla-Linie trennt die beiden Zonen.

Die Ceneri-Zone wurde im Projekt weiter in drei tektonische Einheiten und die Val-Colla-Zone in zwei tektonische Einheiten unterteilt. Zusammen mit der Val-Colla-Linie ergeben sich insgesamt sechs tektonische Einheiten. Das gesamte Profil entlang des Tunnels umfasst dabei zehn verschiedene geologische Formationen.

Die Val-Colla-Linie bildet den Grenzbereich zwischen den beiden tektonischen Zonen. Sie galt für die Realisierung des Tunnels aufgrund ihrer ungünstigen geotechnischen Eigenschaften als bautechnische Schlüsselstelle. Weitere geotechnisch relevante Streckenabschnitte wurden in der Ceneri-Zone prognostiziert und umfassen die Bereiche mit Hauptstrukturen, die im mittleren Bereich des CBT parallel bis subparallel zur Tunnelachse streichen («Subparallelismus»), sowie die Störungszonen Val d'Isone, Val Mara und Gola di Lago. Die Störungszone Gola di Lago wird in diesem Bericht auch «intensiv tektonisierte Zone» genannt.

Das durchörterte südalpine Grundgebirge durchlief während seiner Entstehung mehrphasige, präalpine und alpine tektonische Ereignisse. Auf diese Weise bildeten sich im Grundgebirge lithologisch und strukturell komplexe Abfolgen von verschiedensten Metamorphiten, alten duktilen Strukturen und jüngeren spröden Scher- und Störungszonen, deren tektonometamorphe Entwicklung sich von der alpinen Orogenese bis ins Präkambrium zurückverfolgen lässt. Die präkambrisch gebildete kontinentale Kruste durchlief z.T. hohe, temperaturbetonte Metamorphoseprozesse, denn sie besteht aus mächtigen Sedimenten und zwischengelagerten Vulkaniten, die während der kaledonischen Orogenese (Kambrium bis Ordovizium) komprimiert und nachfolgend subduziert wurden. Die damit einhergehende duktile Verformung ist lokal als Schieferung und reliktische Falten erhalten geblieben. Dieser orogene Zyklus endete mit Granitintrusionen, von denen der Ceneri- und der Bernardo-Orthogneis zeugen. Die herzynische Geschichte der Südalpen beginnt im Devon. Eine Kollisionsorogenese verdickte die Kruste und führte zu mehreren Regionalmetamorphosen mittleren Grades, die der Amphibolitfazies in der Ceneri-Zone entsprechen. Zugleich entstand durch duktile Verformungen die noch heute gut ausgebildete Schlin-

genstruktur. Nach dieser herzynischen Kompressionsphase erfolgte eine extensive Phase mit Öffnung der Tethys im Mesozoikum. Dazwischen entwickelten sich im Perm vulkanische Aktivitäten. Die ersten alpinen Über- und Rücküberschiebungen in den Südalpen, sowie die Heraushebung und Vertikalstellung der Ceneri-Zone, begannen während der späten Kreide. Im Paläogen entwickelte sich eine dextrale Transpression entlang der Insubrischen Linie und brachte mittels Hebung und Ausrichtung der Zentralalpen die Ceneri-Zone in die heutige Stellung. Vom Miozän bis heute setzte sich die transpressive Verformung entlang der Insubrischen Linie fort, verbunden mit einer Reaktivierung alter Überschiebungsflächen.

Die geologisch-geotechnischen Kenntnisse zu Beginn der Projektierung beschränkten sich im Wesentlichen auf die Blätter des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25 000 und einige ältere Publikationen. Zwischen 1991 und 2004 wurden detaillierte Oberflächenkartierungen, besonders im Bereich von Störungszonen, mehrere Bohrkampagnen und ergänzende seismische Erkundungen durchgeführt. Ein wichtiges Element der Erkundung war die Erstellung des Erkundungsstollens (CPS) im Bereich des geplanten Zwischenangriffs Sigirino. In diesem konnten zahlreiche Proben für petrographische und felsmechanische Laboruntersuchungen entnommen werden. Die ersten vertikalen Erkundungsbohrungen von 30 bis 200 m Teufe wurden zwischen 1993 und 1994 auf Stufe Vorprojekt durchgeführt und dienten zur ersten Erhebung von lithologischen und felsmechanischen Grunddaten der Gesteine im Projektgebiet entlang des Tunnelkorridors zwischen Sant'Antonino und Lugano. Die bautechnische Relevanz der Val-Colla-Linie wurde bereits in frühen Projektphasen erkannt und veranlasste zwischen 1997 und 1999 die Ausführung weiterer, teils schräger Erkundungsbohrungen von bis zu 400 m Teufe. Weitere erkundete Bereiche, mit bis 700 m langen Bohrungen, waren nebst den Portalzonen die Störungszonen in der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone. Zudem wurde ein grossflächiger Quellenkataster erhoben, bei dessen Erstellung auch die Beschaffenheit der Quellwässer erfasst wurde. Nebst den hydrogeologischen Versuchen in den Bohrlöchern dienten diese Daten der hydrogeologischen Prognose.

Um ein für die bautechnische Umsetzung geeignetes Baugrundmodell zu erstellen, wurde das lithologisch und strukturell komplexe Gebirge in geotechnisch definierte Homogenbereiche (HB) unterteilt. Innerhalb dieser Homogenbereiche sollten die Gesteinseigenschaften eine gewisse Homogenität aufweisen. In der Prognose wurden 49 Homogenbereiche definiert. Dieses Vorgehen hat sich bewährt, indem für die Festlegung der Ausbruchsicherung bereits bei der Projektierung differenzierte Grundlagen zur Verfügung standen und während des Vortriebs auch ein Soll/Ist-Vergleich erleichtert wurde. Die Schaffung von Homogenbereichen war auch sehr hilfreich für den Vortrieb, um seine geologisch-tektonische Position im Gebirge zu bestimmen und zu prüfen. Der geologische Befund umfasst insgesamt 51 Homogenbereiche, nachdem einige prognostizierte Homogenbereiche nicht angetroffen wurden, hingegen einige nicht prognostizierte auftraten

Die aufgrund der Erkundungen vorgenommene Unterteilung des Gebirges in sechs tektonische Einheiten konnte beim Vortrieb sowohl bezüglich der Anzahl wie auch ihrer lithologischen und strukturellen Beschaffenheit bestätigt werden. Hingegen wurden ihre Grenzen systematisch weiter nördlich als prognostiziert angetroffen, zwischen 84 und 366 m ausserhalb des erwarteten Streubereichs. Ursachen dafür waren die schwierige Erkundbarkeit tiefliegender Strukturen wegen der beträchtlichen Gebirgsüberlagerung und der Unwegsamkeit des Geländes. Zudem verlaufen zahlreiche Strukturen nicht linear und konnten deshalb nicht genau in die Tiefe extrapoliert werden. Dies war z.B. bei der Störungszone Val Mara der Fall. Ausserdem fielen die Trennflächen in einigen Streckenabschnitten der Ceneri-Zone flacher ein als prognostiziert.

Ein Blick auf den petrographischen Befund zeigt, dass in der nördlichen Ceneri-Zone die Ceneri-Paragneis-Formation überwiegt. Sie besteht aus Zweiglimmergneisen und -schiefern, Biotit führenden Gneisen und Schiefern mit variierendem Granat-, Staurolith- und Kyanitgehalt und lokalem Vorkommen von Kalksilikat-Knauern. Weniger verbreitet sind die Formationen mit Ceneri-Orthogneis, Hornfels und metabasischen Ganggesteine, bestehend aus Augit- und Hornblende-Spessartit.

Der Ceneri-Orthogneis zeigt wenig Variationen in seiner mineralogischen Zusammensetzung. Er lässt sich dennoch anhand seiner Leitminerale petrographisch in mehrere Lithotypen unterscheiden. Vermutlich stehen diese im Zusammenhang mit der tektonischen Position oder magmatischen Differentiation der isolierten, im Ceneri-Paragneis verstreuten Ceneri-Orthogneise.

Eine nordwärts einfallende Schieferung und Störungszonen mit Streichrichtung SSE–NNW kennzeichnen die nördliche Ceneri-Zone strukturell. Bautechnisch relevant waren die subhorizontal orientierte und Bergwasser führende Störungszone 1Cbis.1 bei Vigana und die steiler stehenden Störungszonen Val d'Isone (10B.1) und Val Mara (12Abis.1).

Die Grenze zur mittleren Ceneri-Zone wird durch die Val-Mara-Störungszone gebildet und liegt in der Oströhre 139 m nördlicher als erwartet. An dieser Grenze beginnt definitiv der Bereich des «Subparallelismus», in welchem die Schieferung und die Störungszonen mit sehr spitzem Winkel, eben subparallel, die Tunnelachse kreuzen. Durch diese ungünstige Orientierung der Strukturen änderten sich die Ereignisse (= Gefährdungsbilder im Befund) beim Vortrieb. Zuvor waren Kluftkörper an der Ortsbrust und die Ortsbrustinstabilität massgebend. In der mittleren Ceneri-Zone waren es Ablösungen, Auflockerung und Kluftkörper vorwiegend im östlichen Kämpferbereich. Die Umorientierung der Strukturen hatte bautechnische Auswirkungen. Insbesondere traten geologische Überprofile im östlichen Kämpferbereich und asymmetrische Verformungen des Hohlraumes auf, was vermehrte Sicherungsmassnahmen im Vortriebsbereich (L2) bis in den rückwärtigen Bereich des Tunnels (L3) notwendig machte.

Der Streckenabschnitt im «Subparallelismus» besteht aus mehreren Störungszonen. Die bautechnisch relevanteste und intensiv tektonisierte Störungszone liegt unterhalb der Gola di Lago (HB 15Bbis). Dieser Homogenbereich entspricht zwar seiner prognostizierten Position, weist aber wegen der tangentialen Streichrichtung eine viel grössere scheinbare Mächtigkeit von 480 m entlang der Tunnelachse

auf. Folglich ragt die Störungszone in beiden Tunnelröhren weit aus dem erwarteten Streubereich heraus. Das Gebirge im Gebiet des «Subparallelismus» ist lithologisch vielfältig aufgebaut, indem Ceneri-Paragneis, Ceneri-Orthogneis, Hornfels, Basite und Ultrabasite durchörtert wurden.

In der südlichen Ceneri-Zone sind die Strukturen nach dem Umbiegen der Schlingenstruktur nahezu parallel zur Tunnelachse ausgerichtet. Sie besteht ausschliesslich aus Gneisen und Schiefern der Giumello-Gneis-Formation. Die sehr spitzwinklige bis praktisch parallele Orientierung der Hauptschieferung und der Scherzonen gegenüber der Tunnelachse induzierte in erster Linie im Bereich der Logistikkavernen CAOP deutlich höhere asymmetrische Verformungen und deshalb Risse und Abplatzungen in der Ausbruchsicherung. Dies erforderte regelmässige Sanierungsmassnahmen im rückwärtigen Bereich. Beim Vortrieb im Giumello-Gneis wurde rasch erkannt, dass die im Projekt festgelegte Ausbruchsicherung den asymmetrischen Spannungen im Gebirge nicht standhielt. Eine allgemeine Anpassung und Optimierung der Ausbruchsicherungstypen SPV 2–4 während der Bauausführung durch Auftragen von mit Stahlfasern verstärktem Spritzbeton und Weglassen der Gitternetze erfolgte im Rahmen der Beschleunigungsmassnahmen.

Der Übergang in die Val-Colla-Linie machte sich beim südwärts verlaufenden Vortrieb bereits 186 m vor der eigentlichen Grenze bemerkbar, indem in der Oströhre die horizontalen Verformungen und geologischen Überprofile im östlichen Parament mit fortschreitendem Vortrieb deutlich zunahmen. Während der Durchörterung der Val-Colla-Linie kamen bei der Vorauserkundung Kernbohrungen schräg zur Tunnelachse sowie ergänzende Schlagbohrungen zum Einsatz. Kataklastische und kakiritische Störungszonen erforderten beim Vortrieb die schweren Ausbruchsicherungstypen (AST) SPV 7, 9 und 10 mit Ortsbrustankerung und Spiessschirm. Während der Vortriebsarbeiten zu Beginn der Val-Colla-Linie in der Oströhre bei km 237.478 ereignete sich ein 150 m^3 umfassender Niederbruch. Nach der Bewältigung des Niederbruchs konnte der Regelvortrieb nach 15 Tagen wiederaufgenommen werden.

Bei der nachträglichen Überprüfung des geologischen Modells wurde die Val-Colla-Linie in zwei Homogenbereiche aufgeteilt. Der nördliche Homogenbereich (HB 30A) besteht hauptsächlich aus Störungszonen mit Störungsbrekzie und Gesteinsmehl, während der südliche Homogenbereich (HB 30B) entgegen der Prognose wenig bis ungestörten Gneis und Schiefer vom Typ 1a und 1b beinhaltet und den Einbau des Ausbruchsicherungstyps SPV 4 ohne Stahlbögen ermöglichte. Die günstigeren Gebirgsverhältnisse wirkten sich positiv auf den Bauprozess aus, sodass nach der Durchörterung der Val-Colla-Linie der bisher angefallene Rückstand auf das Bauprogramm aufgeholt werden konnte.

In den beiden südlichsten tektonischen Einheiten, der nördlichen und südlichen Val-Colla-Zone, überwiegen Muskovit-Granat führende Gneise und Schiefer, Granat führende Biotitgneise oder Alumosilikat führende Zweiglimmergneise, welche alle zur Stabbiello-Gneis-Formation zählen. Weitere Lithologien, wie der leukokrate Muskovit führende Augengneis der Bernardo-Orthogneis-Formation und die Hornblende führenden Gneise und Schiefer, welche zur Formation der Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone gehören, waren von geringerer Verbreitung.

150 m nach dem Beginn der Val-Colla-Zone nimmt die Gebirgsüberlagerung laufend ab und begünstigte damit die Vortriebsarbeiten. Anderseits erforderte die geringere Gebirgsüberlagerung beim Vortrieb im dicht besiedelten Gebiet Arbeitseinschränkungen, um die Immissionen wegen Erschütterungen und Körperschall zu minimieren.

Die einzigen geotechnischen Schwierigkeiten in der Val-Colla-Zone traten im Bereich des Verzweigungsbauwerks Sarè auf, indem kataklastische Störungszonen mit grösser werdendem Kavernenquerschnitt eine Zunahme der Verformungen und geologischen Überprofile bewirkten sowie zu einer Verminderung der Ortsbruststabilität führten. Die Ausbruchsarbeiten in den beiden Kavernen erforderten zusätzliche Vorauserkundungen mit Schlag- und Kernbohrungen sowie eine Anpassung der Ausbruchsicherung. Weiter wurden in mehreren Streckenabschnitten im Störungszonenbereich Gitterbögen eingebaut. Es bewährte sich zudem, den letzten Abschnitt in beiden Kavernen mit Hilfe eines unterteilten Kalottenvortriebs auszuführen.

Mit Ausnahme des Bereichs beim Nordportal Vigana, wo Quellen mit initialen Schüttungsmengen bis 20,5 l/s austraten und die stationären Schüttungsmengen zwischen 15 und 28 l/s erreichten, wurden weniger und deutlich geringere Bergwasserzutritte beim Vortrieb angetroffen als prognostiziert. Dies ist auf eine zu hohe Einschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit des Gebirges zurückzuführen, welche aus den Bohrlochversuchen extrapoliert wurde.

Die hydrogeologischen Auswertungen bestätigten die Unterscheidung von zwei unterschiedlichen Aquiferen. In den ersten 400 m ab Nordportal Vigana wurde ein ungespannter Hangaquifer angetroffen, welcher wegen Trennflächen und Oberflächen-Auflockerung (wohl vor allem Talklüftung durch Entlastung des Gebirges nach Rückzug des Eises am Ende der letzten Eiszeit) hydraulische Verbindungen mit der Oberfläche aufwies. Die Beschaffenheit und das Ausflussverhalten der Quellwässer in der restlichen Tunnelstrecke (rund 97% der Gesamtstrecke) deuten darauf hin, dass sonst nur kleine, isolierte und mit altem Grundwasser gefüllte Aquifere auftraten, ohne Hinweise auf Oberflächeneinflüsse. Das Bergwasser zeigte allgemein eine für kristalline Aquifere typische geringe Gesamtmineralisation und stets basischen Charakter. Einige Wässer sind allerdings relativ hoch mineralisiert und stark ionengetauscht, d.h. bei den Kationen dominieren die Alkalimetalle. Es waren Wässer aus isolierten, lange im Untergrund verweilenden Vorkommen. Der Chemismus aller Wässer zeigte nur schwach aggressiven Charakter. Die Drainageleitungen wurden vorsorglich mit Vorrichtungen zur Härtestabilisierung des Bergwassers versehen.

Die Felstemperaturen, die zwischen 13,8 und 23,0 °C lagen, ergaben einen durchschnittlichen geothermischen Gradienten von 22,0 °C/km. Dieser geothermische Gradient ist typisch für das Grundgebirge der Südalpen. Grössere Anomalien wurden nicht beobachtet. Alle Werte lagen innerhalb der Bandbreite der Prognose.

Obschon während der Erkundungsphase keine Hinweise auf das Vorkommen radioaktiver Minerale gefunden wurden, fanden kontinuierliche Messungen der Konzentration

von Radon (^{222}Rn) statt. Die gesetzlichen Grenzwerte wurden nie überschritten.

Nachdem beim Vortrieb in der Weströhre serpentinitähnliche Gesteine angetroffen wurden, die verdächtigt wurden, lungengängige Asbestfasern zu enthalten, wurde ein Konzept mit Massnahmenplan zur Abwehr von Asbestrisiken erstellt. In Tunnelbereichen mit Amphibolit führenden Gesteinen in der mittleren Ceneri-Zone und in der Val-Colla-Zone kam dieses Asbestkonzept zu Einsatz. Die durchgeführten Analysen brachten keine Hinweise auf lungengängige Asbestfasern.

Parallel zu den Vortriebsarbeiten wurde ein umfassendes Überwachungskonzept mit Verformungs- und Extensometermessungen zur Minimierung der Risiken während der Durchörterung der verschiedenen Homogenbereiche umgesetzt. Die Art und Häufigkeit der geotechnischen Messungen waren in Bezug auf die spezifischen geotechnischen Anforderungen der einzelnen Homogenbereiche im Ausführungsprojekt vorgegeben und wurden während der Ausführung z.T. angepasst. Mit den Verformungsmessungen war es möglich, einerseits die Eignung der festgelegten Ausbruchsicherungstypen kontinuierlich zu prüfen und die Defomationen mit den prognostizierten Werten zu vergleichen. Anderseits waren die Verformungsmessungen Bestandteil zur Bestimmung der Stabilisierungsphase der Verformungen für den Einbau der Sohle.

Zusätzlich zu den oben erläuterten Erkundungsmassnahmen im Rahmen der Projektierung, wurden bei allen Vortrieben mit Ausnahme des Erkundungsstollens und des Zwischenangriffs Sigirino systematisch Schlag- und Kernbohrungen beim Vortrieb zur Vorauserkundung eingesetzt. Für die Durchörterung des «Subparallelismus» und der Val-Colla-Linie wurden zusätzlich Kernbohrungen eingesetzt.

Während der Bauausführung wurden für die Beurteilung von bautechnischen Risikozonen, zu denen der «Subparallelismus», die Störungszonen der Ceneri-Zone, die Val-Colla-Linie, das Anschlussbauwerk Vigana, die Logistikkavernen CAOP und die Verzweigungsbauwerke Sarè zählen, zusätzlich vertiefte geomechanische Laboruntersuchungen wie Punktlastversuche, ein- und triaxiale Druckversuche sowie spezielle triaxiale Druckversuche an Gesteinsproben aus der Val-Colla-Linie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (ETHZ) durchgeführt.

Die Ereignisse wie Kleinsteinfall, Ablösungen, Kluftkörper und Ablösungen, die in der Prognose als Gefährdungsbilder bezeichnet wurden, waren eng an die Beschaffenheit des Gesteins und die Orientierung der Trennflächen gebunden. Die Grösse der Kluftkörper lag im Mittelwert zwischen 1 und 4 m^3 im Tunnelprofil und zwischen 2 und 10 m^3 an der Ortsbrust. Insgesamt ereigneten sich in der Oströhre neben dem Niederbruch in der Val-Colla-Linie zwei weitere grössere Niederbrüche bei km 231.633 und km 233.559 mit Volumen von 280 m^3 und 330 m^3.

Das Erkennen plastischer Verformungen war schwierig, denn die Verformungs- und Extensometermessungen ergaben keine eindeutigen Hinweise. In den meisten Fällen, insbesondere im Bereich von Störungszonen und im «Subparallelismus», deuteten die Verformungen a priori auf anisotrope Spannungsumlagerungen hin. So wurden in den Störungszonen der Val-Colla-Linie (HB 30A) hauptsächlich vertikale Verformungen festgestellt, die auf die Auflockerung im Firstbereich zurückzuführen waren. Im Giumello-Gneis traten auf einigen Streckenabschnitten länger anhaltende Verformungen (in Scher- und Störungszonen in der Umgebung der CAOP) auf, welche sich als ein Phänomen einer sekundären und partiellen Plastifizierung der aufgelockerten Gesteinsmasse erklären lassen.

Im Zeitraum zwischen dem 09.07.2012 und dem 28.07. 2014 ereigneten sich beim Nordvortrieb ab dem Zwischenangriff Sigirino regelmässig Entspannungsschläge, mit welchen in der Projektierungsphase nicht gerechnet worden. Diese Ereignisse traten vorwiegend im Ceneri-Orthogneis und -Paragneis mit isotroperem Gefüge auf und erforderten einen Massnahmenplan zur Reduzierung der Risiken.

Die bautechnischen Anforderungen beim Vortrieb des CBT mit seiner Vielfalt und Komplexität der Untertagebauwerke erforderten bei der Projektierung und Ausführung eine an die vielen unterschiedlichen Ausprägungen des Gebirges angepasste Festlegung der Ausbruchsicherung. Deshalb wurden entlang der Tunnelachsen bei jedem der drei Baulose andere Ausbruchsicherungstypen eingesetzt, die während der Ausführungsphase an die lokalen geologisch-bautechnischen Felsverhältnisse angepasst wurden.

Wegen der niedrigen Gebirgsüberlagerung über den beiden Portalbereichen und im Südvortrieb ab dem Zwischenangriff Sigirino wurden mit Hilfe einer kontinuierlichen Überwachung mit Erschütterungsmessungen bei nahegelegenen Bauwerken und sensiblen Infrastruktureinrichtungen umgehend auf das Überschreiten von Grenzwerten reagiert. Wegen der Schwierigkeit, die Rayleigh-Werte für den Baugrund in Bezug auf die verschiedenen Gebäudeempfindlichkeiten zu definieren, hat ATG als Vorsichtsmassnahme dazu veranlasst, geringfügig niedrigere Grenzwerte als den Standard festzulegen. Mit vertraglich definierten Einschränkungen für Sprengzeiten und Vortriebsarbeiten wurden zusätzliche Erschütterungen und Körperschall während sensiblen Tageszeiten verringert. Die seismischen Messungen erreichten geringere Ergebnisse als erwartet, deswegen konnten die Einschränkungen reduziert oder teilweise aufgehoben werden.

Die Überwachung der wichtigen Infrastrukturbauwerke, wie der Autobahn A2, der SBB-Bahnlinie in Vigana und Vezia sowie des Strassentunnels Vedeggio – Cassarate waren Bestandteil spezieller Überwachungskonzepte. Im Rahmen der Unterquerung der Autobahn A2 in Vigana wurde anhand von geodätischen Messpunkten und Inklinometermessungen die Oberflächenverformung in Echtzeit überwacht, um frühzeitig Absenkungen der Fahrbahn zu erkennen. Eine weitere Überwachungsmassnahme erforderte die knapp 150 m weiter südlich gelegene SBB-Bahnlinie, indem die Vertikalverschiebungen an Oberleitungsmasten und an der Felsoberfläche im Bereich der Gleise gemessen wurden.

Wegen der geringen vertikalen Distanz von 4 m zwischen CBT und dem darunter fast rechtwinklig kreuzenden Strassentunnel Vedeggio – Cassarate bestand das Überwachungskonzept im Kreuzungsbereich aus manuellen und automatischen Messungen mittels Extensometer, Inkrex und Inklinometer in tunnelnahen Bohrlöchern. Der Tunnel Vedeggio – Cassarate war zum Zeitpunkt des Auffahrens des CBT in diesem Bereich bereits im Rohbau fertiggestellt.

Im Hinblick auf das sehr anspruchsvolle Bauprogramm wurden durch die Bauherrschaft nachträglich verschiedene Massnahmen bestellt, um die Vortriebsleistungen zu optimieren. Eine der wichtigsten war die Beschleunigungsmassnahme «Zwischenangriff Nordvortrieb» im Baulos Sigirino, die zwischen März und Mai 2015 ausgeführt wurde, mit dem Ziel, den Rückstand der Oströhre auf die vorauseilende Weströhre mit Hilfe eines dritten Vortriebes aufzuholen. Dabei wurde über den Querschlag 6 ein zusätzlicher Vortrieb der Oströhre eingerichtet, der über die vorauseilende Weströhre versorgt wurde.

Die angetroffenen geologischen und geotechnischen Bedingungen führten zu sehr unterschiedlichen Vortriebsleistungen. Im Nordvortrieb Sigirino verzögerten sich die Ausbruchsarbeiten im Vergleich zum Soll-Bauprogramm um ungefähr ein Jahr. Umgekehrt konnte der Südvortrieb Sigirino angesichts der günstigen geologisch-geotechnisch Bedingungen und der Lockerung der Vortriebseinschränkungen hinsichtlich Erschütterungen und Körperschall ein Jahr früher als geplant beendet werden.

Riassunto

La Galleria di base del Ceneri (GbC) è una galleria ferroviaria lunga ca. 15,5 km, composta da due tubi a binario unico, il cui tracciato è situato nel Cantone Ticino. Essa servirà da collegamento meridionale alla Galleria di base del San Gottardo per il progetto infrastrutturale della Nuova ferrovia transalpina (NFTA).

L'opera collega geograficamente la regione del Sopraceneri e del Sottoceneri e svolge quindi un'importante funzione per il collegamento interregionale. La realizzazione della Bretella Locarno – Lugano in prossimità del portale nord permette un collegamento diretto tra le città di Lugano e Locarno e riduce i tempi di percorrenza dagli odierni 60 a 30 minuti.

Il tubo est della GbC raggiunge tra il portale nord di Vigana ed il portale sud di Vezia una lunghezza complessiva di 15,475 km. La realizzazione grezza della GbC è stata appaltata in cinque lotti distinti: la zona portale nord di Vigana, la tratta di galleria Ceneri nord, il dispositivo di attacco inclusa la Finestra di Sigirino (FIS), il cunicolo di prospezione (CPS), la tratta di galleria Ceneri sud e la zona del portale sud di Vezia. Il dispositivo di attacco intermedio di Sigirino corrisponde all'elemento chiave del concetto degli avanzamenti in sotterraneo. Tale dispositivo comprende la caverna operativa (CAOP), collegata con l'area logistica di cantiere esterna dei Prati di Regada tramite le discenderie CPS e FIS in modo da realizzare gli avanzamenti in direzione nord e sud. Il villaggio di cantiere, l'area di installazione Prati di Regada e il deposito esterno per il materiale di scavo non riutilizzabile costituiscono le infrastrutture esterne del cantiere.

Tra le opere secondarie, vi sono i 48 cunicoli trasversali che collegano tra di loro i due tubi mediamente ogni 316 m e sono parte integrante del concetto di sicurezza in caso di emergenza. Tra le ulteriori opere secondarie vi sono le caverne di ventilazione, la caverna per la produzione di calcestruzzo (CPC), due bypass logistici e la bretella Lugano-Bellinzona al portale nord. Il totale delle tratte scavate, considerando sia le opere principali che secondarie, equivale a 39,780 km.

Il cunicolo di prospezione CPS, lungo 3,1 km, ha svolto la funzione di collegamento logistico per il trasporto dei materiali da costruzione e lo smaltimento del materiale di scavo durante tutta la realizzazione della caverna operativa CAOP. Lo scavo della FIS, lungo 2,3 km, è stato effettuato tramite una fresa meccanica a piena sezione aperta (TBM), mentre per le altre opere principali e secondarie gli avanzamenti in roccia sono stati realizzati con scavo all'esplosivo.

Le sezioni di scavo delle gallerie a binario unico variano, in funzione del profilo tipo di sostegno (PTS), da 62 a 87 m^2. Nella caverna di Vigana, nella CAOP e nella diramazione di Sarè, invece, le sezioni di scavo massime sono state rispettivamente di 232 m^2, 238 m^2 e 298 m^2.

Il tracciato della GbC è situato interamente all'interno del basamento cristallino delle Alpi Meridionali. Nel progetto, le Alpi Meridionali sono state suddivise in tre zone tettoniche.

L'unità tettonica della Zona Ceneri (CZ), spesso nominata in letteratura Zona Strona Ceneri (StrCZ), confina a nord con la Linea Insubrica ed interessa due terzi del tracciato della galleria. La restante tratta si trova all'interno della Linea Val Colla e la Zona Val Colla nella tratta meridionale, dove la prima separa le due zone.

Nel progetto, la Zona Ceneri è suddivisa in tre unità tettoniche, mentre la Zona Val Colla in due unità tettoniche. L'intero tracciato attraversa dieci formazioni geologiche differenti.

La Linea Val Colla costituisce il confine tra le zone tettoniche sopracitate. Per le sue caratteristiche geologiche e geotecniche sfavorevoli, era considerata il punto chiave per la realizzazione dell'intera opera. Ulteriori tratte rilevanti, dal punto di vista costruttivo, sono state pronosticate nella Zona Ceneri e comprendono la tratta con le strutture principali orientate da subparallela a parallela al tracciato della galleria, che nel progetto è stata definita come «subparallelismo», le zone disturbate Val d'Isone, Val Mara e Gola di Lago. La zona disturbata Gola di Lago è denominata in questo rapporto come «zona intensamente tettonizzata».

La tratta scavata nel basamento delle Alpi Meridionali è costituita da eventi polifasici, prealpini ed alpini. In tal modo si sono generate complesse sequenze litologiche e strutturali di diversi metamorfiti, antiche strutture duttili e giovani strutture di tipo fragili quali zone di taglio e zone disturbate, la cui evoluzione tettono-metamorfica è compresa tra l'orogenesi alpina fino al Precambriano. La crosta continentale formatasi nel Precambriano ha subito in parte processi di metamorfismo di alta temperatura, data la sua composizione di sedimenti e vulcaniti che furono compressi e successivamente subdotti durante l'orogenesi caledoniana (dal Cambiano fino all'Ordoviciano). La deformazione duttile è visibile localmente nella foliazione e nelle pieghe relitte. Questo ciclo orogenico termina con intrusioni granitiche i cui testimoni sono l'Ortogneiss del Ceneri e del Bernardo. L'evoluzione del Sudalpino inizia nel Devoniano, con inspessimento della crosta dell'orogene di collisione che ha portato a metamorfosi regionali di medio grado quale la facies anfibolitica nella Zona Ceneri. Allo stesso tempo, le deformazioni duttili hanno generato la «Schlingenstruktur», oggi ancora ben sviluppata. Dopo questa fase di compressione ercinica è seguita una fase estensiva con l'apertura della Tetide nel Mesozoico. Tra le due fasi si ebbe l'inizio dell'attività vulcanica nel Permiano. I primi sovrascorrimenti e retroscorrimenti nel Sudalpino, come anche la risalita e la verticaliz-

zazione della Zona Ceneri, iniziarono nel tardo Cretacico. Nel Paleogene si sviluppò una transpressione destra lungo la Linea Insubrica che portò, tramite innalzamento e allineamento delle alpi centrali, alla posizione attuale della Zona Ceneri. Dal Miocene ad oggi, la deformazione transpressiva lungo la Linea Insubrica è continuata combinandosi con la riattivazione di antiche superfici di sovrascorrimento.

Le conoscenze geologiche e geotecniche all'inizio del progetto si limitavano essenzialmente ai fogli dell'Atlante svizzero 1:25 000 e ad alcune pubblicazioni datate. Tra il 1991 ed il 2004 vennero effettuate diverse campagne di rilievi geologici di superficie, in particolare in prossimità delle zone disturbate sono state realizzate ulteriori campagne di sondaggi geognostici e indagini sismiche supplementari. Un elemento importante dell'indagine è stato la scavo di un cunicolo di prospezione (CPS) situato nella posizione prevista del dispositivo di attacco intermedio di Sigirino. Tale scavo ha consentito di prelevare numerosi campioni di roccia per indagini di laboratorio quali analisi petrografiche e prove geomeccaniche. I primi sondaggi esplorativi verticali di profondità da 30 a 200 m sono stati realizzati tra il 1993 e il 1994 in fase di pre-progetto e hanno consentito la raccolta dei primi dati litologici e geomeccanici dell'ammasso roccioso situato tra Sant'Antonino e Lugano. La rilevanza costruttiva della Linea Val Colla è stata riconosciuta già nelle prime fasi del progetto ed ha portato all'esecuzione di ulteriori sondaggi esplorativi, in parte inclinati, fino a 400 m di profondità tra il 1997 e il 1999. Altre aree indagate, con sondaggi fino a 700 m di lunghezza, sono state, oltre alle zone dei portali, le zone disturbate nelle Zone Ceneri Nord ed Intermedia. La prognosi ha previsto inoltre l'allestimento di un catasto delle sorgenti d'acqua durante il quale sono state rilevate le caratteristiche chimico-fisiche delle sorgenti. Oltre alle prove di pompaggio effettuate nei fori di sondaggio, questi dati sono stati utilizzati per la prognosi idrogeologica.

Al fine di creare un modello del sottosuolo adatto alla realizzazione costruttiva, la complessità e la varietà dell'ammasso roccioso ha richiesto in sede di prognosi la suddivisione del tracciato GbC in 49 tratte omogenee (TO). All'interno delle tratte omogenee le proprietà dell'ammasso roccioso dovrebbero avere caratteristiche geotecniche simili. Questa procedura ha dimostrato la sua validità fornendo basi per la definizione preventiva delle classi di messa in sicurezza durante la fase di progettazione. Nel corso degli scavi la procedura ha consentito il confronto fra prognosi e riscontro. L'istituzione delle tratte omogenee ha fornito inoltre supporto all'avanzamento in modo da definire e verificare la sua posizione geologica-tettonica nell'ammasso roccioso. Il riscontro geologico comprende in totale 51 tratte omogenee, di cui alcune previste a progetto non sono state riscontrate, mentre sono state riscontrate altre non precedentemente pronosticate.

La suddivisione in sei unità tettoniche, effettuata sulla base delle campagne geognostiche, ha potuto essere confermata durante la fase esecutiva sia in termini di quantità che di conformazione litologica e strutturale. Per contro, i limiti sono stati riscontrati sistematicamente più a nord del previsto, tra 84 e 366 m al di fuori del campo di variabilità. Ciò era dovuto alla difficoltà di prospezione delle strutture profonde a causa della notevole copertura e impraticabilità del terreno. Inoltre le strutture geologiche in profondità non presentano uno sviluppo lineare e quindi la loro giacitura non può essere facilmente estrapolata. Questo è il caso, ad esempio, della zona disturbata della Val Mara. Anche in alcune tratte della Zona Ceneri le discontinuità mostrano giaciture tendenzialmente più orizzontali rispetto a quelle previste.

Riguardo al riscontro petrografico, nella Zona Ceneri Nord predomina la formazione del Paragneiss del Ceneri (PGC), costituita da gneiss e scisti a due miche, gneiss a biotite e scisti talora con granato, staurolite e cianite come pure con la presenza localizzata di noduli di silicati di calcio. Meno frequenti sono le formazioni dell'Ortogneiss del Ceneri, dello Gneiss cornubianitico e dei filoni metabasitici, costituiti da spessartiti contenenti augite ed orneblenda.

L'Ortogneiss del Ceneri mostra poche variabilità nella sua composizione mineralogica. Ciononostante, può essere suddiviso in diversi litotipi in base ai suoi minerali principali. Presumibilmente tali minerali sono legati alla posizione tettonica oppure alla differenziazione magmatica degli Ortogneiss isolati e disseminati all'interno del Paragneiss del Ceneri.

La Zona Ceneri Nord è contraddistinta da una scistosità immergente verso nord e da zone disturbate con giacitura in direzione SSE–NNO. Di rilevanza geologico-strutturale si sono rivelate le zone disturbate 1Cbis.1 a giacitura suborizzontale a Vigana, in Val d'Isone (10B.1) e presso la Val Mara (12Abis.1) con angolo d'immersione più ripido.

Il confine con la Zona Ceneri Intermedia è formato dalla zona disturbata Val Mara che è stata riscontrata 139 m più a nord di quanto preventivato. In corrispondenza di tale limite inizia definitivamente il «subparallelismo», caratterizzato da un'intersezione ad angolo acuto della scistosità e delle zone disturbate con l'asse della galleria. Con la giacitura sfavorevole delle principali strutture si sono registrati cambiamenti degli eventi (= scenari di pericolo nella prognosi) durante l'avanzamento.

Prima di tale cambiamento, i corpi elementari e l'instabilità del fronte erano determinanti. In seguito, nella Zona Ceneri Intermedia si sono verificati sfaldamenti, allentamenti e corpi elementari prevalentemente nel paramento orientale. Il riorientamento delle strutture geologiche ha comportato conseguenze di tipo tecnico-costruttive con la formazione di sovraprofili nel paramento orientale e la deformazione asimmetrica del profilo del cavo. Di conseguenza si sono resi necessari interventi costruttivi con la messa in sicurezza aggiuntiva in prossimità del fronte di scavo (L2) e nelle tratte antecedenti (L3).

La tratta del «subparallelismo» è costituita da diverse zone disturbate, tra le quali la più importante dal punto di vista della rilevanza costruttiva e maggiormente intensamente tettonizzata è risultata essere ubicata al di sotto della località di Gola di Lago (TO 15Bbis). Sebbene la posizione di tale TO corrisponda a quella pronosticata, questa mostra uno spessore apparente maggiore di 480 m a causa della sua giacitura tangenziale rispetto all'asse di scavo. Di conseguenza, la zona disturbata si protrae in entrambi i tubi ben oltre il campo di variabilità previsto. L'ammasso roccioso nella regione del «subparallelismo» è composto da varie litologie tra le quali il Paragneiss del Ceneri, Ortogneiss del Ceneri, Gneiss cornubianitico, Basiti ed Ultrabasiti del Ceneri.

A seguito della rotazione del piegamento regionale differenziato (Schlingenstruktur), le principali strutture geologiche nella Zona Ceneri Sud sono disposte parallelamente all'asse di scavo della galleria. La Zona Ceneri Sud consiste esclusivamente da gneiss e scisti della formazione dello Gneiss del Giumello. La giacitura della scistosità principale, tendenzialmente parallela all'asse di scavo, e le zone di taglio, hanno indotto ad elevate deformazioni asimmetriche e conseguenti fessurazioni e distacchi di alcune porzioni di rivestimento di prima fase in corrispondenza della Caverna Operativa CAOP. Tali zone hanno successivamente richiesto interventi di risanamento. Durante gli avanzamenti si è notato che i rivestimenti provvisori definiti in fase di progetto non erano adeguati alle tensioni asimmetriche presenti nell'ammasso roccioso. Si è quindi reso necessario l'adeguamento e l'ottimizzazione del profilo tipo di sostegno SPV 2–4 mediante l'aggiunta di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato e l'omissione delle reti elettrosaldate.

Le evidenze del passaggio nella Linea Val Colla erano riconoscibili 186 m prima rispetto a quanto pronosticato per l'avanzamento in direzione sud, in quanto le deformazioni orizzontali e i sovraprofili geologici nel paramento orientale del tubo est sono aumentate in modo significativo con il protrarsi dell'avanzamento. Durante questa fase di avanzamento, il concetto di prospezione ha visto l'esecuzione di sondaggi carotati integrati con sondaggi distruttivi eseguiti sia in parallelo che in obliquo rispetto all'asse della galleria. Data la presenza di zone disturbate di tipo cataclasitiche e kakiritiche si è resa necessaria la posa di profili tipo di messa in sicurezza pesanti quali SPV 7, 9 e 10 provvisti di ancoraggi al fronte e ombrello di infilaggi in calotta. All'inizio degli scavi nella Linea Val Colla nel tubo est al km 237.478 si è verificato un rilascio al fronte di 150 m^3. I lavori di avanzamento, a seguito dei provvedimenti attuati, sono stati ripresi dopo 15 giorni di fermo avanzamento.

La successiva revisione del modello geologico della Linea Val Colla è stata suddivisa in due tratte omogenee. La tratta omogenea settentrionale (30A) si compone prevalentemente da zone disturbate con materiali di faglia tipo fault breccia e fault gouge, mentre la tratta omogenea meridionale (30B), contrariamente a quanto pronosticato, da rocce da poco a non disturbate quali gneiss e scisti del tipo 1a e 1b che hanno consentito la posa di provvedimenti di sicurezza del tipo SPV 4 sprovvisti di centine. Le condizioni geomeccaniche più favorevoli rispetto a quelle preventivate hanno avuto un risvolto positivo sulla resa dell'avanzamento permettendo di recuperare il ritardo accumulato nelle tratte scavate in precedenza.

Nelle due unità tettoniche meridionali, Zona Val Colla Nord e Sud, predomina la formazione geologica dello Gneiss Stabbiello che è composta da gneiss e scisti a muscovite e granato, gneiss biotitici a granato, gneiss a due miche con allumosilicati. Le altre litologie riscontrate sono, per ordine d'importanza: gneiss occhiadini leucocratici appartenenti all'Ortogneiss Bernardo, gneiss e scisti ad orneblenda appartenenti alle Basiti e Semibasiti della Zona Val Colla.

A 150 m dall'inizio della Zona Val Colla si ha l'inizio della diminuzione della copertura che ha favorito le attività di scavo. Per contro, la riduzione della copertura durante l'avanzamento in presenza di aree densamente popolate ha comportato delle limitazioni alle attività di avanzamento per contenere la propagazione delle vibrazioni e l'emissione di rumore. A causa delle emissioni inferiori alle previsioni, è stato possibile ridurre le restrizioni contrattuali e in tal modo ottenere un vantaggio di un anno sul programma dei lavori.

Le sole difficoltà geotecniche riscontrate durante l'avanzamento nella Zona Val Colla si sono manifestate durante lo scavo della diramazione di Sarè. La concomitanza di zone disturbate cataclasitiche e sezioni di scavo vieppiù maggiori ha comportato un aumento delle convergenze del profilo di scavo e maggiori sovraprofili con aumento dell'instabilità del fronte. Suddette circostanze hanno reso necessario ulteriori sondaggi distruttivi e carotati e adattamenti della messa in sicurezza. In alcune tratte di zone disturbate sono state posate centine reticolari. Per le tratte finali, in entrambe le caverne si è optato per la parzializzazione del fronte di scavo tramite lo scavo di un cunicolo pilota.

Fatto salvo la zona del portale nord di Vigana, dove sono state riscontrate venute d'acqua con portate iniziali nell'ordine di 20,5 l/s e dove persiste tutt'oggi una portata in regime stazionario variabile tra 15 e 28 l/s, le venute d'acqua riscontrate nella GbC sono risultate molto contenute e sensibilmente inferiori rispetto a quanto pronosticato in sede di progetto. Questo a causa della sopravvalutazione della conducibilità idraulica dell'ammasso roccioso stimata nelle prove di permeabilità effettuate nei fori di sondaggio in sede di progetto.

Le valutazioni idrogeologiche hanno confermato un modello idrogeologico composto da due acquiferi separati. Nei primi 400 m dal portale di Vigana è presente un acquifero di versante caratterizzato da una permeabilità dovuta al grado di interconnessione delle discontinuità dell'ammasso roccioso ed all'allentamento dell'ammasso roccioso presente sulla superficie del versante (presumibilmente causato dal rilascio tensionale dell'ammasso roccioso a seguito del ritiro dei ghiacci alla fine dell'ultima glaciazione). La conformazione e la modalità di manifestazione delle venute d'acqua nelle restanti tratte in sotterraneo (circa il 97% dell'intera galleria) indicano la presenza di piccoli acquiferi isolati composti da antiche acque profonde senza apporti da acque di superficie. In generale, le venute d'acqua rilevate durante gli scavi sono risultate essere debolmente mineralizzate e tendenzialmente basiche, come solitamente riscontrabile negli acquiferi presenti nel basamento cristallino. Tuttavia, alcuni campioni d'acqua sono risultati essere relativamente altamente mineralizzati e fortemente ionizzati, ovvero con prevalenza di metalli alcalini tra i cationi. Si tratta di acque provenienti da acquiferi isolati rimasti a lungo nel sottosuolo. Tutti i campioni di acqua analizzati sono risultati essere debolmente aggressivi. Come misura precauzionale, le condotte di drenaggio sono state predisposte per una eventuale messa in esercizio di un sistema di condizionamento per il trattamento delle acque di montagna.

Le temperature dell'ammasso roccioso, che oscillavano tra 13,8 e 23,0 °C, risultano in un gradiente termico di 22,0 °C/km. Tale gradiente è tipico del basamento cristallino del Sudalpino. Non sono state osservate anomalie di maggiore entità. Tutti i valori rientrano nell'intervallo della prognosi.

Nonostante nella fase di prognosi non siano stati identificati minerali contenenti elementi radioattivi, sono state eseguite misurazioni in continuo della concentrazione di radon ^{222}Rn. I limiti di legge non sono mai stati superati.

Nel corso dell'avanzamento in canna ovest, a seguito del ritrovamento di un campione di roccia con caratteri macroscopici simili a quelli di una serpentinite, è stato allestito un concetto con un piano di misure per contrastare i rischi legati all'amianto. Tale concetto è stato successivamente applicato nelle tratte con presenza di ammassi rocciosi caratterizzati da litologie quali anfiboliti nella Zona Ceneri e Zona Val Colla. Le analisi effettuate non hanno rivelato alcuna evidenza di fibre di amianto respirabili.

Durante la fase esecutiva, parallelamente alle attività di avanzamento, il programma di sorveglianza prevedeva la posa di sezioni di misurazione degli spostamenti 3D del profilo di scavo e sezioni attrezzate con un numero variabile di estensimetri multibase al fine di contenere i rischi durante gli avanzamenti. La tipologia e la frequenza di applicazione dei dispositivi di monitoraggio erano tarate sulla base delle specifiche esigenze geotecniche delle singole tratte omogenee in fase progettuale e venivano adattate durante la fase esecutiva. Il monitoraggio in corso d'opera si poneva gli obiettivi di valutare l'adeguatezza dei provvedimenti di sicurezza adottati, confrontare le deformazioni rilevate con i valori previsti in fase di progetto ed infine definire la tempistica esecutiva della realizzazione della platea oppure dell'arco rovescio.

Oltre alle campagne di prospezione geognostica effettuate in fase di progetto, durante tutti gli avanzamenti, ad eccezione del cunicolo di prospezione CPS e del dispositivo di attacco intermedio di Sigirino, le prospezioni geognostiche sono avvenute tramite prospezioni in avanzamento con sondaggi distruttivi e sondaggi carotati per la prospezione del «subparallelismo» e della Linea Val Colla.

Durante la fase esecutiva si è reso necessario effettuare analisi di laboratorio geomeccaniche approfondite per le tratte di scavo con maggiori difficoltà tecnico-costruttive quali il «subparallelismo», le zone disturbate della Zona Ceneri, la Linea Val Colla, le caverne di Vigana e la diramazione di Sarè. Le analisi hanno compreso prove di point load test, compressione monoassiale e triassiale e compressione triassiale speciale su campioni estratti dalla Linea Val Colla effettuate dal Politecnico federale di Zurigo (ETHZ).

Gli eventi come la caduta sassi, distacchi e formazione di blocchi elementari definiti nella prognosi come scenari di pericolo erano strettamente correlati alla natura dell'ammasso roccioso e l'orientazione delle discontinuità. Il volume dei blocchi elementari era mediamente compreso tra 1 e 4 m^3 dal contorno del cavo e tra 2 e 10 m^3 per i distacchi dal fronte di scavo. In totale, nel tubo est, oltre al rilascio nella Linea Val Colla, si sono verificati due ulteriori rilasci di maggiore rilevanza al km 231.633 per un volume di 280 m^3 ed al km 233.559 per un volume pari a 330 m^3.

Il riconoscimento delle deformazioni plastiche è risultato in generale difficoltoso poiché le misure estensimetriche e di convergenza non fornivano indicazioni chiare. Nella maggior parte dei casi, in particolare in prossimità di zone disturbate e del «subparallelismo», le deformazioni indicavano a priori la redistribuzione anisotropa delle tensioni. Nelle zone disturbate della Linea Val Colla (TO 30A) sono state rilevate principalmente deformazioni verticali, dovute all'allentamento dell'ammasso roccioso in volta. In talune tratte di scavo attraverso lo Gneiss Giumello si sono verificate deformazioni protratte nel tempo (nelle zone disturbate e nelle zone di taglio in prossimità della CAOP) interpretabili come un fenomeno di una secondaria e parziale plasticizzazione dell'ammasso roccioso allentato.

Nel periodo intercorso tra il 09.07.2012 e il 28.07.2014, durante gli avanzamenti a nord a partire dall'attacco intermedio di Sigirino, si sono regolarmente manifestati detensionamenti non previsti in fase progettuale. Tali eventi si sono verificati principalmente nell'Ortogneiss del Ceneri come anche nel Paragness del Ceneri caratterizzati da tessitura isotropica ed hanno richiesto un piano di intervento per limitare il rischio legato a questa tipologia di eventi.

I requisiti tecnico-costruttivi dello scavo della GbC, caratterizzato da varie e complesse opere sotterranee, hanno richiesto sia in fase progettuale che in fase esecutiva la definizione del rivestimento in base all'ammasso roccioso. Per questo motivo sono stati installati, per ciascuno dei tre lotti di costruzione, differenti profili di tipo di sostegno, adattati di volta in volta alle condizioni geologico-geotecniche riscontrate durante lo scavo.

Le ridotte coperture presenti in prossimità dei due portali e lungo la tratta di scavo in direzione sud dal dispositivo di attacco intermedio di Sigirino hanno richiesto un monitoraggio continuativo delle vibrazioni trasmesse in superficie ad opere ed infrastrutture sensibili, in grado di reagire prontamente in caso di misurazione di valori limite. A causa della difficoltà nel definire i valori delle onde di Raylight per il terreno in relazione alle svariate sensibilità degli edifici, ATG ha fissato per precauzione limiti inferiori allo standard. Le restrizioni sugli orari di brillamento e sui lavori di avanzamento definite a livello contrattuale hanno ridotto ulteriormente le vibrazioni e la trasmissione di rumore per via solida nelle fasce orarie più sensibili. Il monitoraggio ha evidenziato livelli molto al di sotto dei valori preventivati, di conseguenza le limitazioni sono state attenuate oppure completamente rimosse.

Il monitoraggio delle importanti opere infrastrutturali come l'autostrada A2, la linea ferroviaria FFS a Vigana e Vezia, come anche la galleria stradale Vedeggio – Cassarate rientrava in speciali concetti. Per l'attraversamento A2 a Vigana, la deformazione del piano campagna è stata monitorata in tempo reale utilizzando punti di misura geodetici e misure inclinometriche per rilevare tempestivamente eventuali cedimenti della carreggiata soprastante. Un'ulteriore misura di monitoraggio si era resa necessaria per la linea ferroviaria delle FFS, che si trova quasi 150 m più a sud, misurando gli spostamenti verticali dei pali della catenaria e della superficie rocciosa in prossimità dei binari.

A causa della ridotta distanza verticale tra il tracciato della GbC e la sottostante galleria stradale Vedeggio – Cassarate, che incrocia la GbC quasi ad angolo retto, è stato previsto un concetto di monitoraggio composto da misurazioni manuali ed automatiche tramite sonde inclinometriche e sonde estensimetriche di tipo Inkrex. In quel periodo la costruzione grezza della galleria Vedeggio – Cassarate era già stata completata.

In ragione del programma lavori particolarmente ambizioso, il Committente ha richiesto diversi interventi per migliorare la resa dell'avanzamento. Al fine di recuperare il ritardo accumulato nell'avanzamento nord, tra marzo e maggio 2015 è stato aperto un terzo fronte di scavo nella canna est. Tale intervento, denominato «attacco intermedio avanzamento nord», ha avuto inizio a partire dal cunicolo trasversale 6. Quest'ultimo serviva da accesso logistico al fronte al terzo fronte di scavo.

Le condizioni geologiche e geotecniche riscontrate hanno comportato delle importanti differenze relativamente alla resa dell'avanzamento rispetto a quanto prospettato in fase di progetto. Nell'avanzamento in direzione nord si è avuto un ritardo di circa un anno rispetto ai tempi di costruzione teorici (Soll). Per contro, in direzione sud, grazie alle condizioni geologiche-geotecniche favorevoli e all'attenuazione delle limitazioni dell'avanzamento, gli scavi sono terminati un anno prima del previsto.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers . . . 3
Préface de l'éditeur . . . 4
Prefazione dell'editore . . . 5
Preface from the editor . . . 6
Vorwort AlpTransit Gotthard AG . . . 7
Prefazione dell'AlpTransit Gotthard AG . . . 8
Textfiguren . . . 22
Tabellen . . . 28
Abkürzungsverzeichnis . . . 29
Wortverzeichnis . . . 31
Bezeichnungen . . . 34

1. Einführung . . . 35
1.1 Beschreibung des Bauwerks in Bezug auf das Gesamtprojekt . . . 35
1.2 Beschreibung der einzelnen Bauwerke und Baulose . . . 37
1.2.1 Hauptbauwerke . . . 37
1.2.2 Nebenbauwerke . . . 38
1.3 Geologische Baubegleitung, Dokumentation und Berichterstattung . . . 40

2. Übersicht über die Geologie im Projektbereich . . . 42
2.1 Regionale Geologie und Tektonik . . . 42
2.2 Tektonometamorphe Entwicklung der Südalpen in der Region Tessin . . . 42
2.2.1 Präalpine Entwicklung . . . 42
2.2.2 Alpine Entwicklung . . . 44
2.3 Geologische und geotechnische Kenntnisse vor Baubeginn . . . 46
2.3.1 Vorstudien und Erkundungen im Projekt . . . 46
2.3.2 Risikozonen und deren Erkundung . . . 46
2.4 Modell der Homogenbereiche . . . 47
2.5 Tektonische und lithologische Gliederung . . . 49
2.5.1 Nördliche Ceneri-Zone . . . 49
2.5.2 Mittlere Ceneri-Zone («Subparallelismus») . . . 50
2.5.3 Südliche Ceneri-Zone . . . 50
2.5.4 Val-Colla-Linie . . . 50
2.5.5 Nördliche Val-Colla-Zone . . . 52
2.5.6 Südliche Val-Colla-Zone . . . 52

3. Geologischer Befund . . . 53
3.1 Petrographische und mineralogische Beschreibung der durchörterten Formationen . . . 55
3.1.1 Nördliche und mittlere Ceneri-Zone . . . 55
3.1.1.1 Ceneri-Paragneis (PGC) . . . 55
3.1.1.2 Ceneri-Orthogneis (OGC) . . . 59
3.1.1.3 Hornfels (GCornub) . . . 62
3.1.1.4 Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone (B-UBC) . . . 63
3.1.2 Südliche Ceneri-Zone . . . 66
3.1.2.1 Giumello-Gneis (GGium) . . . 66
3.1.3 Val-Colla-Linie (LVC) . . . 68
3.1.3.1 Lithotyp 1a: Phyllonit, Mylonit und Schiefer . . . 69
3.1.3.2 Lithotyp 1b: Gneis und schiefriger Gneis . . . 70
3.1.3.3 Lithotyp 2: Heterogene Zusammensetzung verschiedener Lithotypen der LVC . . . 71
3.1.3.4 Lithotyp 3: Kakirit Typ «fault gouge» . . . 71
3.1.4 Nördliche und südliche Val-Colla-Zone . . . 71
3.1.4.1 Stabbiello-Gneis . . . 71
3.1.4.2 Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone . . . 75
3.1.4.3 Bernardo-Orthogneis (OGBern) . . . 76
3.1.5 Quartär . . . 78
3.1.5.1 Nordportal Vigana . . . 78
3.1.5.2 Südportal Vezia . . . 78
3.2 Vergleich zwischen Prognose und Befund . . . 80
3.2.1 Homogenbereiche (HB) . . . 80
3.2.2 Petrographie . . . 82
3.2.2.1 Ceneri-Paragneis . . . 82
3.2.2.2 Aufhebung der Terminologie «Mischgneis» . . . 82
3.2.2.3 Ceneri-Orthogneis . . . 83
3.2.2.4 Hornfels . . . 83
3.2.2.5 Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone 83
3.2.2.6 Metabasische Ganggesteine . . . 83
3.2.2.7 Giumello-Gneis . . . 83
3.2.2.8 Phyllonit, Mylonit, Schiefer und Gneis der Val-Colla-Linie . . . 84
3.2.2.9 Stabbiello-Gneis . . . 84
3.2.2.10 Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone . . . 84
3.2.2.11 Bernardo-Orthogneis . . . 84

4. Gesteinsgefüge und systematische Durchtrennung des Gebirges . . . 85
4.1 Trennflächen . . . 85
4.1.1 Schieferung . . . 85
4.1.1.1 Portalbereich Vigana, nördliche Ceneri-Zone . . . 86
4.1.1.2 Nördliche und mittlere Ceneri-Zone . . . 86
4.1.1.3 Südliche Ceneri-Zone (Giumello-Gneis) und Val-Colla-Linie . . . 87
4.1.1.4 Val-Colla-Zone . . . 87
4.1.1.5 Fensterstollen Sigirino . . . 89
4.1.2 Störungszonen . . . 89
4.1.2.1 Portalbereich Vigana, nördliche Ceneri-Zone . . . 89
4.1.2.2 Nördliche und mittlere Ceneri-Zone . . . 90
4.1.2.3 Südliche Ceneri-Zone (Giumello-Gneis) und Val-Colla-Linie . . . 91
4.1.2.4 Val-Colla-Zone . . . 91
4.1.2.5 Fensterstollen Sigirino . . . 92
4.1.3 Klüftung . . . 92
4.1.3.1 Portalbereich Vigana, nördliche Ceneri-Zone . . . 93
4.1.3.2 Nördliche bis mittlere Ceneri-Zone . . . 94
4.1.3.3 Südliche Ceneri-Zone (Giumello-Gneis) und Val-Colla-Linie . . . 94
4.1.3.4 Val-Colla-Zone (nördliche und südliche Val-Colla-Zone) . . . 94
4.1.3.5 Fensterstollen Sigirino . . . 96

4.2 Gefügemodelle des Gebirges ... 96
4.3 Regionales tektonisches Modell ... 96
4.4 Vergleich zwischen Prognose und Befund ... 98

5. Hydrogeologie ... 101
5.1 Bergwasserführung ... 101
5.1.1 Grundlagen und Prognose ... 101
5.1.2 Initiale Zuflussmengen und Standorte der Wassereintritte beim Vortrieb ... 102
5.1.3 Stationäre Zuflussmengen und Gesamtabfluss 105
5.2 Bergwasserbeschaffenheit ... 107
5.2.1 Hydrochemische Parameter ... 107
5.2.2 Aggressivität des Bergwassers ... 108
5.2.3 Bergwassertemperaturen ... 108
5.3 Bergwasserfassung und Bergwasserentwässerung ... 109
5.3.1 Bergwasserentwässerung im CBT ... 109
5.3.2 Drainagemassnahmen in der offenen Tagbaustelle Vezia ... 110
5.3.3 Härtestabilisierung von Bergwasser im Sickerkies ... 111
5.4 Auswirkungen auf Dritte ... 112
5.4.1 Genutzte Oberflächenquellen ... 112
5.4.2 Geothermiebohrungen ... 113
5.5 Zusammenfassender hydrogeologischer Befund und Vergleich mit der Prognose ... 113
5.5.1 Allgemeine Betrachtungen ... 113
5.5.2 Nordportal Vigana ... 113
5.5.3 Ceneri-Zone bis Val-Colla-Linie, FIS und CPS 113
5.5.4 Val-Colla-Zone und Südportal Vezia ... 114

6. Radioaktivität und Asbest ... 115
6.1 Radioaktivität ... 115
6.1.1 Radon ... 115
6.1.2 Messkonzept ... 115
6.1.3 Messergebnisse und Interpretation ... 115
6.1.4 Massnahmenplan ... 115
6.2 Asbestrisiko in der Ceneri- und Val-Colla-Zone ... 115
6.2.1 Überwachungskonzept ... 117
6.2.2 Luftprobenanalysen beim Vortrieb ... 117
6.2.3 Untersuchung von asbesthaltigen Mineralen im Gestein ... 119
6.2.4 Massnahmenplan ... 119
6.3 Interpretation der Ergebnisse ... 119

7. Wiederverwertung des Ausbruchmaterials ... 121
7.1 Grundlagen und Ausganglage ... 121
7.2 Verteilung des Ausbruchmaterials ... 121

8. Felstemperaturen ... 123

9. Allgemeine geotechnische Verhältnisse bei den Tunnelvortrieben ... 124
9.1 Allgemeine geotechnische Verhältnisse bei den Vortriebe im Fels ... 124
9.1.1 Generelle Beurteilung im Hinblick auf die Submission ... 124
9.1.2 Felsmechanische Kennwerte vor dem Bau ... 124
9.1.3 Felsmechanische Kennwerte während der Bauausführung ... 126
9.1.4 Geologische Überprofile ... 129
9.1.5 Vergleich zwischen Prognose und Befund ... 130
9.2 Vorauserkundungen ... 133
9.2.1 Vorauserkundungskonzept ... 133
9.2.2 Ausgeführte Schlagbohrungen ... 136
9.2.3 Ausgeführte Kernbohrungen ... 136
9.2.4 Durchgeführte Seismik ... 143
9.3 Auswirkung der Gebirgsüberlagerung ... 143
9.4 Geotechnische Relevanz der Störungen ... 143
9.5 Verformungsmessungen ... 144
9.5.1 Verformungsmessungen ... 145
9.5.2 Extensometermessungen ... 150
9.5.3 Verformungsmessungen der Sohlen ... 150
9.5.4 Überwachung der Überquerung des Strassentunnels Vedeggio–Cassarate ... 151
9.5.5 Überwachung des Portaleinschnitt Vezia ... 153
9.5.6 Gegenseitige Beeinflussung beider Tunnelröhren beim Vortrieb ... 153
9.6 Überwachung von Erschütterungen und Körperschall während des Baus ... 154
9.6.1 Überwachungskonzept ... 154
9.6.2 Überwachungseinrichtung ... 155
9.6.3 Massnahmenplan ... 155
9.6.4 Ergebnisse und Interpretation ... 155
9.7 Überwachung der Oberflächenverformung ... 158
9.7.1 Unterquerung der Autobahn A2 in Vigana ... 158
9.7.2 Unterquerung der SBB-Bahnlinie in Vigana ... 158
9.8 Einstufung der Standfestigkeit des Felses ... 158

10. Gefährdungsbilder, Ereignisse und spezielle geotechnische Probleme ... 160
10.1 Definition der Gefährdungsbilder ... 160
10.2 Ereignisse beim Tunnelvortrieb ... 162
10.2.1 Kleinsteinfall und Kluftkörper ... 162
10.2.2 Auflockerung, Ablösungen und plastische Verformungen ... 164
10.2.3 Entspannungsschläge ... 167
10.2.4 Ortsbrustinstabilität ... 168
10.2.5 Wassereinbruch ... 170
10.2.6 Vergleich zwischen Prognose und Befund ... 170
10.3 Spezielle geotechnische Probleme und Ereignisse ... 171
10.3.1 Niederbruch Val Mara Oströhre km 231.633 (02.02.2014) ... 171
10.3.2 Niederbruch Gola di Lago Oströhre km 233.559 (14.07.2017) ... 171
10.3.3 Entspannungsschlag im Ceneri-Orthogneis Weströhre km 333.557 (09.07.2012) ... 173
10.3.4 Ereignis im Ceneri-Orthogneis Weströhre km 332.664 (08.05.2013) ... 173
10.3.5 Ereignis im Ceneri-Orthogneis Oströhre km 234.030 (14.04.2012) ... 175
10.3.6 Strecke im Giumello-Gneis mit asymmetrischen Verformungen im Bereich des Bypass Nord ... 175
10.3.7 Geotechnische Ereignisse beim Bau der Logistikkavernen CAOP ... 175
10.3.8 Niederbruch Val-Colla-Linie Oströhre km 237.478 (03.05.2011) ... 177
10.3.9 Wassereintritt beim Auffahren des Bohrlochs CB83 km 239.299 ... 178
10.3.10 Lange anhaltende Verformungen im Verzweigungsbauwerk Sarè West ... 179
10.3.11 Nachbrüche im Verzweigungsbauwerks Sarè ... 180
10.3.12 Geothermiebohrungen in der Gemeinde Cureglia (Querschlag 43) ... 180

11. Bauprozesse und Bautechnik beim Tunnelvortrieb ... 182
11.1 Bauprozess im Allgemeinen ... 182
11.1.1 Vortriebsleistung ... 182
11.1.2 Beschleunigungsmassnahmen ... 183
11.1.3 Einschränkungen für den Tunnelbau beim Vortrieb ... 184
11.2 Ausbruchsicherung im Ausführungsprojekt ... 185
11.2.1 Vorgeschichte zur Planung der Ausbruchsicherung ... 185
11.2.2 Beschreibung der Ausbruchsicherungstypen ... 185

11.2.2.1 Portalbereich Vigana 185
11.2.2.2 Vortrieb Baulos Sigirino 186
11.2.2.3 CAOP 188
11.2.2.4 Verzweigungsbauwerk Sarè 189
11.2.2.5 Portalbereich Vezia 189
11.2.3 Verteilung der Ausbruchsicherung im Befund . 191
11.2.3.1 Portalbereich Vigana 191
11.2.3.2 Vortrieb Baulos Sigirino 191
11.2.3.3 Portalbereich Vezia 193
11.2.3.4 Fensterstollen Sigirino 193
11.3 Anpassungen der Ausbruchsicherung 193
11.3.1 Anpassungen im Portalbereich Vigana 193
11.3.2 Anpassungen beim Vortrieb Baulos Sigirino . . 194
11.3.2.1 Anpassung der Ausbruchsicherungstypen SPV 2–4 194
11.3.2.2 Anpassung des Ausbruchsicherungstyps SPV 6A 195
11.3.2.3 Anpassung des Ausbruchsicherungstyps SPV 6 B 195
11.4 Bauhilfsmassnahmen und Anpassungen der Ausbruchsicherung an die lokalen Felsverhältnisse 197
11.4.1 Bauhilfsmassnahmen in den Bereichen von Entspannungsschlägen 197
11.4.2 Bauhilfsmassnahmen auf der Strecke zwischen Val d'Isone und Val Mara (HB 6C – HB 12Bbis) . 197
11.4.3 Bauhilfsmassnahmen in der ITZ (HB 15Bbis) . . 198
11.4.4 Bauhilfsmassnahmen bei asymmetrischen Verformungen im «Subparallelismus» 201
11.4.5 Bauhilfsmassnahmen im Bereich der Logistikkavernen CAOP 202
11.4.6 Bauhilfsmassnahmen während der Durchörterung der Val-Colla-Linie 202
11.4.7 Bauhilfsmassnahmen im Verzweigungsbauwerk Sarè 205
11.4.8 Ausbruchsicherung an der Stirnwand im Verzweigungsbauwerk Sarè 211
11.4.9 Bauhilfsmassnahmen im Bereich des Hosentunnels im Anschluss an das Verzweigungsbauwerk Sarè 211
11.4.10 Bauhilfsmassnahmen im Bereich des Überführungsbauwerks 214
11.4.11 Unterquerung des Val Ponteggia 214

12. Naturgefahren und Aussenanlagen 216
12.1 Naturgefahren im Bereich der Übertagebaustelle in Sigirino 216
12.2 Portaleinschnitt Fensterstollen Sigirino 216
12.3 Baumethode der Ablagerung Sigirino 217
12.3.1 Drainagesystem 219
12.3.2 Innenkörper der Ablagerung 221
12.3.3 Bautechnik beim Bau der Böschung 222

Literaturverzeichnis 224
Normen und Empfehlungen 226
Projektinterne Dokumente 227

13. Anhang 228
Anhang 13-a: Allgemeine Legende mit den Signaturen für die Beschreibung der Geologie, Hydrogeologie und Geotechnik. 228
Anhang 13-b: Legende für die Beschreibung der radialen Verformungsmessungen und die Messpunkte. 228
Anhang 13-c: Legende für die Beschreibung der eingebauten Ausbruchsicherungstypen in der Oströhre. 229
Anhang 13-d: Legende für die Beschreibung der eingebauten Ausbruchsicherungstypen in der Weströhre. 230
Anhang 13-e: Zusammenfassung der Orientierungen der Schieferungsfamilien geordnet nach Homogenbereich. 231
Anhang 13-f: Zusammenfassung der Orientierungen der Schieferungsfamilien im FIS, geordnet nach Homogenbereich. 232
Anhang 13-g: Störungszonenkataster der angetroffenen, bautechnisch relevanten Störungszonen. 232
Anhang 13-h: Zusammenfassung der Orientierungen der angetroffenen Hauptstörungszonenfamilien, geordnet nach Homogenbereich. 239
Anhang 13-i: Zusammenfassung der Orientierungen der angetroffenen Hauptstörungszonenfamilien im FIS. 240
Anhang 13-j: Zusammenfassung der Orientierungen der angetroffenen Kluftscharen, geordnet nach Homogenbereich. 240
Anhang 13-k: Zusammenfassung der Orientierungen der angetroffenen Kluftscharen im FIS. 242
Anhang 13-l: Einteilung der Homogenbereiche der Prognose. . . 243
Anhang 13-m: Hydrochemische Parameter der in den Einspurtunnel angetroffenen Wassereintritte. 245
Anhang 13-n: Hydrochemische Parameter der im Baulos Vigana angetroffenen Wassereintritte. 246
Anhang 13-o: Hydrochemische Parameter der im FIS angetroffenen Wassereintritte. 247
Anhang 13-p: Indexwerte der Punktlastversuche. 248
Anhang 13-q: Indexwerte der Punktlastversuche (Materialbewirtschaftung) für die Ost- und Weströhre. 249
Anhang 13-r: Resultate der einaxialen Druckfestigkeitsversuche. 255
Anhang 13-s: Resultate der triaxialen Druckversuche (mit konstantem Seitendruck). 257
Anhang 13-t: Resultate der triaxialen mehrstufigen Druckversuche, undrainiert mit variablem Seitendruck. . . . 258
Anhang 13-u: Resultate der triaxialen mehrstufigen Druckversuche mit variablem Seitendruck, unter drainierten Bedingungen. 259
Anhang 13-v: Resultate der Direktscherversuche auf Trennflächen. 260
Anhang 13-w: Resultate der Spaltzugfestigkeitsversuche. 260

Textfiguren

Fig. 1-1: Übersicht der Linienführung des Ceneri-Basistunnels. Oben links dargestellt die Gesamtübersicht aller NEAT-Bauwerke. 35

Fig. 1-2: Schematische Übersicht des Gesamtbauwerks mit Bauloseinteilung und Vortriebsrichtung. 36

Fig. 1-3: Bauwerksübersicht des Ceneri-Basistunnels mit Nebenbauwerken, Erkundungs- und Zugangsstollen. 37

Fig. 1-4: Querprofil der CAOP mit «Haus im Haus»-Bauwerk und Hinterfüllung aus Ausbruchmaterial. 38

Fig. 2-1: Geologisch-tektonische Karte der Südalpen in der Region Tessin–Piemont. 43

Fig. 2-2: Schematische Darstellung der Definition der Streubereiche in den Homogenbereichen des CBT. 47

Fig. 2-3: Darstellung des Störungssystems an der Oberfläche im Bereich der nördlichen bis mittleren Ceneri-Zone. . . 48

Fig. 2-4: Geologisches Längenprofil mit der Prognose und den projizierten Kernbohrungen für die Oströhre. 49

Fig. 2-5: Das geologische Prognosemodell für die Durchörterung der Val-Colla-Linie stellt die Verteilung der Lithotypen im Homogenbereich 30 dar. 51

Fig. 3-1: Diskriminationsdiagramm und Dreiecksdiagramm für den Ceneri-Paragneis. 55

Fig. 3-2: a) Granat führender Biotitgneis Oströhre km 228.927 im Handstück und b) in der Ortsbrust km 229.249. . . 56

Fig. 3-3: a) Granat-Kyanit-Staurolith führender Muskovitschiefer Oströhre km 231.179 b) Ortsbrust Weströhre km 332.977. 56

Fig. 3-4: a) Granat-Kyanit-Staurolith führender Muskovitschiefer, entnommen in der Oströhre beim km 230.105. b) Das gleiche Gestein im Aufschluss. 57

Fig. 3-5: Granat führender Biotitgneis in der Dünnschliffaufnahme GbC-NO-R-5907.5 a) mit normalem Licht b) mit polarisiertem Licht. 57

Fig. 3-6: Der Dünnschliff GbC-NE-R-1328.7 aus der Oströhre km 235.054 mit polarisiertem Licht zeigt die typischen S-C'-Strukturen aus sigmoidalen Granatblasten im Muskovit-Gneis. 57

Fig. 3-7: a) Sigmoidaler skelettförmiger Staurolith mit Verformungsschatten im Dünnschliff b) Granat und Turmalin führender Zweiglimmergneis im Dünnschliff. 58

Fig. 3-8: Kalksilikatknauer im Ceneri-Paragneis der Kaverne West in Vigana km 328.102. b) Granitoidlinse im Anschluss Oströhre km 228.257. 58

Fig. 3-9: a) Zweiglimmergneis in der Weströhre km 335.102. b) Zweiglimmergneis mit flaseriger Textur in der Weströhre km 333.913. 59

Fig. 3-10: a) Zweiglimmergneis mit mineralisierten Klüften im Handstück in der Oströhre km 232.356 und b) in der Ortsbrust bei gleichem Vortriebsstand. 59

Fig. 3-11: Dünnschliffaufnahme mit normalem Licht des im CBT weit verbreiteten «klassischen» Ceneri-Orthogneises (Zweiglimmergneis). Handstück GbC-NO-R-862.7 aus der Oströhre bei km 335.190. 60

Fig. 3-12: a) Zweiglimmergneis mit Chlorit und Epidot in der Weströhre km 329.620 und b) in der Ortsbrust der gleichen Tunnelröhre bei km 329.607. 60

Fig. 3-13: a) Akzessorischer Granat im Zweiglimmergneis und b) Epidot und Titanit im Dünnschliff 61

Fig. 3-14: a) Leukokrater Zweiglimmergneis im Handstück und b) in der Ortsbrust der Oströhre km 235.188. 61

Fig. 3-15: a) Handstück GbC-NE-R-1195 in der Weströhre km 235.188, entspricht dem leukokraten Zweiglimmergneis a) normales Licht b) polarisiertes Licht. 61

Fig. 3-16: a) Handstück GbC-NO-R-3864,7 in der Weströhre km 323.188, entspricht dem leukokraten Zweiglimmergneis des HB 20 b) Ortsbrust bei km 332.179. 62

Fig. 3-17: Dünnschliffaufnahmen a) Handstück GbC-NO-R-3864.7, Weströhre bei km 332.188 b) Handstück GbC-NE-R-4345, Oströhre km 232.038. 62

Fig. 3-18: a) Feinkörniger Biotitgneis des Hornfels-Formation b) entnommen in der Ortsbrust der Weströhre bei km 333.586. 63

Fig. 3-19: Dünnschliffaufnahme mit polarisiertem Licht zeigt Cordierit in der Probe G195-852NO2449 in der Weströhre bei km 333.604. 63

Fig. 3-20: a) Feinkörniger Zweiglimmergneis des Handstücks GbC-NO-R2466.7 bei km 333.586 in der Dünnschliffaufnahme mit normalem Licht und b) mit polarisiertem Licht. 64

Fig. 3-21: a) Bänderamphibolit mit leptitischen Lagen aus der b) Ortsbrust bei km 234.906 c) Bohrkern im Amphibolit führenden Gneis mit leptitischen Bändern d) Dünnschliffaufnahme mit faserigem Tremolit-Aktinolith Mischkristall e) Dünnschliffaufnahme Handstück GbC-NE-R-4275 mit normalem Licht f) idem, mit polarisiertem Licht. 65

Fig. 3-22: Steil stehender metabasischer Gang bei km 233.308 schneidet im rechten Kämpferbereich die Schieferung des Ceneri-Paragneis diskordant. 66

Fig. 3-23: Hornblende führender Spessartit in der Dünnschliffaufnahme mit polarisiertem Licht (Handstück GbC-NO-R-3407.5 bei km 332.645). 66

Fig. 3-24: a) Granat führender Zweiglimmergneis Handstück GbC-SE-R-623 b) an der Ortsbrust. 67

Fig. 3-25: Abfolge von granoblastischen Lagen, in denen der Quarz Anzeichen einer dynamischen Rekristallisation zeigt. 67

Fig. 3-26: a) Granat-Kyanit-Staurolith führender Glimmerschiefer GbC-NE-R-450.7. b) Ortsbrust der Oströhre bei km 235.911 mit entsprechendem Lithotyp. 68

Fig. 3-27: a) Granat-Kyanit-Staurolith führender Glimmerschiefer, Gesteinsprobe GbC-NO-R-424.5 bei km 335.628 in der Dünnschliffaufnahme. Probe GbC-NE-R-823.0 bei km 236.383. 68

Fig. 3-28: Horizontalschnitt auf Kote Schienenoberkante. Er veranschaulicht die angetroffenen Hauptstörungszonen und Lithologien in der Val-Colla-Linie (HB 30A und HB 30B). 69

Fig. 3-29: a) Ortsbrust Oströhre km 237.731 mit Phyllonit auf der rechten Hälfte (Lithotyp 1a) und quarzreichem Gneis, der dem Lithotyp 1b entspricht. b) Handstück eines Phyllonits. 69

Fig. 3-30: Phyllonit in der Dünnschliffaufnahme GbC-SO-R-1250.4 mit polarisiertem Licht, Oströhre km 337.701. 70

Fig. 3-31: a) Ortsbrust Oströhre km 237.577, bestehend aus quarzreichem Gneis b) Handstück GbC-SE-R-1271, Lithotyp 1b. 70

Fig. 3-32: Dünnschliffaufnahmen Lithotyp 1b: a) Quarzreicher Gneis, polarisiertes Licht b) Granat und Turmalin führender Schiefer, normales Licht. 71

Fig. 3-33: a) Vortrieb Oströhre bei km 237.459 in einer kakiritischen Störungszone des Typs «Störungsbrekzie». 72

Fig. 3-34: a) Ortsbrust mit kakiritischer Störungszone des Typs (fault breccia) und lokalem Gesteinsmehl (fault gouge) b) Handstück des Störungsgesteins vom Typ fault gouge. 72

Fig. 3-35: Gesteinsprobe aus der Weströhre km 341.482 mit «marmorisierten» Horizonten und Mineralisierung von Kalzit und/oder Ankierit. 72

Fig. 3-36: a) Dünnschliffaufnahme eines Granat führenden Muskovitschiefers mit Turmalin, normales Licht b) polarisiertes Licht. 73

Fig. 3-37: Mylonitische Textur mit feinkörniger Gesteinsmatrix und zahlreichen reliktischen Mineralen in der Gesteinsprobe GbC-SO-R-5031, km 341.482. 73

Fig. 3-38: a) Gesteinsprobe eines Granat führenden Biotitgneises aus der Weströhre bei km 339.609 b) Ortsbrust Oströhre bei km 239.774. 74

Fig. 3-39: Granat führender Biotitgneis im Dünnschliff mit normalem Licht. Gesteinsprobe GbC-SO-R-3158, Weströhre km 339.609. 74

Fig. 3-40: a) Granat und Serizit führender Muskovitschiefer nahe an der Val-Colla-Linie in der Oströhre km 238.886. b) Granat führender Zweiglimmergneis, Weströhre km 339.571. 74

Fig. 3-41: Granat und Serizit führender Muskovitschiefer GbC-SE-R-1747.5, Oströhre km 238.130, Dünnschliffaufnahme mit polarisiertem Licht. 75

Fig. 3-42: Granat und Serizit führender Muskovitschiefer GbC-Sarè-SO-01 Bm 220.25, Oströhre km 340.540, Dünnschliffaufnahme mit normalem Licht. 75

Fig. 3-43: Gesteinsprobe mit Granat, Kyanit und Staurolith führendem Zweiglimmergneis aus der Kernborhung GbC-Sarè-SO-01 bei Bm 220.25. 75

Fig. 3-44: Amphibolitlinsen im Zweiglimmergneis, Oströhre km 238.615. 76

Fig. 3-45: a) Bänderamphibolit in der Oströhre km 238.572. b) Hornblende führender Gneis. 76

Fig. 3-46: Amphibolitlinsen im Zweiglimmergneis GbC-SE-R-2189.0, Oströhre km 238.572, Dünnschliffaufnahme mit normalem Licht. 76

Fig. 3-47: a) Leukokrater, Muskovit führender Augengneis im Handstück, Oströhre km 239.438. b) Kataklastische Störung. 77

Fig. 3-48: Gesteinsprobe GbC-SE-R-3430.4 in Dünnschliffaufnahme mit polarisiertem Licht, Oströhre km 239.813. 77

Fig. 3-49: a) Kalottenvortrieb im Raccordo Caverna Est km 227.520 (Oströhre) mit Aufschüttmaterial der Auto-bahn A2. b) Moränenablagerung mit siltigem Sand c) Detailaufnahme. 78

Fig. 3-50: Grenze zwischen Lockergestein und Festgestein mit Abfolge von detritischem Material, Moräne über dem Ceneri-Paragneis. 79

Fig. 3-51: Querprofil bei km 242.833 zeigt das geologische Modell der Tagebaustrecke mit dem Kontakt Festgestein-Lockergestein. 79

Fig. 3-52: Gletscher- und Flussablagerungen im Abschnitt Süd. 80

Fig. 3-53: Freigelegte verwitterte Felsoberfläche im nördlichen Abschnitt der offenen Tagebaustrecke mit Blick auf die künftige Portalwand für den Vortrieb im Festgestein. 80

Fig. 4-1: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Schieferungsflächen im Portalbereich Vigana. 86

Fig. 4-2: Reliktische präalpine (kaledonische?) Falte im Ceneri-Paragneis, Weströhre km 331.375. 86

Fig. 4-3: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Schieferungsflächen in der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone. 87

Fig. 4-4: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Schieferungsflächen in der südlichen Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie zwischen den Homogenbereichen 26A und 30B. 88

Fig. 4-5: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Schieferungsflächen in der Val-Colla-Zone zwischen den Homogenbereichen 31 und 44. 88

Fig. 4-6: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Störungszonen im Portalbereich Vigana. 89

Fig. 4-7: Räumliche Visualisierung der Rückanalyse des komplexen Störungszonensystems Val d'Isone im Homogenbereich 10B mithilfe von Oberflächendaten, Erkundungsbohrungen CB 66, 86 und 86bis, und den Vortriebsdaten. 90

Fig. 4-8: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Störungszonen in der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone. 90

Fig. 4-9: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Störungszonen in der südlichen Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie. 91

Fig. 4-10: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Störungszonen in der Val-Colla-Zone (HB 31–44). 92

Fig. 4-11: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Kluftscharen im Portalbereich Vigana. 93

Fig. 4-12: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Kluftscharen in der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone. 94

Fig. 4-13: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Kluftscharen in der südlichen Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie. 95

Fig. 4-14: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Kluftscharen in der Val-Colla-Zone (HB 31–44). 96

Fig. 4-15: Die Blockdiagramme stellen die Raumlage und die Frequenz der Trennflächen schematisch in der Oströhre dar. 96

Fig. 4-16: Die Blockdiagramme stellen die Raumlage und die Frequenz der Trennflächen schematisch in der Oströhre dar. 97

Fig. 4-17: Allgemeine Legende zu den Blockmodellen. 97

Fig. 4-18: Schematische Darstellung der wichtigsten Verformungsstrukturen im Blattverschiebungssystem des Monte Ceneri. 98

Fig. 4-19: Gegenüberstellung der prognostizierten Schieferung im geologischen Längenprofil der Oströhre und der Schieferung im Befund (schwarze dicke Linien). Die im Tunnelvortrieb aufgenommenen Schieferungsorientierungen zeigen Mikrozonen entlang der Tunnelachse. 99

Fig. 5-1: Verteilung der gesamten initialen Schüttungsmenge beim Vortrieb des CBT nach Bauwerksabschnitt. ... 102

Fig. 5-2: Verteilung der Abschnitte mit Tropfstellen entlang beider Tunnelröhren und im FIS. 102

Fig. 5-3: Vergleich der Schüttungsmengen aus Quellen und Tropfstellen, geordnet nach Bauwerksabschnitt. 102

Fig. 5-4: Verteilung der Quellen mit initialen Schüttungsmengen beim Vortrieb entlang der Tunnelachse Ost. 103

Fig. 5-5: Verteilung der Abschnitte mit Tropfstellen pro 10 m nach Grad beim Vortrieb der Tunnelachse Ost. 104

Fig. 5-6: Initiale Schüttungen mit kumulierter Schüttungskurve für alle angetroffenen Quellen beim Vortrieb im FIS. 105

Fig. 5-7: Vergleich zwischen initialen (Q_i) und stationären Schüttungsmengen (Q_s) unterteilt nach relevanten Bauwerksabschnitten. 105

Fig. 5-8: Bergwasserzuflüsse nach Vortriebsende entlang beider Einspurtunnel am Ende der Vortriebsarbeiten im CBT. 106

Fig. 5-9: Graphische Darstellung der Bergwassermineralisation im CBT. Alle Werte der Weströhre sind auf die Achse der Oströhre projiziert. 107

Fig. 5-10: Vergleich zwischen pH-Wert der initialen und stationären Quellen im Fensterstollen und der Felsüberlagerung. 108

Fig. 5-11: Bergwassertemperaturen in Gegenüberstellung mit den Felstemperaturen, Felsüberlagerung und Prognose Felstemperatur und Schüttungsmenge (Q). 108

Fig. 5-12: Schematische Darstellung der gesamten Bergwasserableitung im CBT während des Betriebs. 109

Fig. 5-13: Entwässerungssystem des CBT, dargestellt im Normalprofil SPV 1-4 beim Vortrieb Baulos Sigirino mit Inspektionsschächten der Mischwasser- und Drainageleitungen. 110

Fig. 5-14: Das hydrogeologische Modell der Tagbaustrecke Vezia erläutert das Drainagekonzept des Hangwassers. ... 110

Fig. 5-15: Eingebaute Depotsteine zwischen der Gewölbedrainage- und Verteilungsleitung zur temporären Härtestabilisierung von Bergwasser im Sickerkies. 111

Fig. 5-16: Detaillierte Ansicht der Gewölbedrainage mit eingebauten Depotsteinen zwischen der Gewölbedrainage und der Verteilungsleitung für die Härtestabilisierung. 111

Fig. 5-17: Gegenüberstellung Ryznar-Stabilitätsindex und pH-Wert vor (Probenentnahme von Quellen beim Vortrieb) und nach dem Innenausbau (Probeentnahme im Schacht). 112

Fig. 6-1: Übersicht der Standorte mit den Messstellen für die Radonüberwachung. 116

Fig. 6-2: a) Serpentinitähnliches Gestein, Weströhre bei km 334.167, b) Amphibolit führender Gneis, km 334.163. 116

Fig. 6-3: Lüftungskonzept der Baustellen Untertage mit allen Positionen für die Probenentnahme. 117

Fig. 6-4: Die probabilistische Auswertung des Fasergehalts nimmt exponentiell mit der Zunahme der Dauer der Probenentnahme ab. 118

Fig. 6-5: Graphische Darstellung aller Messergebnisse der Luftproben für die beiden Messverfahren. 118

Fig. 6-6: Gegenüberstellung der VDI-Messungen im gesamten CBT und der angetroffenen Lithologien. 120

Fig. 7-1: Verteilung des Ausbruchmaterials nach Einteilung in A- und B-Material in den beiden Einspurtunnel des CBT und im FIS. 122

Fig. 9-1: Definition des geologischen Überprofils beim Sprengvortrieb nach SIA-Norm 118/198. 129

Fig. 9-2: Gegenüberstellung der geologischen Überprofile, effektiven Abschlagslängen und Anzahl Abschläge für das Baulos Sigirino, geordnet nach Bauwerk und Ausbruchsicherungstyp. 130

Fig. 9-3: Befund und Gegenüberstellung der Homogenbereiche, Ausbruchsicherungstypen, geologischem Überprofil, Abschlagslänge und Grad der Zerscherung für die gesamte Oströhre. 131

Fig. 9-4: Befund und Gegenüberstellung der Homogenbereiche, Ausbruchsicherungstypen, geologischem Überprofil, Abschlagslänge und Grad der Zerscherung für die gesamte Weströhre. 132

Fig. 9-5: Horizontalplan mit der geologischen Prognose der mittleren Ceneri-Zone. 134

Fig. 9-6: Der Horizontalschnitt mit der geologischen Prognose der Val-Colla-Linie veranschaulicht das angepasstem Vorauserkundungskonzept mit Schlag- und Kernbohrungen. 135

Fig. 9-7: Der Horizontalschnitt mit geologischem Befund veranschaulicht die angetroffenen Störungszonen im Val Mara (HB 12A). 136

Fig. 9-8: Erste schräg ausgeführte Kernbohrung GbC-NO-SPS-01 zur Erkundung des «Subparallelismus». 137

Fig. 9-9: Der Horizontalschnitt mit der geologischen Prognose im Hintergrund und dem geologischen Befund der Val-Colla-Linie (HB 30A und HB 30B) zeigt die ausgeführten Kernbohrungen. 138

Fig. 9-10: Situationsplan der Kernbohrungen GbC-Sarè-SO-01 (km 340.312) und GbC-Sarè-SE-01 (km 240.474) mit geologischem Befund und zusätzlicher Schlagbohrung im Querschlag 40. 139

Fig. 9-11: Angepasstes Prognosemodell für das Verzweigungsbauwerk Sarè West mit den Erkenntnissen nach der Kernbohrung GbC-Sarè-SO-01. 140

Fig. 9-12: Angepasstes Prognosemodell für das Verzweigungsbauwerk Sarè Ost mit den Erkenntnissen nach der Kernbohrung GbC-Sarè-SE-01. 141

Fig. 9-13: Horizontalplan mit Gegenüberstellung der Kernbohrung GbC-SE-LVC-03, dem geologischen Befund beim Vortrieb und der seismischen Erkundung mit TSP. . . 142

Fig. 9-14: Gegenüberstellung der Kernbohrung GbC-SE-LVC-03, dem geologischen Befund im Horizontalschnitt und der seismischen Erkundung mit TSP-Ergebnissen im Längenprofil. 142

Fig. 9-15: Modell einer klassischen Störungszone der Ceneri-Zone. 144

Fig. 9-16: Letzte Verformungsmessungen vor dem Einbau der Innenschale in der Oströhre. 146

Fig. 9-17: Letzte Verformungsmessungen vor dem Einbau der Innenschale in der Weströhre. 147

Fig. 9-18: Darstellung der Verformungs- und Extensometermessungen im Bereich der Kaverne Sarè Ost zwischen km 240.233 und 240.733. 148

Fig. 9-19: Darstellung der Verformungs- und Extensometermessungen im Bereich der Kaverne Sarè Ost zwischen km 340.201 und 340.701. 149

Fig. 9-20: Verformungsmessungen der einbetonierten Sohle. . . 151

Fig. 9-21: Messwerte der Verformungsmessungen des Sohlgewölbes. 151

Fig. 9-22: Situation mit den Positionen der Bohrlöcher, ausgestattet mit Mehrfachextensometern. 152

Fig. 9-23: Horizontalplan des Portaleinschnittes Vezia mit den Positionen der Inklinometer und den geodätischen Messpunkten. 152

Fig. 9-24: Die Extensometermessstation bei km 330.889 (EXT-NO-5164) zeigt einen schwachen Anstieg während des Vorbeigehens der Oströhre in der Störungszone 10B.1 Val d'Isone. 153

Fig. 9-25 Die Auswertung der Verformungsmessungen mit vertikaler Verschiebung illustriert in der Weströhre die Interaktion der Oströhre. 154

Fig. 9-26: Extensometer EXT-NO-09 in der Weströhre km 336.044 zeigt den Einfluss auf die zweiten Spannungsumlagerungen. 154

Fig. 9-27: Verformungsmessstelle 3D-GBC-SO-1060 in der Weströhre bei km 337.511 zeigt den Einfluss der Oströhre und den Bau des Sohlgewölbes hinter der Ortsbrust der Weströhre. 154

Fig. 9-28: Übersicht über die aktiven seismischen Messstationen zur Überwachung von Erschütterungen und Körperschall beim Vortrieb Baulos Sigirino. 156

Fig. 9-29: Vortriebsstand am 23.02.2015 mit Sprengung in der Südoströhre um 08:07 Uhr (km 242.294) und Südweströhre um 08:10 Uhr (km 342.265). 157

Fig. 9-30: Ergebnisse der Erschütterungsmessung (Schwinggeschwindigkeiten) für die Station PM 117. 157

Fig. 9-31: Die im Diagramm Rayleigh-Geschwindigkeiten/ Frequenz dargestellten Erschütterungsmessungen (Schwinggeschwindigkeiten) veranschaulichen die getroffenen sprengtechnischen Massnahmen. 157

Fig. 9-32: a) Überwachung der Oberflächenverformung während der Durchörterung der Autobahn A2 b) Längenprofil der Setzungs-Isolinien. 159

Fig. 10-1: Auflockerung im östlichen Parament in der Sanierungsstrecke nördlich der CAOP, Weströhre km 336.033. . . 162

Fig. 10-2: a) Ortsbrust im Stabbiello-Gneis mit Kleinsteinfall in der Kalotte unmittelbar nach dem Abschlag, Oströhre km 240.256. b) Sargdeckelförmiger Kluftkörper im Stabbiello-Gneis. 162

Fig. 10-3: Verteilung der beobachteten Kluftkörper entlang der beiden Tunnelröhren nach Position im Tunnelprofil. 163

Fig. 10-4: Das geologisch-geotechnische Modell im Kreuzungsbereich des Querschlags 40 im Verzweigungsbauwerk Sarè. 165

Fig. 10-5: Ablösung von 1 m³/m' Gestein im östlichen Kämpferbereich der Oströhre bei km 234.743 mit Bänderamphiboliten in der Ortsbrust. 165

Fig. 10-6: Verteilung der beobachteten Ablösungen entlang der beiden Tunnelröhren nach Position im Tunnelprofil. 166

Fig. 10-7: a) Statistische Verteilung der Entspannungsschläge nach Gesteinsformation und b) nach Intensität. 167

Fig. 10-8: Übersicht der dokumentierten Entspannungsschläge im Nordvortrieb Sigirino, der Felsüberlagerung und den angetroffenen Lithologien. 167

Fig. 10-9: Abgleiten von Gesteinsplatten (V=10 m³) im Zweiglimmergneis der Ceneri-Paragneis-Formation, Oströhre km 229.172. 168

Fig. 10-10: Kluftkörper (V=10 m³) im Zweiglimmerschiefer (Ceneri-Paragneis), Oströhre km 229.706. Bergwärts aussfallende Schieferung 190/40. 168

Fig. 10-11: Nachbrechen von kohäsionslosem Gestein in der kataklastisch-kakiritischen Störungszone Val Mara (HB 10B), Weströhre km 330.911. 168

Fig. 10-12: Verteilung der beobachteten Ortsbrustinstabilitäten entlang der beiden Tunnelröhren. 169

Fig. 10-13: Haufwerk des Niederbruchs in der Oströhre bei km 231.633. 171

Fig. 10-14: Längsschnitt und Horizontalschnitt des geologisch-geotechnischen Modells. 172

Fig. 10-15: Die Verformungsmessungen der Station km 231.649. 172

Fig. 10-16: Haufwerk des Niederbruchs in der Oströhre bei km 233.559. 172

Fig. 10-17: Horizontalplan der Oströhre km 233.583–233.533 im Bereich der Störungszone 15Bbis. 173

Fig. 10-18: Etappen für die Verfüllung des Hohlraumes. 173

Fig. 10-19: Die Verformungsmessungen zeigen das Verformungsverhalten nach der Wiederaufnahme des Vortriebs und der Verfüllung des Hohlraumes. 173

Fig. 10-20: Bereich der Ablösung nach der Reinigung bei 338.947. 174

Fig. 10-21: a) Ortsbrust der Weströhre bei km 332.658 nach der Felsreinigung. b) Ablösung des entfestigten Gesteins im Parament West. 174

Fig. 10-22: Nachbruch an der Ortsbrust der Oströhre bei km 234.030. 175

Fig. 10-23: Horizontalplan mit geologischem Befund beim Kreuzungsbereich Bypass Nord und Weströhre nördlich der CAOP. 175

Fig. 10-24: a) Pfeiler im Kreuzungsbereich Bypass Nord und Weströhre km 335.978–335.983 (Tm 75–70) zeigt die Risse. 176

Fig. 10-25: Kernbohrung GbC-SE-LVC-01 schräg zur Vortriebsrichtung, Oströhre km 237.478. 176

Fig. 10-26: Haufwerk des Niederbruchs in der Oströhre bei km 237.478 mit einem Volumen von 150 m³. 177

Fig. 10-27: Der Horizontalschnitt Schienenoberkante veranschaulicht den Vortriebsstand, bei dem es zum Niederbruch kam und die Hauptstörungszonen und Lithologien der Homogenbereiche 28C und 30A. 177

Fig. 10-28: Quer- und Längenprofil mit Ausschnitt des Horizontalplans im Kreuzungsbereich des Querschlags 30 und der Südoströhre. 177

Fig. 10-29: Wassereintritt aus dem Bohrloch der Kernbohrung CB83 im östlichen Kämpfer bei km 239.299. 178

Fig. 10-30: Rissbildung und Abplatzungen in der Spritzbetonschale in der Kaverne West im Streckenabschnitt km 340.401–340.431. 178

Fig. 10-31: Horizontalplan mit dem Verzweigungsbauwerk Sarè; mit Geologie im Befund, den festgelegten Ausbruchsicherungstypen und den mehrphasigen Sanierungs- und Bauhilfsmassnahmen. 179

Fig. 10-32: Ablösung des aufgelockerten Gebirges im Firstgewölbe in der Kaverne West. 179

Fig. 10-33: Ablösung des aufgelockerten Gebirges im Firstgewölbe des Kalottenstollens. 180

Fig. 10-34: Geothermiebohrungen beim Querschlag 43 im Südvortrieb Sigirino. 181

Fig. 11-1: Übersicht der Vortriebsleistungen der einzelnen Bauwerke in der Oströhre mit Weg-Zeitdiagramm. . . 183

Fig. 11-2: Schematische Darstellung der Beschleunigungsmassnahme Nordvortrieb Sigirino mit Zwischenangriffsdispositiv beim Querschlag QS 6 von der Weströhre ausgehend. 184

Fig. 11-3: Schematische Übersicht aller Ausbruchsicherungstypen im Ausführungsprojekt beim Vortrieb im Portalbereich Vigana. 186

Fig. 11-4: Schematische Übersicht der Ausbruchsicherungstypen im Ausführungsprojekt beim Vortrieb im Portalbereich Vigana. 187

Fig. 11-5: Ausbruchsicherungstypen im Ausführungsprojekt Baulos Sigirino mit Anpassungen während der Bauphase. 188

Fig. 11-6: Schematische Darstellung mit den Ausbruchquerschnitten und -arten im Zwischenangriff Sigirino (Stand der Vortriebe am 16.11.2009). 189

Fig. 11-7: Schematische Übersicht der Ausbruchsicherungstypen im Ausführungsprojekt beim Vortrieb im Verzweigungsbauwerk Sarè. 189

Fig. 11-8: Schematische Übersicht der Ausbruchsicherungstypen im Ausführungsprojekt beim Vortrieb im Portalbereich Vezia. 189

Fig. 11-9: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die a) Ost- und b) Weströhre. 190

Fig. 11-10: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die Oströhre beim Vortrieb Sigirino für die nördliche und mittlere Ceneri-Zone. 191

Fig. 11-11: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die Oströhre beim Vortrieb Sigirino im Subparallelismus. 191

Fig. 11-12: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die CAOP und OPZ S EST. 192

Fig. 11-13: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die Oströhre beim Vortrieb Sigirino im Streckenabschnitt der Val-Colla-Zone. . . 192

Fig. 11-14: Effektive Ausbruchsicherung inklusive Klassenbereinigung für den Hosentunnel südlich der Stirnwand des Verzweigungsbauwerks Sarè. 192

Fig. 11-15: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die Oströhre beim Vortrieb Vezia (km 242.384– 242.723). 193

Fig. 11-16: Vergleich zwischen prognostizierter und effektiver Ausbruchsicherung für den FIS zwischen Tm 0 und 2308. 193

Fig. 11-17: Der Querschnitt des Raccordo Kaverne Ost mit allen Vortriebsetappen. 194

Fig. 11-18: Der Ausbruchsicherungstyp KVe.3A wurde an der Ortsbrust mit 9 m langen IBO-Ankern während der Durchörterung der kataklastisch-kakiritischen Störungszone 1Cbis.1 in der Kaverne West km 328–137 verstärkt. 195

Fig. 11-19: Radiale Verformungsmessungen in der Weströhre bei Station km 331.197 repräsentiert als Vektoren im Querprofil und Weg-Zeit-Diagramm. 196

Fig. 11-20: Auszug aus dem Festlegeblatt eines Ausbruchsicherungstyps SPV 6B in der Weströhre bei km 330.867 mit Einbau von Spiessen und Ortsbrustankern. 197

Fig. 11-21: Geotechnisches Modell für das Gefährdungsbild «Ortsbrustinstabilität» in der nördlichen Ceneri-Zone. . . . 197

Fig. 11-22: Interpretiertes geologisch-tektonisches Modell mit den Störungszonen im Gebiet des Val d'Isone (HB 6C – HB 10B). 199

Fig. 11-23: Interpretiertes geologisch-tektonisches Modell mit den Störungszonen im Gebiet des Val Mara (HB 12Abis). 199

Fig. 11-24: Interpretiertes geologisch-tektonisches Modell mit den Störungszonen im Gebiet der mittleren Ceneri-Zone (HB 15Bbis). 200

Fig. 11-25: Teststrecke mit Ergebnissen der Verformung für die Anpassung des Ausbruchsicherungstyps SPV 6A. . . 201

Fig. 11-26: Beispiel eines angepassten Ausbruchsicherungstyps SPV 6 bei km 235.881. 202

Fig. 11-27: Horizontalplan mit der eingebauten Ausbruchsicherung beim Vortrieb in der Val-Colla-Linie. 203

Fig. 11-28: Die radiale Verformungsmessung bei Station GbC-SO km 237.222 zeigt vorwiegend horizontale Verschiebungen im östlichen Parament und Paramentfuss. 204

Fig. 11-29: Einbau der Stahlbögen TH 25 im Ausbruchsicherungstyp SPV 5 in der Oströhre km 237.211. 204

Fig. 11-30: Einbau der Stahlbögen TH 25 mit Befestigung durch Lochplatte und Reibungsanker (ST-SPV 6A). 204

Fig. 11-31: Sicherungsmittel des Spiessschirms im Ausbruchsicherungstyp SPV 10 in der Oströhre bei km 237.488. 204

Fig. 11-32: Verformungsmessungen auf einem Stahlbogen in der Weströhre bei km 337.523. 204

Fig. 11-33: a) Verformungsmessungen in der Weströhre bei km 337.521. b) Weg-Zeit Diagramm Setzungen. 205

Fig. 11-34: Kataklastisch-kakiritische Störungszone in der Oströhre bei der Station km 237.472. 206

Fig. 11-35: Die Ortsbrust in der Oströhre bei km 237.839 zeigt die typischen Ereignisse des Homogenbereichs 30B mit Kluftkörpern und Ablösungen in Kalotte und westlichem Kämpferbereich sowie abgleitende Felsplatten in der Ortsbrust wegen bergauswärts fallender Schieferung. 206

Fig. 11-36: Die Ergebnisse der Verformungsmessungen stellen die Verformungszone im Bereich des Verzweigungsbauwerk Sarè dar. 207

Fig. 11-37: Teilsprengungen, Einbau der Ausbruchsicherung und Montage der Gitterbögen in der Kaverne Sarè West. 207

Fig. 11-38: Vortriebsphasen in der Kaverne Sarè West mit Kalottenstollen ab km 340.520. 208

Fig. 11-39: Vergleich der Vortriebsabschnitte im Verzweigungsbauwerk Sarè zwischen Projekt und Ausführung. . . . 209

Fig. 11-40: Ausbruchsicherung an der Stirnwand Kaverne Ost im Verzweigungsbauwerk Sarè. 210

Fig. 11-41: a) Letzter Abschnitt (VSO 3) der Kalotte in der Kaverne Sarè Ost gesichert mit Gitterbögen bis zur Stirnwand. 211

Fig. 11-42: Vortriebsstände und Horizontalschnitt des Einspurtunnels nach Lugano und Tunnelstumpen in der Kaverne Sarè West mit geologischem Befund. 212

Fig. 11-43: Abfolge der Vortriebsetappen im Anschluss an das Verzweigungsbauwerk Sarè, Auszug aus dem Festlegeblatt Mozz-Ovest bei Tm 12. 213

Fig. 11-44: Schematische Darstellung mit der Lage des Überführungsbauwerks der Fortsetzung Süd mit einer Länge von 170 m zwischen km 241.940 – 242.110. 213

Fig. 11-45: Längenschnitt des Überführungsbauwerks am Kreuzungspunkt mit minimaler Felsüberlagerung von 1,2 m. 214

Fig. 11-46: Das Höhenprofil entlang der Tunnelachse West zeigt die wiederholte Querung des Tunneltrassees mit den Mäandern des Gaggio im Val Ponteggia. 215

Fig. 12-1: Steinschlagereignis vom 05.09.2006 oberhalb des Baustellenplatzes in Sigirino. 216

Fig. 12-2: Geomorphologische Karte mit der Position der Steinschlagnetze oberhalb des Installationsplatzes Sigirino. 216

Fig. 12-3: Portaleinschnitt des FIS. 217

Fig. 12-4: Geotechnische Kartierung auf der linken Seite des Portaleinschnittes. 217

Fig. 12-5: Lose Felsblöcke zwischen Kote 430 und 445 m wurden gesprengt und von Hand gereinigt. 217

Fig. 12-6: Längenschnitt des Portaleinschnittes entlang der Tunnelachse des FIS mit einer Gesamthöhe von 43 m. 218

Fig. 12-7: Das Panoramafoto zeigt die Struktur der Ablagerung am 06.06.2013 südlich des Installationsplatzes. 218

Fig. 12-8: Horizontalplan im Projekt für die Ablagerung während der Bauausführung im Zeitraum zwischen 2010 und 2014. 219

Fig. 12-9: a) Horizontalplan im Projekt für die Planung der Basisdrainage der Bauausführung b) Gabione. 219

Fig. 12-10: Einbau des Filtervlieses, Auffüllen der Gabionen, Planierarbeiten und oberste Humusschicht am Südrand der Ablagerung. 220

Fig. 12-11: a) Kumuliertes Ausbruchmaterial nach Vortriebsende b) Baumethodik im Inneren der Ablagerung c) Bau der Böschung. 221

Fig. 12-12: Querschnitt der bewehrten Böschung mit einer Neigung von 70° und einer Gesamthöhe von 29 m. 222

Fig. 12-13: a) Bewehrte Böschung im Bereich des FIS-Portals mit Geogitter der Schicht 128 bei Höhenkote 464 m b) Detail der Konstruktion. 223

Tabellen

Tab. 1-1: Allgemeine Projektdaten des Ceneri-Basistunnels. . . 39

Tab. 1-2: Übersicht aller internen geologischen Schlussberichte des Abschnitts Ceneri, die bei swisstopo archiviert sind. 41

Tab. 2-1: Übersicht über die Verformungs- und Metamorphose-ereignisse während der Entwicklung des südalpinen Grundgebirges im Tessin. 45

Tab. 2-2: Unterteilung und Beschreibung der Lithotypen des geologischen Modells des Homogenbereichs 30. 51

Tab. 3-1: Übersicht der angetroffenen Homogenbereiche und geologischen Formationen im CBT. 53

Tab. 3-2: Beschreibung und Korrelation der angetroffenen metabasischen Gänge im CBT. 66

Tab. 3-3: Abfolgen und Längen der Homogenbereiche im Vergleich Prognose – Befund. 81

Tab. 4-1: Einstufung der Schieferungsflächen nach Trennflächen-abständen (Bankung). 86

Tab. 4-2: Einstufung der Störungszonen beim Vortrieb im CBT. 89

Tab. 4-3: Einstufung der Kluftflächenabstände. 93

Tab. 4-4: Einstufung der Klüfte aufgrund ihrer Ausbisslinie im Aufschluss (Persistenz). 93

Tab. 4-5: Einstufung der Durchtrennung. 93

Tab. 5-1: Klassifizierung der Tropfstellen nach dessen Intensität für Abschnitte pro 10 m. 102

Tab. 5-2: Koeffizient zur Ermittlung von stationären Schüttungsmengen basierend auf die Erfahrungen beim Vortrieb des CBT. 105

Tab. 5-3: Hauptparameter mit Einfluss auf die Beständigkeit des Betons. Elektrische Leitfähigkeit [µS/cm] gemessen bei 25° C. 108

Tab. 5-4: Übersicht des Nordgefälles im CBT, eingeteilt nach Streckenabschnitten. 109

Tab. 6-1: Kontrollplan mit entsprechenden analytischen Methoden. 118

Tab. 6-2: Gefahrenstufen Asbest auf der Baustelle des CBT, festgelegt nach der EKAS Richtlinie Nr. 6503. 119

Tab. 7-1: Einteilung des Ausbruchmaterials des CBT. 121

Tab. 7-2: Wiederverwertbarkeit der Gesteine in den angetroffenen Lithologien. 121

Tab. 9-1: Streubreiten (unteres Quartil – oberes Quartil) der felsmechanischen Gesteinskennwerte der Prognose. 124

Tab. 9-2: Streubreiten (unteres Quartil – oberes Quartil) der Mohr-Coulomb-Gesteins-Festigkeitsparameter der Prognose (Stufe Bauprojekt) aus triaxialen Versuchen. 125

Tab. 9-3: Resultate der triaxialen Druckversuche an der EPFL und an der ETHZ. 125

Tab. 9-4: Übersicht der durchgeführten Labor- und Feldversuche während der Bauausführung. 126

Tab. 9-5: Medianwerte und Standardabweichungen der felsmechanischen Kennwerte aus den Punktlast- und Einaxialen Druckfestigkeitversuche. 126

Tab. 9-6: Medianwert und Standardabweichungen der felsmechanischen Kennwerte der Triaxialversuche mit konstantem Seitendruck, Spaltzugfestigkeit- und Abrasivitätsversuche (FIS) 127

Tab. 9-7: Übersicht über die Ergebnisse aller mehrstufigen Triaxialversuche der Kakiritproben aus der LVC unter drainierten Bedingungen. 128

Tab. 9–8: Resultate der durchgeführten TBM-Penetrations-versuche im Fensterstollen Sigirino. 129

Tab. 9-9: Ausgeführte Kernbohrungen beim Vortrieb des CBT geordnet nach Kilometrierung. 137

Tab. 9-10: Beschreibung des angepassten geotechnischen Prognosemodells für den Vortrieb im Verzweigungs-bauwerk Sarè. 140

Tab. 9-11: Vorgesehene Intervalle für die Verformungs- und Extensometermessungen gemäss Überwachungskonzept nach Ausbruchsicherungstyp. 145

Tab. 9-12: Vertraglich festgelegte Grenzwerte der Rayleigh-Werte VR_{max} für Gebäudefundamente (abgeminderte Werte gemäss SN 640 312a). 156

Tab. 9-13: Einstufung der Standfestigkeit des Felsen, basiert auf der Gebirgsklassifizierung SIA 198 und (Lauffer 1958). 159

Tab. 10-1: Im Ausführungsprojekt definierte Gefährdungsbilder. 161

Tab. 11-1: Vertraglich vorgesehene Einschränkungen von Spreng- und mechanischen Arbeiten im CBT. 184

Tab. 11-2: Gegenüberstellung der angepassten Ausbruch-sicherungstypen SPV 2–4. 196

Tab. 11-3: Massnahmenplan gemäss Konzept für das Vorgehen bei Auftreten von Entspannungs- und Bergschlägen beim Vortrieb im CBT. 198

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung auf Deutsch	Erläuterung auf Italienisch
AST	Ausbruchsicherungstyp	Profilo tipo di sostegno (PTS)
AT km	Kilometrierung der AlpTransit-Linien	Progressiva chilometrica secondo linee AlpTransit
ATG	AlpTransit Gotthard AG	AlpTransit San Gottardo SA
BAV	Bundesamt für Verkehr	Ufficio federale dei trasporti (UFT)
BG	Baustellengeologe	Geologo di cantiere
bis	Angepasster Ausbruchsicherungstyp/nicht prognostizierter und/oder geänderter Homogenbereich oder Störungszone/ergänzende Kernbohrung	Provvedimento di sicurezza adattato/zona disturbata o tratta omogenea non prognosticata o./e. modificata/ sondaggio carottato integrativo
Bm	Bohrmeter	Progressiva metrica di sondaggio
B-SBVC	Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone	Basiti e semibasiti della Zona Val Colla
B-UBC	Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone	Baisiti e ultrabasiti della Zona Ceneri
CAI	Cerchar Abrasivitäts-Index, s. Cerchar-Versuch	Indice di abrasività Cerchar
CAOP	Logistikkaverne	Caverna operativa
CBT	Ceneri-Basistunnel	Galleria di base del Ceneri (GbC)
CG	Ceneri-Gneis	Gneiss del Ceneri (GC)
CPC	Kaverne für die Betonanlage	Caverna di produzione del calcestruzzo
CPS	Erkundungsstollen Sigirino	Cunicolo di prospezione di Sigirino
CZ	Ceneri-Zone	Zona Ceneri (ZC)
EKAS	Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit	Commissione federale di coordinamento per la sicurezza sul lavoro (CFSL)
EPFL	Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne, frz. École polytechnique fédérale de Lausanne	Scuola Politecnica Federale di Losanna
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	Scuola Politecnica Federale di Zurigo
FIS	Fensterstollen Sigirino	Finestra di Sigirino
GBT	Gotthard-Basistunnel	Galleria di base del Gottardo (GbG)
GCornub	Hornfels	Gneiss cornubianitico
GGium	Giumello-Gneis	Gneiss Giumello
GIS	Geografisches Informationssystem, engl. Geographic Information System	Sistema informativo geografico
GTL	Tesserete-Grona-Linie	Linea Tesserete-Grona
GStab	Stabbiello-Gneis	Gneiss Stabbiello
HB	Homogenbereich	Tratta omogenea (TO)
IG	Ingenieurgemeinschaft	Consorzio ingegneri
ITC	Ingenieurgemeinschaft CBT (Itecsa–Toscano)	Consorzio Ingegneri Progettisti GbC (Itecsa–Toscano)
IVZ	Ivrea-Verbano-Zone	Zona Ivrea-Verbano (ZIV)
LAF	Lungengängige Asbestfasern	Fibre di amianto respirabili (FAR)
LAK	LCPC-Abrasitiviätsindex	Indice di abrasività LCPC

LAT	AlpTransit-Linie	Linea AlpTransit
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, s. LCPC-Verfahren	–
LT	Lithotyp	Litotipo
LVC	Val-Colla-Linie	Linea Val Colla (LVC)
LVC-FM	Phyllonit, Mylonit und Schiefer der LVC	Fillonite, milonite e scisti della LVC
LVC-GS	Gneis und Schiefer der LVC, z.T. Stabbiello-Gneis ähnliche Gesteine	Gneiss e scisto della LVC, in parte affine allo Gneiss Stabbiello
MCZ	Mittlere Ceneri-Zone	Zona Ceneri Intermedia (ZCI)
MuKa	Muffenkammer	Camera di tiraggio cavi
NCZ	Nördliche Ceneri-Zone	Zona Ceneri Nord (ZCN)
OBL	Oberbauleitung	Direzione generale dei lavori (DGL)
öBL	Örtliche Bauleitung	Direzione locale dei lavori (DLL)
OGBern	Bernardo-Orthogneis	Ortgoneiss del Bernardo
OGC	Ceneri-Orthogneis	Ortogneiss del Ceneri
PG	Projektgeologe Dr. Baumer AG	Geologo di progetto Dr. Baumer SA (GP)
PGC	Ceneri-Paragneis	Paragneiss del Ceneri
QS	Querschlag, Verbindungsstollen zwischen beiden Einspurtunnel	Cuniculo trasversale (CT)
RA	Ringanschluss	Raccordo anulare
RQD	engl. Rock Quality Designation	–
SB	Spritzbeton	Calcestruzzo proiettato
SBB	Schweizerische Bundesbahn	Ferrovie federali svizzere (FFS)
SCZ	Südliche Ceneri-Zone	Zona Ceneri Sud (ZCS)
SIOP	Sachverständigen-Gruppe «Sicherheitsorientierte Prüfung»	Gruppo di esperti addetti alla verifica della sicurezza dell'opera
SISO	Site information Software, Web-basiertes Baustellen-journal der Firma SISO AG	Giornale di cantiere basato sul web della società SISO SA.
SOK	Schienenoberkante	Piano del binario
SPV	Sprengtechnischer Vortrieb/Sprengvortrieb	Avanzamento all'esplosivo
StrCZ	Strona-Ceneri-Zone	Zona Strona-Ceneri (ZC)
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt	Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni
SZ	Störungszone	Zona disturbata (ZD)
TBM	Tunnelbohrmaschine	Fresa meccanica a piena sezione
TBT-AT	Technisches Begleitteam AlpTransit	Team tecnico di accompagnamento AlpTransit
Tm	Tunnelmetrierung	Progressiva metrica
TSP	engl. Tunnel Seismic Prediction	–
UCS	Einaxiale Druckfestigkeit, engl. uniaxial compressive strength	Resistenza a compressione monoassiale
VCZ	Val-Colla-Zone	Zona Val Colla (ZVC)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	Associazione degli ingegneri tedeschi
XRD	Röntgendiffraktometrie, engl. X-ray Diffraction	Diffrattometria a raggi X

Wortverzeichnis

Begriff	Erläuterung auf Deutsch
2–4 Uhr	Positionsangabe im Querschnitt des Tunnels (in der jeweiligen Vortriebsrichtung gesehen).
Akkretion	Anwachsen von magmatischen, metamorphen oder sedimentären Gesteinen an eine Kontinentalplatte durch tektonische oder magmatische Prozesse.
Alteration	Umwandlung von Mineralen in einem Gestein in Sekundärminerale durch metamorphe Prozesse.
Anatexis	Vollständige oder partielle Aufschmelzung von Gesteinen.
Äquigranulares Gefüge	Gleichkörniges Gefüge.
Arbeitsbereich L1, L2, L3	Bezeichnung der Arbeitsbereiche. L1 = Brustbereich, L2 = Vortriebsbereich, L3 = Rückwärtiger Bereich.
Ausbruchsicherung	Massnahmen zur Wahrung von Arbeits- und Standsicherheit sowie zur Beschränkung der Gebirgsverformungen im Bereich des ausgebrochenen Hohlraums während der Bauausführung.
Ausbruchsicherungstyp	Darstellung des Ausbruchquerschnitts, der Ausbruchsicherung und der allfälligen Bauhilfsmassnahmen.
Bergschlag	Schlagartige Spannungsumlagerung mit Abplatzen von Gebirgsteilen am Ausbruchsrand in den Hohlraum.
Bergschlagähnliche Erscheinungen, Entspannungsschlag	Rasche Spannungsumlagerung mit deutlich geringerem Ausmass an freiwerdender Energie im Vergleich zum Bergschlag. Die Klassifizierung liegt zwischen leichtem bis starkem Entspannungsschlag und äussert sich durch bergschlagähnliche Erscheinungen in Form von Rissbildung oder Abschalung im Ausbruchsrand mit Knistern bis leichtes Abplatzen von Gebirgsteilen mit Knallen.
Bergwärts einfallende/ausfallende Schieferung	Schieferung die in Richtung des Vortriebs (in den Berg hinein)/gegen die Richtung des Vortriebs (aus dem Berg hinaus) fällt.
Bretella Locarno–Lugano	Anschluss Locarno–Lugano.
Cerchar-Versuch	Beim Cherchar-Versuch wird ein Indexwert (CAI) für die Abrasivität eines Festgesteins mittels einem Prüfstift aus Stahl bestimmt.
Drainage	Entwässerung des Gebirges mit Bohrungen, Drainageröhren, Flächenelementen, Sickerpackungen, Sohlschüttungen usw.
Felsische Minerale	Felsische Minerale, im Gegensatz zu den mafischen Mineralen, weisen meist eine helle Färbung auf und sind eine Sammelbezeichnung für die gesteinsbildenden Silikatminerale Quarz, Feldspat und die Minerale der Foidgruppe.
Foliation	Schichtartiger Bereich im Gestein, welcher nicht der Hauptschieferung zugeordnet wird. In diesem Bericht wird der Begriff Foliation für eine jüngere noch nicht vollständig ausgeprägte Schieferung verwendet, z.B. in einer Scherzone, bei der eine Neueinregelung der Minerale entsteht.
Gefährdungsbild	Beschreibung einer kritischen Situation oder eines unerwünschten Ereignisses für ein Bauwerk und/oder seine Umgebung, bei welcher mit Hilfe von geotechnischen oder baulichen Massnahmen (Vortriebsverfahren, Ausbruchsicherung und Ausbau) die Sicherheit gewährleistet oder unerwünschte Ereignisse verhindert werden soll.
Geologische Einheit	Locker- oder Festgesteinseinheit (sedimentär, kristallin oder metamorph), die aufgrund von zeitlichen oder geologischen Zusammenhängen definiert wird.
Granitoide Serie	Vielfalt an Muskovit-Biotit-Quarz-Plagioklas führenden Gesteinen, z.T. mit alumosilikatreichen Mineralen und Kalifeldspat, in der nördlichen Ceneri-Zone. Die Textur ist oft gneisig bis magmatisch (Zurbriggen et al. 1997). Im Projekt entsprechen sie den Ceneri-Orthogneisen, deuten auf Granite mit sedimentärer Herkunft (S-Typ-Granite) und sind mit der paragenen Serie in der nördlichen Ceneri-Zone assoziiert.

Granoblastisches Gefüge	Ein typisches Gefüge für Gneise, in dem alle Kristalle etwa die gleiche Grösse aufweisen.
Grundwasser, Bergwasser	Wasser unter der Terrainoberfläche, welches die Poren, Klüfte oder Hohlräume des Gebirges zusammenhängend und vollständig ausfüllt. Unter Bergwasser wird Grundwasser im Festgestein verstanden.
Homogenbereich	Bereich, in dem Gebirgs- und Baugrundeigenschaften innerhalb festgelegter Grenzwerte liegen.
Hosentunnel	Bauwerk mit zwei Anschlusstunnel südlich der Stirnwand des Verzweigungsbauwerkes Sarè, die ohne Bahntechnikausrüstung ausgestattet sind und als Vorbereitung für eine künftige Streckenfortsetzung in Richtung Süden dienen. In den Projektunterlagen wurden die Anschlusstunnel auch Tunnelstumpen oder «Mozziconi» genannt.
Hypidiomorpher Kristallhabitus	Die Kristalle haben nur zum Teil einen idiomorphen (eigengestaltigen) Habitus, weil sie während dem Wachstum an manchen Stellen daran gehindert wurden, in ihrer eigenen Form zu kristallisieren.
Idiomorph	Gegenteil von xenomorph. Bezieht sich auf die Form der Minerale, bei denen der Habitus eigengestaltig ausgeprägt wurde.
Inäquigranulares Gefüge	Ungleichkörniges Gefüge.
Isoorientiertes Gefüge	Parallel zum Gefüge orientiert, im Zusammenhang mit der Textur im Gestein.
Kakirit, Kataklasit, Mylonit	Resultat tektonisch bedingter, überwiegend mechanischer Verformungen im Festgestein. – Kakirit: Lockergestein, richtungslos – Kataklasit: stark zerbrochenes Festgestein – Mylonit: rekristallisiertes Festgestein, feingeschiefert oder laminiert
Kaverne	Untertagbau mit grossem Querschnitt und relativ geringer Länge.
Krenulation/Krenulations-schieferung	Verformung einer älteren Schieferung durch eine jüngere. Dabei werden die älteren Schieferungsflächen zu einer Runzelschieferung (Mikrofalten) deformiert, welche die Orientierung der jüngeren Schieferung markiert.
LCPC-Verfahren oder Abroy-Verfahren	Ein vom Laboratoire Central des Ponts et Chaussees (LCPC) entwickeltes Verfahren zur schnellen und ökonomischen Beurteilung der Abrasivität von Fest- und Lockergesteinen.
Lepidoblasten/lepidoblastisches Gefüge	Blättchen- oder schuppenförmiges Gefüge eines metamorphen Gesteins, wie beispielsweise bei glimmerreichen Gesteinen.
Mafische Minerale	Mafische Minerale sind sehr magnesium- und eisenhaltig und weisen vorwiegend eine dunkle Färbung auf (vgl. felsische Minerale).
Niederbruch	Plötzliches Einbrechen von gestörtem, zerklüftetem und/oder zerbrochenem Gebirge, Bergschlag und spannungsbedingte Abschalung sowie Ablösung in den Hohlraum.
Paragene Serie	Polymetamorphe Metasedimente der Ceneri-Zone.
Paramentfuss	Auf der Baustelle auch Kicker genannt. Übergang zwischen Parament (Ulme) und Sohlgewölbe.
Perthitische Struktur	Lamellenartige Entmischung in einer Feldspatmischreihe, z.B. von Albit im Kalifeldspat.
Porphyroblasten, porphyro-blastisches Gefüge	Einschlüsse von grösseren Kristallen einer Mineralart in einer feinkörnigeren Matrix. Porphyroblasten und Matrix werden zusammen als porphyroblastisches Gefüge bezeichnet.
Postkinematisch	Tektonische Ereignisse finden nach der Verformung statt, auch posttektonisch genannt.
Primärer Spannungszustand	Natürliche, dreidimensionale Spannungsverteilung im Gebirge vor Beginn eines Hohlraumausbruchs.
Rohrschirm	Ausserhalb des Ausbruchquerschnitts in Vortriebsrichtung eingetriebene Stahlrohre zur Sicherung der nachfolgenden Ausbrucharbeiten.
S-C- und S-C'-Strukturen	Semiduktiles Flächengefüge mit schräger Foliation, das durch Scherbewegungen innerhalb eines Verformungsbereiches entsteht. S-C-Gefüge enthalten primäre (S) Schieferungs- und (C) Scherflächen. Dabei werden die S-Flächen durch die Scherung gegen die C-Flächen geneigt. Mit zunehmender Scherung drehen sie kontinuierlich in die C-Ebene bis sie parallel liegen. Häufig ist ein sigmoidales Gefüge zu erkennen. Mit zunehmender und extensiver Verformung entstehen S-C'-Gefüge (ECC-Gefüge). So entstehen C'-Scherflächen, die die S- und C-Flächen in flachem Winkel schneiden. Die C'-Flächen stellen meist Mikroabschiebungen (Abschiebungskrenulation) dar und sind gute Schersinnindikatoren.
Schieferung	Makroskopisch erkennbares, im Wesentlichen tektonisch bedingtes, parallel gerichtetes, engständiges Flächengefüge im Gestein.
Schlingentektonik	Gebirgsstruktur mit grossräumigen und langgezogenen Falten, deren Achsen steil abtauchen. Die Schlingentektonik ist vermutlich durch die regionale präalpine Faltenbildung entstanden.

Schmierlassen	Harnischflächen mit Kakiritfüllung.
Sekundärer Spannungszustand	Dreidimensionale Spannungsverteilung im Gebirge in Folge eines Hohlraumausbruchs.
Spiesse, Spiessschirm	Ausserhalb des Ausbruchquerschnitts in Vortriebsrichtung eingetriebene Stahlstäbe oder -rohre zur Sicherung der nachfolgenden Ausbrucharbeiten.
Standfestigkeit	Auswirkung der Gebirgseigenschaften respektive des Gebirgsverhaltens im Bereich des geschaffenen Hohlraums ohne das Vorhandensein von Ausbruchsicherungen. Neben der Felsbeschaffenheit hängt die Standfestigkeit des Felsen auch von den geometrischen Eigenschaften des Bauwerks, wie z.B. die Grösse der Querschnittsfläche und die Form des Ausbruchprofils ab.
Stirnwand	Vorderste Wand einer Kaverne, z.B. im Verzweigungsbauwerk Sarè.
Stollen	Untertagbauwerke mit kleinem Querschnitt.
Störung	Durch einen tektonischen, gravitativen oder chemischen Prozess gestörter Gesteinsbereich.
Störungszone	Ansammlung von mehreren Störungen auf einem grösseren Streckenabschnitt, oft verfächert mit wenig bis ungestörtem Gestein dazwischen.
S-Typ-Granit	Granite, die durch Aufschmelzung und Rekristallisation von Sedimentgesteinen (engl. sedimentary source).
Subkornbildung	Unterteilung eines Mineralkorns in mehrere Bereiche, die sich durch leichte Missorientierung unterscheiden lassen. Die Subkornbildung ist häufig in verformten Quarzminerale sichtbar.
Subparallelismus	Streckenabschnitt des CBT, in dem die Streichrichtung der Strukturen (Hauptschieferung und Störungszonen) parallel bis subparallel zur Tunnelachse orientiert sind.
Swellex-Anker	Reibrohranker mit hoher Tragkraft, bestehend aus einem Stahlrohr, welches durch Faltung auf einen kleinen Durchmesser reduziert wurde. Durch das Einpressen von Wasser in das beidseitig durch Muffen abgedichtete Rohr entfaltet sich das Rohr und wird gegen die Bohrlochwand gepresst. Swellex-Anker werden vorwiegend zur sofortigen Sicherung von Kluftkörpern eingesetzt.
Synkinematisch	Tektonische Ereignisse finden während der Verformung statt, auch syntektonisch genannt.
Thermische Anomalie	Lage im Untergrund an der die thermischen Eigenschaften (geothermischer Gradient) signifikant von der Umgebung abweichen.
Trennfläche	Sammelbegriff für Flächen, in welchen der Zusammenhalt des Gesteins vollständig aufgehoben oder geschwächt ist.
Tunnel	Untertagbauwerk von grosser Länge und mit einer Höchstneigung von 20 %.
Tunnelstumpen (ital. mozziconi)	s. Hosentunnel.
Überprofil	Arbeitstechnisch bedingter Mehrausbruch oder geologisch bedingter Niederbruch bzw. Mehrausbruch entlang des Tunnelprofils (ausserhalb des Sollprofils). In diesem Bericht wird unterschieden zwischen geologischem und arbeitstechnischem Überprofil.
Unterplattung, engl. Underplating	Akkretion von Krustenmaterial an der Unterseite einer Platte durch tektonische oder magmatische Prozesse.
Verkleidung	Zur Ergänzung der Ausbruchsicherung oder getrennt ausgeführte Massnahmen, die dem Tragwerk (Gewölbe) die erforderlichen Eigenschaften (Tragfähigkeit, Form, Aussehen usw.) geben.
Verwitterung	Natürliche Zersetzung, Zerstörung und Umwandlung von Gestein durch exogene Prozesse (Sonne, Wind, Wasser, Eis, Temperaturen) infolge dessen exponierter Lage an oder nahe der Erdoberfläche.
Verzweigungsbauwerk	Bauwerk aus dem zwei Tunnelröhren abzweigen.
Vortrieb	Erforderliche Arbeiten für das Erstellen eines Hohlraums im Gebirge: Ausbruch, Ausbruchsicherung sowie allfällige Bauhilfsmassnahmen.
Xenomorph	Gegenteil von idiomorph. Bezieht sich auf die Form der Minerale, bei denen der Habitus nicht eigengestaltig ausgeprägt wurde.
Zweite Spannungsumlagerung	Weitere Veränderung eines sekundären Spannungszustandes, nachdem sich der primäre Spannungszustand nach dem Ausbruch des Hohlraumes bereits umgelagert hat, z.B. durch den Ausbruch der Strosse, oder durch die gegenseitige Beeinflussung von zwei Tunnelvortrieben.

Bezeichnungen

Abkürzung	Beschreibung	Masseinheit
	Becquerel	Bq
c (c′)	Kohäsion (effektive Kohäsion)	Pa
k	Durchlässigkeitsbeiwert	m/s
D	Durchmesser	M
E	Elastizitätsmodul	Pa
I_a	Anisotropie-Index	Pa
	Asbest Fasergehalt	LAF/m³
	Geologisches Überprofil pro Tunnel-Laufmeter	m³/m′
	Gewichtskraft	N
	Massenkonzentration	km/m³
T	Temperatur	°C
	Penetration	mm/U
pH	Mass für den Säuregehalt von wässrigen Lösungen	dimensionslos
	LCPC-Index	g/t
φ (φ′)	Reibungswinkel/Scherwinkel (effektiver Reibungswinkel)	°
	Sievert	Sv
σ (σ′)	Spannung (effektive Spannung)	Pa
γ	Spezifisches Gewicht/Wichte	kN/m³
	Strahlenexposition	µSv/h
	Vortriebsleistung pro Arbeitstag	m/AT
	Meter über Meer	m ü.M.

1. Einführung

Der Ceneri-Basistunnel (CBT) ist der dritte und drittlängste Basistunnel der Schweiz und Teil des südlichsten Abschnittes der Neuen Eisenbahn-Alpentransversalen (NEAT). Die NEAT verfügt nach Eröffnung des CBT über eine Flachbahnstrecke von Zürich bis Lugano (Fig. 1-1).

Der vorliegende zusammenfassende Schlussbericht des CBT beschreibt den geologischen, geotechnischen und hydrogeologischen Befund und die daraus folgenden bautechnischen Erkenntnisse, die beim Vortrieb zwischen September 2007 und Januar 2016 gewonnen wurden.

Die im CBT aufgenommenen Daten enthalten Informationen aus den Ortsbrustaufnahmen, den petrographischen und geomechanischen Untersuchungen an Gesteinsproben sowie Informationen aus den Vorauserkundungen (Schlag- und Kernbohrungen). Des Weiteren präsentiert der Bericht Untertagedaten aus der Bautechnik, der Wasserführungs-, Verformungs- und Extensometermessungen oder der Asbestuntersuchungen. Die zahlreichen erfassten Übertagedaten beschreiben die Erkenntnisse der Erschütterungs- und Körperschallmessungen oder Setzungsmessungen im Abschnitt der Autobahn A2 und SBB-Bahnlinie in Vigana.

1.1 Beschreibung des Bauwerks in Bezug auf das Gesamtprojekt

Der CBT wurde im Rahmen des Projektes «NEAT» erstellt und bildet den südlichen Zubringer zum Gotthard-Basistunnel. Zum Abschnitt CBT zählen zwei Grossbauwerke, bestehend aus dem Basistunnel, welcher Gegenstand des vorliegenden Berichtes ist, und dem Anschlussknoten Camorino. Der 15,475 km lange CBT mündet mittels Anschlussbauwerk Vezia einerseits in die bestehende SBB-Linie Lugano–Bellinzona und anderseits, ab dem Nordportal Vigana, in die Abzweigung zur Magadino-Linie der SBB. Dabei entsteht für den Tessiner Regionalverkehr eine direkte Bahnverbindung zwischen Bellinzona, Locarno und Lugano, die es ermöglicht, die heutige Reisezeit von 60 Minuten zwischen Sopraceneri und Sottoceneri zu halbieren.

Das Tunnelsystem durchquert das Grundgebirge der Südalpen zwischen dem Nordportal Vigana und dem Südportal Vezia aufsteigend mit einer mittleren Steigung von 6,3‰. Es besteht aus zwei Einspurtunnel mit einem Ausbruchquerschnitt von 62–87 m² und einem Achsabstand von rund 40 m. Die beiden Tunnelröhren sind durch insgesamt

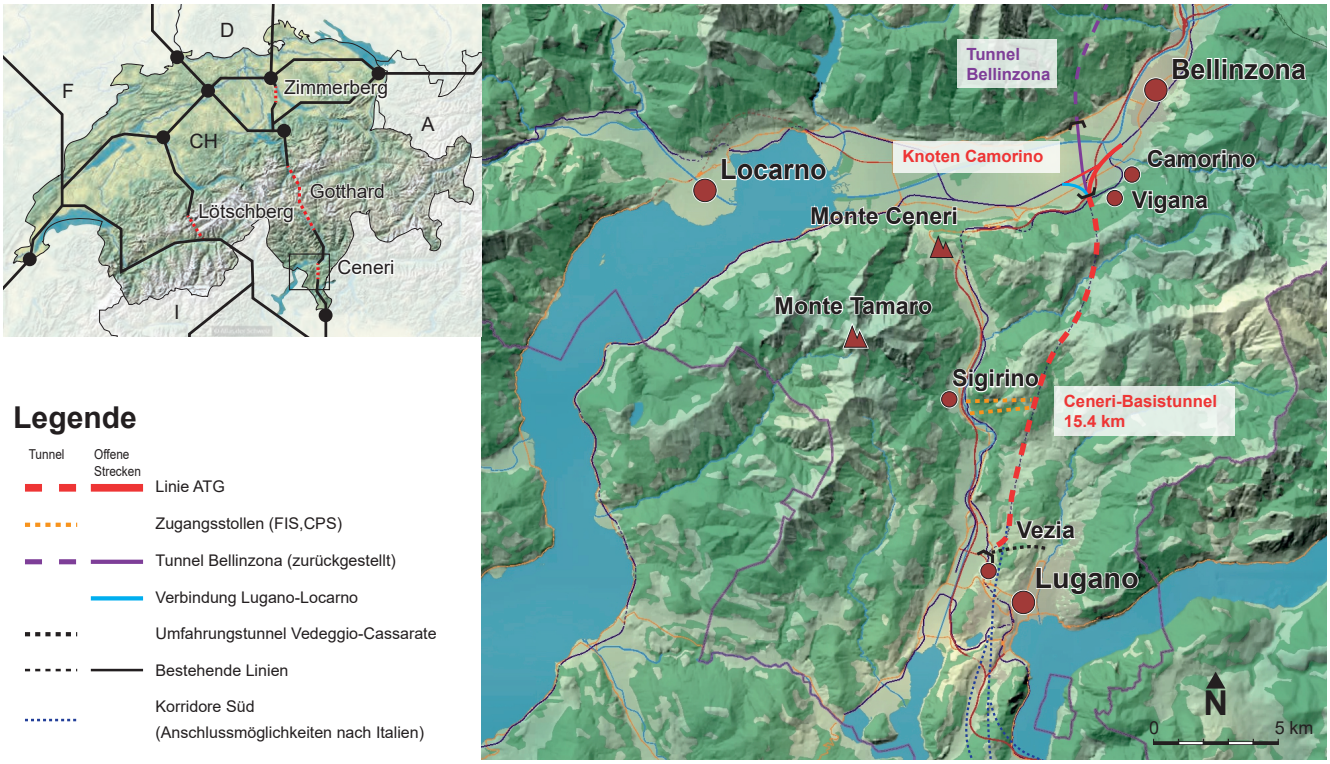


Fig. 1-1: Übersicht der Linienführung des Ceneri-Basistunnels. Oben links dargestellt die Gesamtübersicht aller NEAT-Bauwerke. (Topographischer Hintergrund: Atlas der Schweiz, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich).

48 Querschläge verbunden. Die Querschläge dienen der Unterbringung von technischen Einrichtungen für den Bahnverkehr; die primäre Funktion ist jedoch die Realisierung eines sicheren Fluchtwegkonzepts für den Ereignisfall.

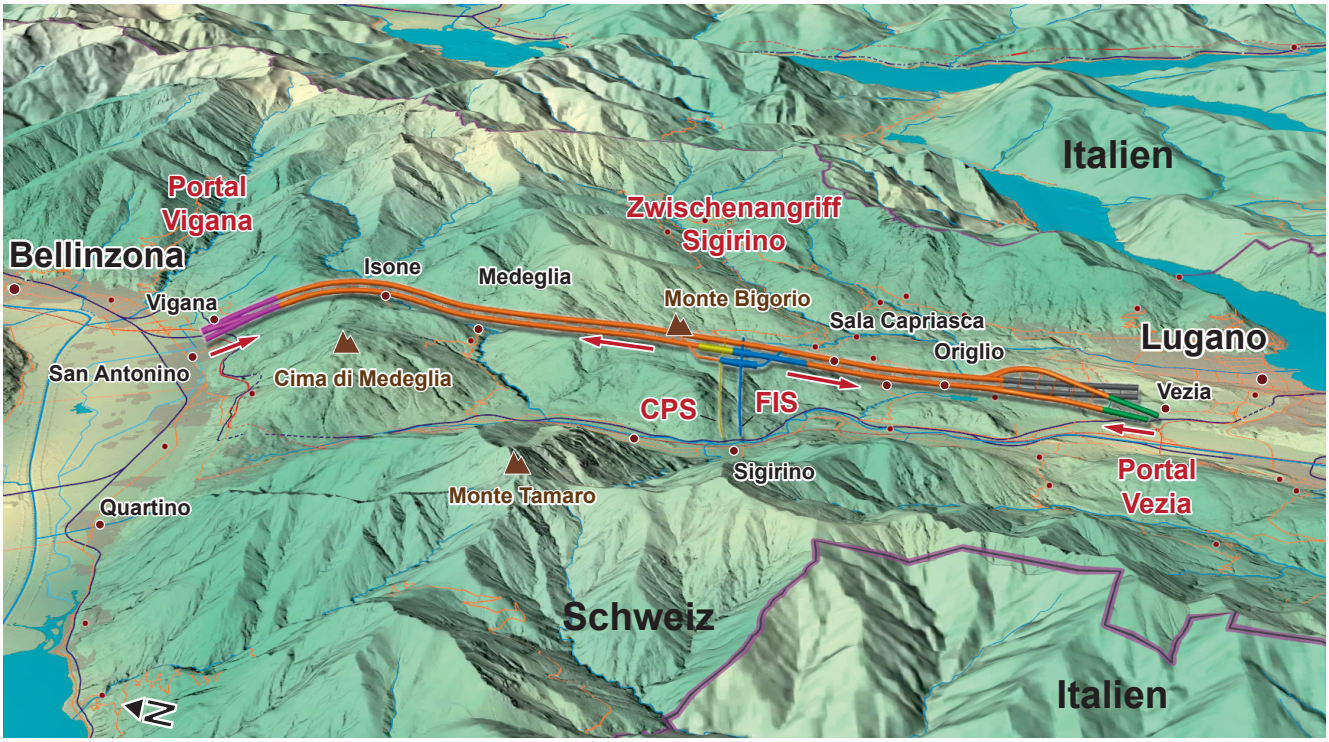
Aufgrund der geologisch-geotechnischen Beschaffenheit des Gebirges, der Umweltfaktoren im Hinblick auf die Siedlungsgebiete im Nahbereich beider Portale und der Bautechnik war es notwendig, die gesamte Logistik und die Ablagerung für das Ausbruchmaterial des Hauptvortriebes an einem zentral gelegenen Ort einzurichten. Dieses Vorhaben konnte mit einem Zwischenangriffsdispositiv am Standort Sigirino und einem Fensterstollen als baulogistischen Zugang zu den Logistikkavernen (CAOP) und zu den Einspurtunnel realisiert werden (Fig. 1-2). Die Logistikkavernen boten mit deren ausgebrochener Querschnittsfläche von 238 m² genügend Platz für eine unterirdische Betonproduktionsanlage, mehrere Materialdepots und einen Sicherheitsraum. Von den Logistikkavernen aus wurde die Baustellenlogistik für das gleichzeitige Arbeiten an vier Fronten, mit zwei Vortrieben nach Süden (Lugano) und zwei nach Norden (Bellinzona), gewährleistet.

Bei der Lokalität Sarè, südlich des Lago d'Origlio und rund 2 km vor dem Südportal Vezia, wurde das unterirdische Verzweigungsbauwerk Sarè mit einer ungefähren Länge von 400 m inklusiv zwei 150 m langen Tunnelstumpen (im Projekt auch «Mozzicone» genannt) ausgebrochen, welche den Bau einer zukünftigen Verlängerung nach Süden gewährleisten, ohne den Bahnbetrieb nennenswert einzuschränken.

Das Verzweigungsbauwerk Sarè erreicht einen Ausbruchquerschnitt von 298 m² mit flachem Sohlgewölbe und prägt zusammen mit dem Anschlussbauwerk Vigana (Ausbruchquerschnitt 232 m²) und den Logistikkavernen der CAOP, die für den Zwischenangriff in Sigirino erstellt wurden, das eigentliche Kernstück des CBT. Die Logistikkavernen dienten nur temporär für den Zwischenangriff und wurden nach Bauende teilweise wieder verfüllt.

Die zwei Einspurtunnel und die Querschläge wurden, mit Ausnahme der Portalbereiche, in bergmännischer Bauweise durch Sprengvortrieb realisiert.

Der Bau der beiden Portaleinschnitte Vezia und Vigana startete im März respektive Oktober 2008. Die ersten Bautätigkeiten begannen im Februar 1997 mit dem Vortrieb des Erkundungsstollens (CPS) in Sigirino. Der CPS diente vorerst als Zugangsstollen für die Logistikkavernen und später während dem Vortrieb Baulos Sigirino als Zuluftstollen für die Baulüftung und als Rettungsstollen. Der Bau des Hauptbauwerks begann offiziell am 2. Juli 2007 mit dem Einrichten des Installationsplatzes und der Lüftung im CPS. Die erste Sprengung für den Bau des Fensterstollens erfolgte am 07.09.2007 (TBM-Startröhre). Am 15.02.2008 erfolgte das Andrehen der Vortriebsmaschine für den Ausbruch des späteren Hauptzugangsstollens FIS unter Einsatz einer offenen Gripper-TBM der Firma Robbins mit einem Ausbruchdurchmesser von 9,73 m. Die Vortriebsarbeiten des CBT endeten mit dem letzten Durchschlag in der Oströhre bei der Baulosgrenze Vigana-Sigirino am 26.01.2016.



Legende Baulose

Zwischenangriff Sigirino
Hauptvortrieb Sigirino
Vigana
Vezia mit Tagbaustrecke
Erkundungsstollen (CPS)
Künftige Fortsetzung Süd
Vortriebsrichtung

Fig. 1-2: Schematische Übersicht des Gesamtbauwerks mit Bauloseinteilung und Vortriebsrichtung. (Topographischer Hintergrund: Atlas der Schweiz, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich).

1.2 Beschreibung der einzelnen Bauwerke und Baulose

Zu den Hauptbauwerken zählen Bauwerke, die direkt auf der Tunnelachse liegen, wie z.B. die Portale, die beiden Verzweigungsbauwerke und die Einspurtunnelröhren. Die Querschläge, Zugangs-, Erkundungs- und Logistikstollen und -kavernen zählen zu den Nebenbauwerken. Mit Ausnahme der Querschläge hatten die aufgezählten Nebenbauwerke nur eine vorübergehende Funktion während der Bauphase des CBT.

Die Kilometrierung der Tunnelachse ist in der Projektdokumentation in AlpTransit-Kilometer (AT km) angegeben und hilft, die lokale Tunnelmetrierung der einzelnen Bauwerksabschnitte im Gesamtprojekt zu definieren. In diesem Bericht wird statt der AlpTransit-Kilometrierung die SBB-Kilometrierung verwendet. Die 200er-Kilometrierung in der Oströhre und die 300er-Kilometrierung in der Weströhre erleichtern die Unterscheidung der Tunnelröhren. Mit einer Länge von 15,475 km erstreckt sich die Oströhre im CBT von km 227.485–242.960, während dem die etwas kürzere Weströhre mit einer Länge von 15,316 km zwischen den Portalen km 327.485–342.801 liegt.

Die Dokumentation auf Stufe Baustelle wurde innerhalb der Baulose vorzugsweise in Tunnelmeter (Tm) geführt. Eine Übersicht über die Einteilung der Baulose ist in Figur 1-3 und dem geologisch-bautechnischen Längenprofil in Tafel I dargestellt.

Bauherr war die AlpTransit Gotthard AG (ATG). Die Ingenieurgemeinschaft CBT (ITC) war für die Projektierung und Bauleitung des CBT zuständig. Partner der IG waren Pini Swiss Engineers SA, AFRY Schweiz AG und Amberg Engineering AG. Die Materialbewirtschaftung erfolgte durch das Ingenieurbüro Pagani & Lanfranchi SA. Das Geologiebüro Dr. Baumer SA wurde für den Bereich Geologie und die IFEC Ingeneria SA für den Bereich Umwelt beauftragt.

Der Rohbau des CBT wurde an folgende Arbeitsgemeinschaften vergeben:

- Consorzio Matro Sud mit Pizzarotti SA, Pizzarotti & C. S.p.A., Cossi Costruzioni S.p.A., Ennio Ferrari SA, LGV SA und Rodio Geotechnik AG (Baulos Vigana)
- Consorzio Monte Ceneri CSC, Frutiger SA und Rothpletz, Lienhard + Cie (Vorlos Sigirino)
- Consorzio Condotte-Cossi mit Società Italiana per Condotte d'Acqua SpA und Cossi SpA (Baulos Sigirino)
- CPV mit CSC SA und Pizzarotti SA (Baulos Vezia)

1.2.1 Hauptbauwerke

Nordportal Vigana

Das Bauwerk Nordportal Vigana umfasst den Portalbereich, das Anschlussbauwerk und die Unterquerung der Autobahn A2, die sich teilweise im Lockergestein befindet. Der Vortrieb fand im Lockergestein mittels Baggervortrieb im Schutze von subhorizontalen Jet-Grouting-Säulen und Rohrschirmen und im Festgestein im Sprengvortrieb statt (s. Kap. 11.2.2.1 und 11.3.1). Das Anschlussbauwerk Untertage besteht aus den Kavernen Ost und West und dem Verbindungstunnel Bretella. Dieser verbindet den CBT mit den bestehenden Bahnlinien nach Locarno und Bellinzona.

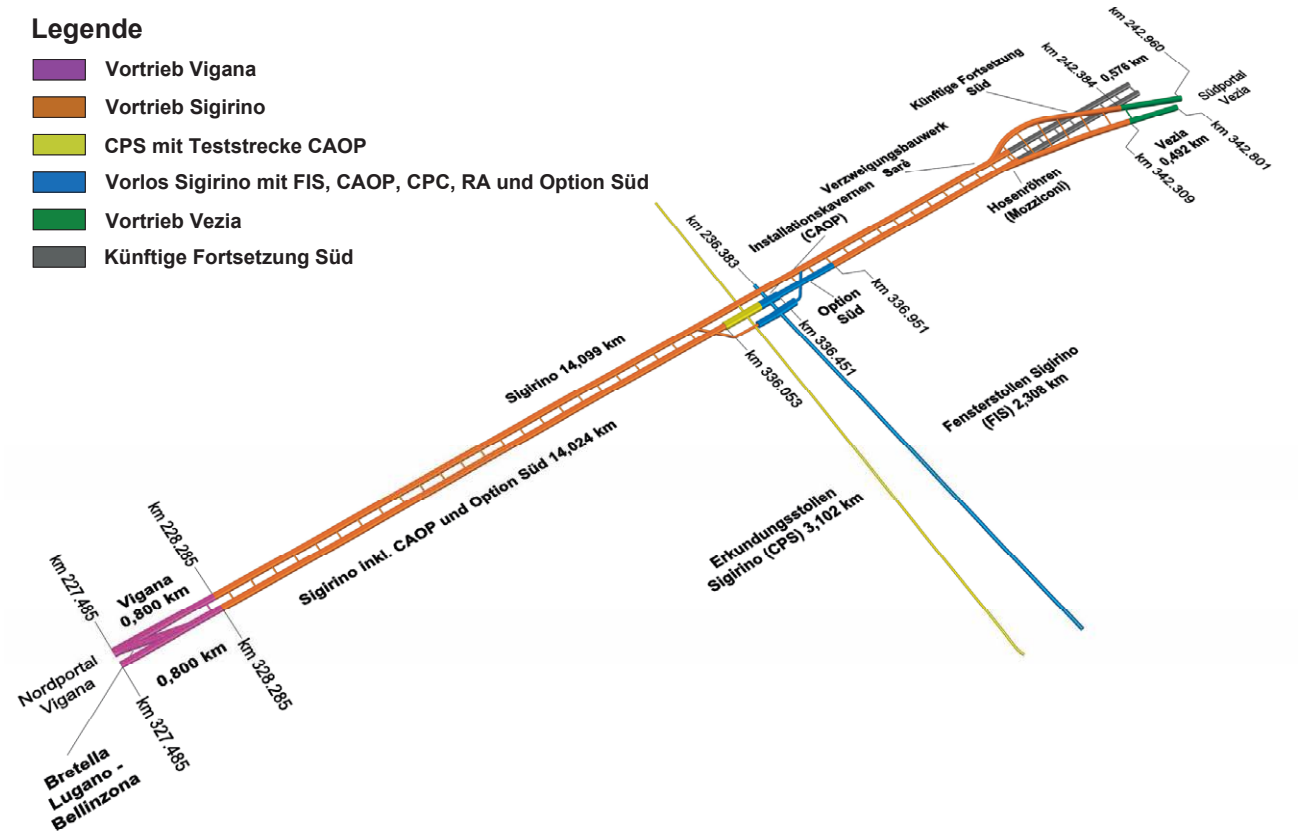


Fig. 1-3: Bauwerksübersicht des Ceneri-Basistunnels mit Nebenbauwerken, Erkundungs- und Zugangsstollen eingeteilt in die Baulose Vigana, Sigirino mit Vorlos und Vezia.

Gleichzeitig wird die Möglichkeit einer künftigen Verlängerung der AlpTransit-Strecke nach Norden durch die Magadinoebene mit Anschluss an den zukünftigen Tunnel Sementina–Gnosca offengelassen.

Hauptvortrieb CBT mit Zwischenangriff in Sigirino

Mit insgesamt mehr als 27,2 km Vortriebslänge (beide Tunnelröhren zusammengezählt) handelt es sich dabei um das grösste Baulos des CBT. Das Baulos beinhaltet in Richtung Norden die Strecke zwischen dem nördlichen Ende der Logistikkaverne CAOP und der Baulosgrenze Vigana (km 327.485–336.053), die gesamte Oströhre von km 228.285 bis km 242.384 und den Südvortrieb der Weströhre ab der Option Süd bei km 336.951 bis zur Baulosgrenze Vezia bei km 342.309. Dazwischen liegt das Vorlos des Zwischenangriffs Sigirino mit der CAOP und dem Teilstück Option Süd in der Weströhre mit Streckenlängen von 398 und 500 m.

Zum Südvortrieb gehören auch das 400 m lange Verzweigungsbauwerk Sarè inklusive zwei Anschlusstunneln, auch «Hosentunnel» genannt. Die Anschlusstunnel mit einer Länge von 150 m, die ohne Bahntechnikausrüstung ausgestattet wurden, sind eine Vorbereitung für eine künftige Streckenfortsetzung Richtung Süden. Die Ausführung des Hauptloses erfolgte durchwegs im Spreng- und Baggervortrieb.

Logistikkaverne CAOP und Option Süd

Die Logistikkaverne war ein provisorisches Bauwerk, welches zur Weströhre gehörte und Raum für die logistischen Baustelleneinrichtungen untertage bot, die für die Vortriebsarbeiten des Hauptvortriebs benötigt wurden, wie z.B. Werkstatt, Materialzwischenlager oder Umladestation der Förderbänder für die Schutterung.

Für die Betriebsphase wurde der Einspurtunnel in die Logistikkaverne eingebaut und der bestehende Zwischenraum mit Ausbruchmaterial, Kies und Sand hinterfüllt. Dieser Tunnel im Tunnel wird im Projekt mit «Haus im Haus» bezeichnet (Fig. 1-4).

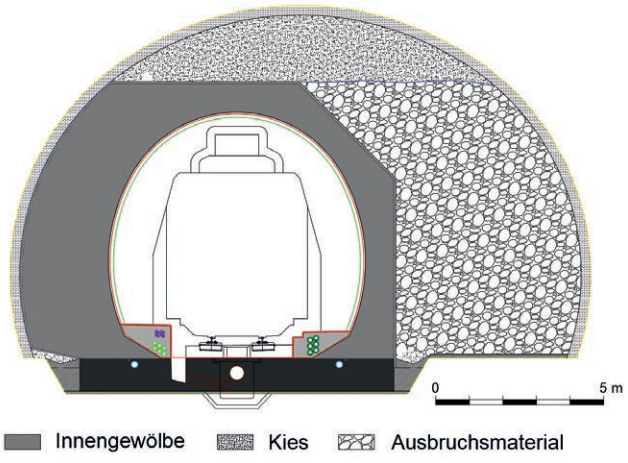


Fig. 1-4: Querprofil der CAOP mit «Haus im Haus»-Bauwerk und Hinterfüllung aus Ausbruchmaterial.

Die Option Süd mit einer effektiven Länge von 500 m entspricht dem Streckenabschnitt in der Weströhre ab CAOP gegen Süden und war eine terminsichernde Massnahme für das Baulos Sigirino, die bereits durch das Vorlos für den Zugangsstollen FIS ausgeführt wurde.

Südportal Vezia

Auf dem letzten Streckenabschnitt vor dem Südportal Vezia (329 m ü.M.) nähern sich die beiden Tunnelröhren an, um anschliessend in die bestehende SBB-Linie vor dem Tunnel in Massagno einzumünden. Dieser Bauabschnitt beinhaltetete zwei verschiedene Baulose: den Gegenvortrieb Vezia mit einer Länge von rund 338 m (Oströhre) im Festgestein mittels Sprengvortrieb und den 144 m langen Tagbautunnel mit Portalbauwerk, der zum grössten Teil im Lockergestein situiert ist.

1.2.2 Nebenbauwerke

Erkundungsstollen Sigirino

Das Portal des Erkundungsstollens Sigirino (CPS) liegt im Norden des Installationsplatzes Prati di Regada auf einer Kote von 396 m.ü.M. Der CPS wurde in den Jahren 1997–2001 gebaut. Er weist ein weist ein mittleres Längsgefälle von 4,6% auf und ist insgesamt 3102 m lang. Er verläuft senkrecht zu den Lithologien in der mittleren Ceneri-Zone im Bereich der künftigen West- und Oströhre und wurde ab der Tunnelachse der Oströhre um ca. 200 m über den Kreuzungsbereich hinaus in Richtung Osten weitergeführt (Fig. 1-3). Die Querschnittsfläche beträgt 25 m². Für das Kreuzen von Fahrzeugen wurden alle 200 m Nischen ausgebrochen. Während des Vortriebs des CBT wurde der CPS für die Versorgung der Vortriebe mit Wasser, Energie und Frischluft genutzt. Ausserdem diente der CPS als Rettungsstollen im Falle eines Ereignisses im Hauptzugangsstollen FIS. Der Erkundungsstollen wird nach Ende der Hauptbauarbeiten nicht mehr genutzt und an den beiden Enden verfüllt.

Fensterstollen Sigirino

Das Portal des Fensterstollens Sigirino (FIS) liegt auf einer Kote von 386 m ü.M. rund 400 m weiter südlich vom Portal des CPS entfernt. Der vor Beginn der Hauptvortriebsarbeiten erstellte 2318 m lange FIS verbindet den Installationsplatz mit der CAOP auf 275 m ü.M. Er weist ein mittleres Gefälle von 4,9% auf.

Während des Baus des CBT diente der FIS beim Vortrieb Baulos Sigirino als Zugangs- und Versorgungsstollen. Sein Querschnitt von 74 m² ermöglichte einen Baustellenverkehr in beiden Richtungen. Gleichzeitig bot er Platz für drei Förderbänder und gewährleistete so den Abtransport des Ausbruchmaterials und die Zufuhr von Gesteinskörnungen in die Betonproduktionsanlage. Zudem war er auch als Abluftstollen vorgesehen.

Der FIS wird nach Ende der Hauptbauarbeiten auf späten Wunsch der SBB als Zugangstollen zu den Einspurtunnel ausgebaut. Am Fusse des FIS entsteht ein Wendeplatz und ein Depot für die SBB. Das Portal FIS wird mit einem ca. 70 m langen Tagbautunnel verlängert, der unter der definitiven Ablagerung eingeschüttet wird.

Kaverne für die Betonanlage

In der Kaverne für die Betonanlage (CPC) war der Installationsplatz für die Einrichtung der Silolager für Gesteinskörnungen und der Betonanlage untergebracht. Die Gesteinskörnungen wurden über die Förderbandanlage durch den FIS transportiert. Von dort aus beförderten Fahrmischer den Beton zu den Baustellen im Untertage.

Ringanschluss

Der Ringanschluss (RA) war eine Kaverne in der Verbindungszone zwischen CPS und CPC, die zusammen mit beiden Bypässen einen Ringverkehr zwischen FIS, CAOP, CPS und den beiden Einspurtunnel ermöglichte. Er diente als Zwischenlager Untertage für Material beim Vortrieb Baulos Sigirino.

Technische Lüftungskavernen

Ursprünglich war im Projekt vorgesehen, die Ereignislüftung für die Haupttunnel mittels einer Lüfterstation am Portal FIS zu realisieren. Die Frischluft wäre dabei über den FIS und die beiden Lüftungskavernen in die Einspurtunnel eingeblasen worden (Lösung «zentrale Lüftung»).

Aus wirtschaftlichen Gründen wurde nach Baubeginn mittels einer Projektänderung auf eine Längslüftung mittels Strahlventilatoren in den Einspurtunnel umgestellt, wodurch die Lüftungskavernen ihre eigentliche Funktion verloren.

Bypässe

Die beiden Bypässe Nord und Süd erweiterten die Bauwerke für den Ringverkehr im Zwischenangriffsdispositiv und ermöglichten einen zusätzlichen Verkehrsweg zwischen

Tab. 1-1: *Allgemeine Projektdaten des Ceneri-Basistunnels. [1] Ende Option Süd. [2] Beginn Tagbaustrecke Vezia.*

Längen		
CBT inklusiv Querschläge und Stollen.		39,780 km
Oströhre		15,475 km
Weströhre		15,316 km
Baulos Tagbaustrecke Vezia	Tagbautunnel Ost	0,223 km
	Tagbautunnel West	0,188 km
Zwischenangriff Sigirino (Vorlos)	Fensterstollen	2,318 km
CAOP und Option Süd		0,898 km
Baulos Sigirino (Hauptbaulos)	Oströhre total	14,099 km
	Weströhre total	13,126 km
	Vortrieb Nord Ost	8.098 km
	Vortrieb Süd Ost	6,001 km
	Vortrieb Nord West	7,768 km
	Vortrieb Süd West	5,358 km
Baulos Vigana	Oströhre	0,766 km
	Weströhre	0,749 km
Baulos Vezia	Oströhre	0,339 km
	Weströhre	0,303 km
Schienenoberkante Nordportal Vigana		216,5 m ü.M.
Südportal Vezia		329 m ü.M.
Gebirgsüberlagerung		0–820 m
Felstemperaturen		13,8–24,0 °C

Vortriebsdaten	
Vortrieb CPS	01.02.1997–24.11.1999
Vortrieb FIS	07.09.2007–06.11.2008
Vortrieb CAOP[1)]	01.04.2008–15.11.2009
Vortrieb CBT[2)]	17.03.2008–26.01.2016
Durchmesser der Ausbruchsfläche CBT	8,76–9,96 m
Ausbruchsfläche CBT	62,02–86,72 m²
Durchmesser TBM	9,7 m
Ausbruchsfläche TBM	73,9 m²
Durchmesser der Ausbruchsfläche Kavernen	bis 24,88 m
Ausbruchsfläche Kavernen	bis 318,47 m²
Ausbruchsfläche Querschläge	20,4–27,6 m²
Länge der Querschläge	14,5–196,2 m
Mittlere Tagesleistung SPV 1–4	4,4–7,1 m/AT
Mittlere Tagesleistung SPV 5–10	1,9–3,5 m/AT
Mittlere Tagesleistung TBM	11,6 m/AT
Höchste Tagesleistung SPV	12,3 m/AT
Höchste Tagesleistung TBM	30,6 m/AT

Ausbruchmaterial/Sicherungsmittel	
Gesamtmenge des Materials	7,9 Mio. t
Materialqualität A	1,0 Mio. t
Materialqualität B	6,8 Mio. t
Beton Aussenschale und Innenschale	1,1 Mio. t
Felsanker	1123 km
Stahlbögen	4200 t
Bewehrungsnetze	1 Mio. t
Bewehrung	20 000 t

Ost- und Weströhre. Während der Bypass Süd zum Vorlos Sigirino (Option Süd) gehörte, wurde der Bypass Nord im Baulos Sigirino ausgebrochen.

Querschläge

Die 48 Querschläge verbinden die beiden Einspurtunnel und sind ein wichtiges Element für die Gewährleistung der Sicherheit im Ereignisfall.

Abgesehen von den beiden grossen Querschlägen QS 26 und QS 40 (im Verzweigungsbauwerk Sarè) beträgt die Ausbruchsfläche der Querschläge 23 m². In Abhängigkeit vom Abstand der beiden Tunnelachsen variiert die Länge der Querschläge zwischen 15 und 196 m. Die langen Querschläge befinden sich südlich des Verzweigungsbauwerks Sarè im Bereich des Überführungsbauwerks, das für die Fortsetzung Süd gebaut wurde. Die Abstände der Querschläge betragen im erwähnten Streckenabschnitt zwischen 267 und 345 m.

Während der Beschleunigungsmassnahme des Nordvortriebs wurde für die Belüftung parallel zum QS 6 ein zusätzlicher technischer Querstollen gebaut, der von der Sohle der Weströhre steigend in die Kalotte der Oströhre mündete (Kap. 11.1.2). Dieser Querstollen wurde nach Beendigung der Vortriebsarbeiten wieder verfüllt.

Technische Nischen

Die technischen Nischen, im Projekt auch «Muffenkammern» (MuKa) genannt, sind für die Verlegung von Hochspannungskabeln der SBB vorgesehen. Zwischen den MuKas wurden je drei Kabelschutzrohre (ø 150 mm) im Aussenbankett verlegt. Sie wurden nur in der Oströhre im Arbeitsbereich L3 ab einer Distanz von mindestens 50 m hinter dem Vortrieb ausgebrochen. Insgesamt enthält die Oströhre 10 MuKas in einem Abstand zwischen 1140 und 2180 m.

1.3 Geologische Baubegleitung, Dokumentation und Berichterstattung

Die Aufgabe des Baustellengeologen des CBT bestand darin, die örtliche Bauleitung, den Projektverfasser und den Bauherrn in allen geologisch-geotechnischen Fragen zu unterstützen, indem er die angetroffene Geologie dokumentierte und interpretierte. Die Grundlagen für seine Arbeit entsprachen den Normen und Richtlinien der SIA, insbesondere der Norm 198 und der Empfehlung 199, den speziellen Regelungen von AlpTransit, den Prüfplänen und den Vorgaben für die Darstellung der geologischen und geotechnischen Verhältnisse. Eine weitere bedeutende Aufgabe bestand darin, den Befund mit der Prognose zu vergleichen und diese nötigenfalls an die Gebirgsverhältnisse anzupassen und damit laufend zu aktualisieren. Der Baustellengeologe war ausserdem zuständig für das Verfassen der geologischen Schlussdokumentation, die ein Bestandteil der Bauwerksakten ist.

Zu seinem Verantwortungsbereich zählten Probeentnahmen, das Sammeln von Belegstücken, die für geomechanische Tests oder petrographische Untersuchungen verwendet wurden, sowie die Begleitung und Interpretation von Vorauserkundungen mit Schlag- oder nach Bedarf mit Kernbohrungen. Alle gesammelten geologischen Informationen dienen der Beweissicherung des Tunnelbauwerks.

Das Geologenteam war in der örtlichen Bauleitung (öBL) eingegliedert und zählte bei Vollbetrieb im Jahre 2010 sieben Geologen für insgesamt neun Vortriebe. Zum Geologenteam gehörten Dr. Stefano Morandi (September 2006 bis April 2017), Dr. Pierre-François Erard (Dezember 2007 bis April 2018), Dipl. Geol. Jean-Pierre Hürzeler (Oktober 2010 bis Dezember 2018), MSc. Geol. Reto De Paoli (April 2009 bis Juli 2015), Dr. Andrea Galli (Juli 2010 bis Januar 2016), MSc. Geol. Laurent Thum (Oktober 2010 bis Juni 2015), MSc. Ing. Geol. Auro Lunghi (September 2009 bis März 2012), Dipl. Geol. François Ghirlanda (Dezember 2007 bis September 2010) und MSc. Geol. Laurie Cortesi (Juli 2015 bis Januar 2016).

Dr. Valeria Vezzosi (Juni 2016 bis Februar 2018) und Dr. Michael Bergamini (Juni 2016 bis Dezember 2018) unterstützten das Geologenteam beim Reinzeichnen der Tunnelbandaufnahmen und bei der Verfassung der geologischen Schlussdokumentation. Für die Qualitätssicherung der Gesteinskörnung für die Materialbewirtschaftung waren Folco Giacomini (2008 bis Januar 2010), Laurie Cortesi (Januar 2010 bis Juni 2015), Tiziana Minotti (April 2012 bis September 2012) und Reto De Paoli (August 2015–2017) tätig.

Der Projektgeologe (PG) Dr. Diego Pozzorini (Dr. Baumer SA) war Mitglied der Ingenieurgemeinschaft (IG) und leitender Projektverfasser für die Geologie, Geotechnik und Hydrogeologie. Zu seinem Kompetenzbereich auf Stufe Projekt gehörte neben dem Erstellen der Prognose die Beratung und Unterstützung des Geologenteams während der Ausführungsphase des CBT, insbesondere für den aktualisierten Vergleich zwischen Prognose und Befund, das Erstellen des Vorauserkundungskonzepts, die Qualitätskontrolle und der Know-how-Transfer innerhalb der IG.

Für die Vorauserkundungen mit Hilfe von Kernbohrungen, felsmechanischen und petrographischen Untersuchungen sowie Wasserprobenanalysen wurden spezialisierte Subunternehmer beauftragt. Die Kernbohrungen im Tunnel realisierte der Subunternehmer Stump-BTE AG (früher Stump-Foratec SA).

Die felsmechanischen Laborversuche an Gesteinsproben aus dem Tunnel sowie ein Teil der Dünnschliffuntersuchungen wurden vom Prüflabor IMM (Istituto Meccanica dei Materiali SA) in Grancia durchgeführt.

Das Prüflabor TransGeo AG untersuchte die Gesteinsproben, die von den Geologen der Materialbewirtschaftung beprobt wurden. Im Rahmen der Materialbewirtschaftung führte die TransGeo AG ebenfalls Dünnschliffuntersuchungen durch.

Das Analytiklabor Arcadis Schweiz AG (früher BMG Engineering AG) in Schlieren war zuständig für die Laboruntersuchungen zur Bestimmung des Wasserchemismus der beprobten Quellen.

Hinsichtlich der geologischen Schlussdokumentation arbeitete der PG eng mit dem Baustellengeologen zusammen, um den Teil «Vergleich zwischen Prognose und Befund» zu erarbeiten. Im Übrigen diente der PG als Schnittstelle für den Fluss geologischer Informationen in Sitzungen mit höheren Instanzen. Diese waren die Oberbauleitung (OBL),

die Sachverständigen-Gruppe für die Sicherheitsorientierte Prüfung (SIOP), der Werner Dallapiazza, Dr. Max John, Dr. Federico Matousek und Dr. Markus Schwalt angehörten, die Vortriebsgruppe Ceneri und das technische Begleitteam (TBT), dem im Auftrag des Bundesamtes für Verkehr BAV eine fachspezifische Aufsichtsfunktion übergeben wurde.

Von zentraler Bedeutung für eine erfolgreiche Analyse und Darstellung der aufgenommenen Geodaten des CBT war die Entscheidung, ergänzend zum täglichen Baujournal SISO eine separate digitale Datenbank im GIS-Format (Geographic Information System) zu betreiben. Mit fortschreitendem Vortrieb liess sich das enorme Potenzial des GIS erkennen, indem alle beliebigen geologischen Informationen des Tunnels kontinuierlich und aktualisiert in einem Horizontalplan präsentiert werden konnten. Die im GIS erstellten Horizontalpläne verhalfen den Befund fortlaufend zu interpretieren und die Prognose zu prüfen. Im Endeffekt ermöglichte diese Methode der öBL, beim Antreffen veränderter Geologie schnell und effizient zu reagieren, um optimale bautechnische Massnahmen zu ergreifen, wie z.B. die Verstärkung der Ausbruchsicherung oder das Anordnen zusätzlicher Vorauserkundungsmassnahmen. Die Geodaten liessen sich nicht zuletzt auch für die erfolgreiche Abwehr von Nachforderungen des Unternehmers nutzen, indem der geologische Sachverhalt durch lückenlose statistische Analysen dargelegt werden konnte. Während des Sprengvortriebbauloses Sigirino konnte die öBL auf die Geodatenanalysen zugreifen, um den Unternehmer zu unterstützen, indem gemeinsam Methoden ausgearbeitet wurden, die mit einer adäquaten Sprengtechnik insbesondere in ungünstigeren Felsverhältnissen die Grösse geologischer Überprofile verminderte. Geodaten wie z.B. die Orientierung der Schieferung, Strukturen oder geologische Überprofile fanden nebenbei auch Gebrauch in der Erstellung von Tunnelbandaufzeichnungen im Massstab 1:200, welche direkt in digitalem Format erstellt wurden.

Bedingt durch den grossen Umfang der geologischen Schlussdokumentation wurde diese in acht Teilberichte unterteilt und gestaffelt an ATG geliefert. Der geologische, geotechnische und hydrogeologische Schlussbericht des gesamten Tunnels umfasst eine Synthese aller Teilberichte. ATG übergab je ein Exemplar aller Berichte an die Landesgeologie (swisstopo), welche sie archiviert. Die nebenstehende Tabelle veranschaulicht die Gliederung der geologischen Schlussdokumentation des CBT.

Des Weiteren übergab die öBL an swisstopo die Kernbohrungsproben, die Gesteinsproben- und die Dünnschliffsammlung aus dem Vortrieb sowie eine ausgewählte Anzahl Kernbohrungsproben aus der Erkundungskampagne des Projektes.

Tab. 1-2: *Übersicht aller internen geologischen Schlussberichte des Abschnitts Ceneri, die bei swisstopo archiviert sind.*

Geologische Teilberichte	
Los 821	Rapporto geologico conclusivo Trincea Vezia
Los 851	Rapporto geologico conclusivo FIS
	Rapporto geologico conclusivo CAOP
Los 852	Rapporto geologico conclusivo parte 1 Avanzamento Gneiss Giumello e Linea Val-Colla
	Rapporto geologico conclusivo parte 2 Avanzamento Zona Val-Colla
	Rapporto geologico conclusivo parte 3 Avanzamento Zona Ceneri Nord e Intermedia
Los 853	Rapporto geologico conclusivo interventi zona portale nord (Vigana)
Los 854	Rapporto geologico conclusivo controavanzamento Vezia
Geologischer Schlussbericht Abschnitt Ceneri	
Rapporto geologico, geotecnico e idrogeologico – Documentazione finale	

2. Übersicht über die Geologie im Projektbereich

2.1 Regionale Geologie und Tektonik

Der CBT durchquert das kristalline prämesozoische Grundgebirge der Südalpen. Die Südalpen sind im Norden von der periadriatischen Linie (Canavese-Linie im Westen, Insubrische Linie im Zentrum und Tonale-Linie im Osten) begrenzt und sind im Süden mit permo-mesozoischen Sedimenten der Südalpen überdeckt (Schmid et al. 1987). Dieses Grundgebirge unterteilt sich in drei tektonische Einheiten (Fig. 2-1). Die Ivrea-Verbano-Zone (IVZ) erstreckt sich bogenförmig von Ivrea im Piemont bis nach Locarno, wo sie unter dem Lago Maggiore und der Magadinoebene auskeilt und südlich durch die Cossato-Mergozzo-Brissago-Linie begrenzt wird (Boriani et al. 1990). Die Gesteine der IVZ interferieren durch ihre geographische Lage nicht mit dem CBT. Die IVZ beinhaltet Gesteine, die aus der unteren bis mittleren kontinentalen Kruste stammen (Schmid 1993, Rutter et al. 2003). Diese Gesteine grenzen an die Cossato-Mergozzo-Brissago-Linie (CMB), sind metamorph überprägt und enthalten mafische Minerale sowie Metasedimente der Kinzingit-Formation (Bea & Montero 1999).

Die weiter südlich liegende Strona-Ceneri-Zone (StrCZ) umfasst Gesteine aus der mittleren kontinentalen Kruste (Schmid 1993, Fountain 1976, Boriani et al. 1990, Schumacher 1997) und besteht aus Para-, Orthogneis sowie untergeordnet Amphibolit. Strukturgeologisch ist die StrCZ durch eine steilere Position der Hauptstrukturen (Schieferung, lithologische Kontakte, axiale Faltenebenen) gekennzeichnet. Der tektonische Aufbau wurde innerhalb der StrCZ weitgehend von präalpinen Strukturen, wie isoklinale Falten oder Schlingen, geprägt, die im nördlichen bis mittleren Abschnitt des CBT auftreten. In der Literatur zur StrCZ werden unterschiedliche Begriffe verwendet. So bezeichnet Reinhard (Reinhard 1953) diese tektonische Einheit als Ceneri-Zone (CZ) während Boriani et al. (1977) und Schmid (1993) von der Serie dei Laghi respektive von der Zona di Strona-Ceneri s.l. sprechen und diese weiter in die Zona di Strona-Ceneri s.t.r (Granitoide und paragene Serie) und die Scisti dei Laghi (metapelitische Serie) unterteilen, die in der Mitte durch Amphibolite getrennt sind. Im Projekt des Ceneri-Basistunnels wurde ausschliesslich der Begriff Ceneri-Zone verwendet.

Die Legende der neuinterpretierten geologisch-tektonischen Karte der Südalpen (Fig. 2-1) richtet sich am Befund im Ceneri-Basistunnel aus und deshalb werden die Scisti dei Laghi in Anbetracht der Projektnomenklatur des CBT mit dem Giumello-Gneis gleichgestellt.

Weiter im Süden in der Val-Colla-Zone (VCZ) lässt sich im Vergleich zur CZ ein ganz anderer strukturgeologischer Trend beobachten. Die VCZ unterscheidet sich von den nördlichen Einheiten des kristallinen Grundgebirges der CZ nicht nur petrographisch, indem sie einen tieferen Metamorphosegrad aufweist als die CZ, sondern auch strukturgeologisch. Die LVZ setzt sich aus einer Abfolge von Para- und Orthogneisen zusammen, mit denen oft basische bis intermediäre Gesteine (Amphibol führender Schiefer) assoziiert sind. Ab der Tesserete-Grona-Linie (GTL) ändert sich die Richtung der Hauptschieferung, die zwischen Val-Colla-Linie (LVC) und GTL mit mittlerem Einfallbetrag gegen Südwesten einfällt, so dass der südliche Abschnitt des CBT durch eine subhorizontale und wellige Hauptschieferung geprägt ist.

2.2 Tektonometamorphe Entwicklung der Südalpen in der Region Tessin

Die tektonometamorphe Entwicklung des kristallinen Grundgebirges der Südalpen ist komplex und gibt in der Literatur immer Anlass zu Diskussionen. Die folgenden Abschnitte beinhalten, basierend auf neueren Studien, eine Zusammenfassung der bedeutendsten Verformungs- und Metamorphoseprozesse, die das Gebirge im Tessin geprägt haben. Dabei wird zwischen präalpiner und alpiner tektonometamorpher Entwicklung unterschieden.

2.2.1 Präalpine Entwicklung

Aufgrund der polymetamorphen Entwicklungsgeschichte des südalpinen Grundgebirges sind Daten über die Ausgangsgesteine (Protolithe) in diesem Gebiet spärlich und oftmals lückenhaft. Sie beziehen sich auf die Zeitspanne vom Präkambrium bis zum frühen Paläozoikum. Das Ausgangsgestein weitläufiger Gebiete der CZ bestand im Präkambrium aus mächtigen terrigenen, z.T. mit Karbonaten oder Vulkaniten durchmischten Ablagerungen. Das Grundgebirge der CZ setzt sich aus Peliten, Rauwacken, quarzitischen und karbonatischen Gesteinen zusammen, die mit Vulkaniten verschiedener Herkunft wechsellagernd verzahnt sind (von Raumer & Neubauer 1994).

Ab dem späten Proterozoikum folgte nach Abschluss einer Kompressionsphase eine Ausdünnung der Kontinentalkruste durch Underplating, die mit der Öffnung einer ausgedehnten Riftingzone und ozeanischer Krustenbildung einherging (von Raumer & Neubauer 1993).

Durch die Kompressionsphase im frühen Paläozoikum, die mit der kaledonischen Orogenese (Kambrium bis Ordovizium, 530–460 Ma) gleichgestellt ist, bildete sich ein Akkretionskeil mit Subduktion der kontinentalen Kruste (Schmid 1993) und erreichte hohe druck- (Gebauer 1993) und tempe-

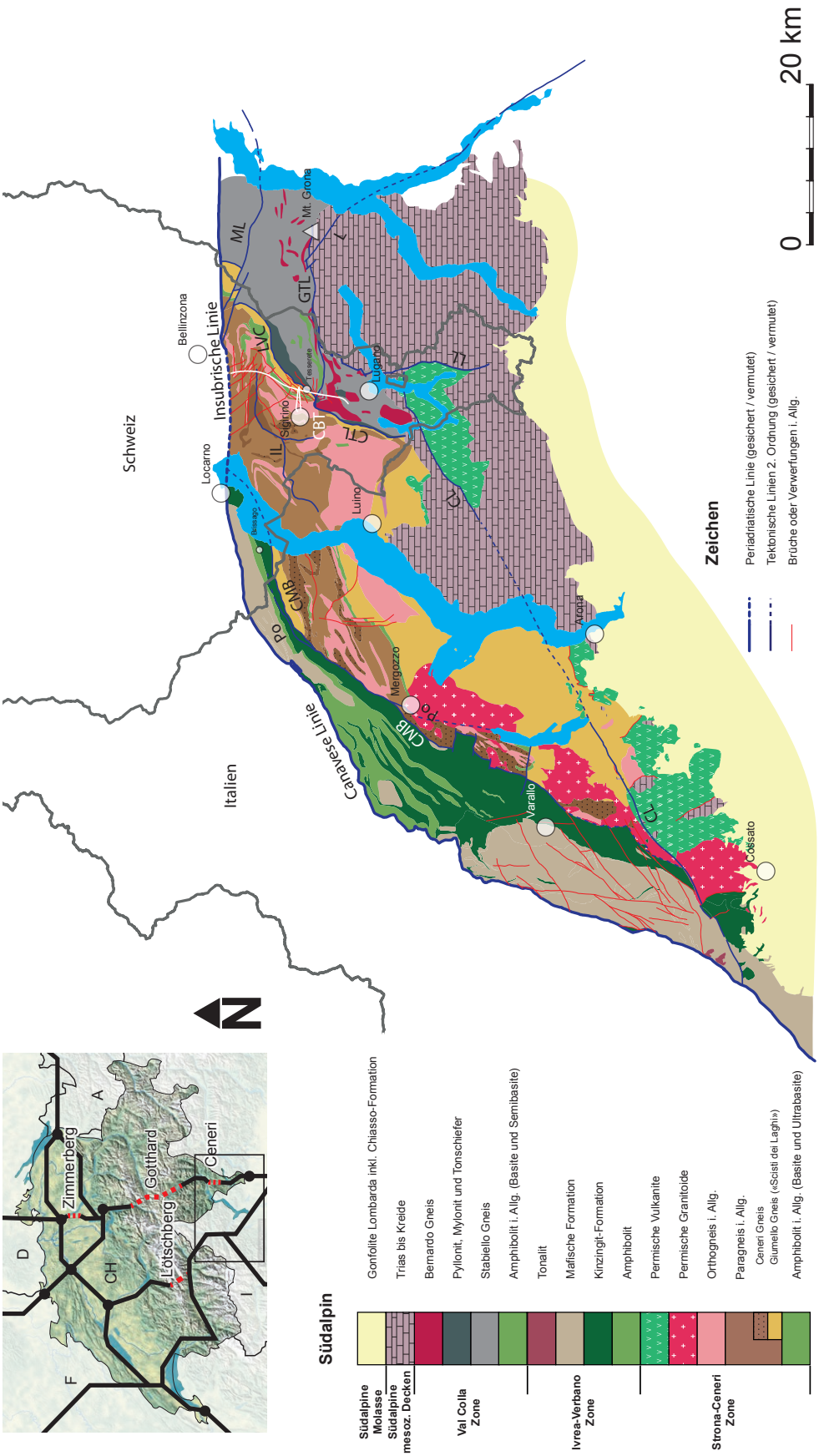


Fig. 2-1: Geologisch-tektonische Karte der Südalpen in der Region Tessin–Piemont interpretiert nach Piana et al. (2017), Quick et al. (2003), Schmid et al. (1987), Reinhard (1953), Schumacher (1997), Zurbriggen et al. (1997), Boriani & Burlini (1974), Boriani et al. (1990), Boriani et al. (1995), Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000, Geologische Karte der Schweiz 1:500 000, Tektonische Karte der Schweiz 1:500 000 und dem Befund CBT. Legende: CBT = Ceneri-Basistunnel, CL = Cremosina-Linie, CMB = Cossato-Mergozzo-Brissago-Linie, CTL = Caslano-Taverne-Linie, GTL = Tesserete-Grona-Linie, IL = Indemini-Überschiebung, LVC = Val-Colla-Linie, L = Lecco-Linie, LL = Lugano-Linie, ML = Musso-Linie, Po = Pogallo-Linie.

raturbetonte Metamorphosegrade. Zurbriggen benannte diese orogene Phase cenerische Gebirgsbildung. (Zurbriggen 2015, 2017). Der nördliche Rand des Kontinents Gondwana war von einem mindestens 2500 km langen vulkanischen Gebirgsgürtel geprägt. Von den duktilen Strukturen, die in dieser Phase entstanden, sind nur wenige lokal erhalten geblieben, wie z.B. die Schieferung oder Reliktfalten im Giumello-Gneis. Dieser orogene Zyklus endete im Ordovizium (480–450 Ma) mit der Intrusion von Graniten, von denen im Projektbereich der Ceneri- und der Bernardo-Orthogneis zeugen (Pinarelli et al. 2008, Boriani et al. 1995, Romer & Franz 1998). Anschliessend entstand im Silur und Devon (440–360 Ma) noch während der Kompressionsphase im äusseren Bereich des Akkretionskeils (Neubauer & Frisch 1993) ein aktiver Kontinentalrand, auf welchem sich gleichzeitig terrigene und marine (Karbonate) Sedimente ablagerten, die von alkalischen Vulkaniten durchsetzt waren (Vai et al. 1984).

Im frühen Devon (410 Ma) begann die eigentliche herzynische Geschichte der Südalpen. Ab dem frühen Karbon (360 Ma) wurden alle Einheiten der Südalpen an einer Kollisionsorogenese beteiligt, die tektonisch zu einer Krustenverdickung und polyphaser regionaler Metamorphose führte. Die untersuchten lithologischen Einheiten wurden bis in grossen Tiefen subduziert, so dass die Gesteine der CZ eine Metamorphose mittleren Grades (Amphibolitfazies, T = 650 °C) durchliefen und in der IVZ granulitfazielle Bedingungen erreichten. Die CZ wurde in dieser Zeit von einer Verformung geprägt, auf die zwei Faltenbildungen im duktilen Bereich hindeuten (Oppizzi 1995). Dabei entstanden in einem ersten Stadium isoklinale Falten und in einem späteren Stadium grossräumigere Falten, welche heute verkippt als sogenannte «Schlingen» vorliegen. Durch die rasche Hebung des herzynischen Gebirges und dessen endgültige Platznahme (Wolff et al. 2012, Handy et al. 1999) entstanden durch Erosions- und Transportprozesse (Siegesmund et al. 2008) klastische Ablagerungen, die diskordant auf dem Krustensockel liegen (herzynische Diskordanz). Die IVZ und CZ befanden sich zu dieser Zeit in der unteren Kruste.

Nach der variszischen Orogenese wurde die gesamte Region durch ein neues umfangreiches extensives Ereignis bewegt, das zum Rifting und der Öffnung der Tethys im Mesozoikum führte. Während sich diese Extensionsphase im Perm abschwächte, wurde die Asthenosphäre gehoben, so dass sich durch die geothermische Anomalie eine Anatexis im kristallinen Sockel auslöste, die einen bimodalen, sauer bis basischen Magmatismus erzeugte. Diese thermische Anomalie erfasste die gesamte Region der Südalpen, indem die extensive Verformung in den vulkanosedimentären Becken, die während der Öffnung der Tethys entstanden, spröde und duktile Strukturen formte. Gleichzeitig entstanden in den Südalpen weitverbreitete magmatische Intrusionen, wodurch sich im unteren Bereich der IVZ grosse Gabbrokörper formten und in den restlichen Bereichen dioritische und gabbroide Gänge als Vorläufer des Granitbatholits (Graniti dei Laghi) intrudierten (Oppizzi 1995). Weiter südöstlich sind permische Vulkanite, insbesondere die Vulcaniti di Lugano mit rhyolitischem Chemismus, anzutreffen.

Die Extensionsphase war gekennzeichnet durch die Entstehung von extensiven Strukturen und duktilen Scherzonen, die von hohen Temperaturen zeugen und in Richtung NE–SW verlaufen, wie z.B. die grünschieferfaziell entstandene Mylonitzone der LVC oder die Pogallo-Linie (Hodges & Fountain 1984). Dadurch wurde das ganze südalpine Gebirge kontinuierlich zerklüftet und die Kruste weiter ausgedünnt. Das führte zu den listrischen Brüchen mit einer Nord-Süd Richtung beim Lago Maggiore und beim Lago di Lugano (Mylonite und Kataklasite), welche die CZ und Val-Colla-Zone (VCZ) markant beeinflussten (Schumacher 1997). Gleichzeitig entwickelten sich tangential dazu Strukturen mit Ost-West-Richtung, an denen transversale Bewegungen zu erkennen sind (Monte-Grona-Linie). Handy (1987) und Zingg et al. (1990) nehmen an, dass die Entstehung dieser tektonischen Linien durch Öffnung eines Halbgrabens zurückzuführen ist, welche wegen der listrischen Brüche eine Schwächung der Kruste während der späten Trias und des frühen Juras hervorrief.

Dieses Ereignis war massgebend für die Entstehung der IVZ und CZ. Die maximale Ausdehnung erreichte die Südalpen zwischen Jura und früher Kreide (180–120 Ma) mit der ozeanischen Krustenbildung in der Tethys und dem passivem Kontinentalrand, zu einem Zeitpunkt, während dem die tektonische Entwicklung weniger aktiv war.

2.2.2 Alpine Entwicklung

Ab der frühen Kreide beginnt eine neue Kompressionsphase, die zur heutigen tektonischen Stellung der Alpen führte, indem die adriatische Platte (Teil des afrikanischen Kontinentes) mit der europäischen konvergierte.

Während der alpinen Orogenese erreichte die Verformung der Südalpen in der Region der adriatischen Platte ein geringeres Mass als in den externen Alpen nördlich der Insubrischen Linie (europäische Platte- und Akkretionskeil). Das hatte zur Folge, dass präalpine Strukturen in den Südalpen erhalten blieben. Der bedeutendste südalpine geodynamische Prozess umfasste im Zeitraum zwischen spätem Oligozän bis frühes Miozän durch dextrale Blattverschiebung ein transpressives System zwischen der Insubrischen Linie und der Tesserete-Grona-Linie, welches bis ins Quartär aktiv war. Die Tesserete-Grona-Linie ist eine spröde Störungszone alpinen Alters, welche zum dextralen transpressiven System der Insubrischen Linie gehört. Sie schneidet die Mylonite der Val-Colla-Linie ab. Diese Störung überprägte die früher entstandene Monte-Grona-Linie, welche zu den mesozoischen Ausdehnungsbrüchen gehört und möglicherweise die nördliche Fortsetzung der Lugano-Linie darstellt (Bertotti 1991).

Während der alpinen Gebirgsbildung hoben sich die tiefe und die intermediäre Kruste der IVZ und CZ (uplift) allmählich und kippten dabei die untersten Einheiten der Südalpen in eine vertikale Stellung (Hurford 1986, Zingg et al. 1990), während sich die Einheiten der Zentralalpen südgerichtet rücküberschoben.

Die alpine tektonische Entwicklung der Südalpen erfolgte in drei Phasen (Schumacher 1997). In der orobischen Phase, die von der späten Kreide bis ins Paläozän dauerte (95–55 Ma), bildeten sich die ersten Überschiebungs- und Rücküberschiebungsstrukturen in den Südalpen. Währenddessen begannen sich die IVZ und CZ zu exhumieren und vertikalisieren.

Tab. 2-1: *Übersicht über die Verformungs- und Metamorphoseereignisse während der Entwicklung des südalpinen Grundgebirges im Tessin.*

Orogenese	Ereignis	Alter	Anmerkungen
Präalpin	Sedimentation und Intrusion des Protoliths	Präkambrium <590 Ma	Reliktische Sedimentationsstrukturen lokal im Ceneri-Gneis und ursprüngliches Layering in den Metabasiten erkennbar (Giobbi et al. 1982), nach Zirkonalter (Oppizzi 1995) präordovizisches Alter gesichert.
	Kaledonische Orogenese	Oberes Kambrium bis Ordovizium, 530–460 Ma	Möglicher frühzeitliche Subduktion und Akkretion von Tiefseesedimenten (Giumello-Gneis) mit aluminiumbetontem Vulkanismus (Alaska-Typ) in der Ceneride-Orogenese 490–440 Ma (Zurbriggen 2017). Druckbetonte eklogitfazielle Relikte in Metapeliten und Metabasiten vorhanden.
	Ordovizer Magmatismus	Ordovizium, 480–450 Ma	Intrusion und Platznahme von granitoiden Schmelzen, die dem Ceneri-Orthogneis und Bernardo-Orthogneis entsprechen.
	Herzynische Orogenese	Mittleres Paläozoikum, spätes Devon bis frühes Karbon, 380–340 Ma	Bildung der Hauptschieferung und mehrphasiges Layering, isoklinale Faltenbildung p = 6,5–8 kbar, T = 650 °C.
	Bildung von regionalen Schlingenfalten in den nördlichen Gebieten und isoklinalen Falten in den südlichen Gebieten.	Mittleres bis spätes Paläozoikum, 350 Ma	Bildung von diskreten Strukturen und postkinematischen Paragenesen bei hoher Temperatur, sowie Faltenbildung simultan zur statischen Rekristallisation gebunden an die regionale Metamorphose, langsame Abkühlung der CZ (0,8 °C/Ma).
	Permotriasische Dehnungsphase und Ausdünnung der Kruste, Entstehung der Mylonite in der Pogallo- und Val-Colla-Linie.	Perm bis späte Trias, 280–230 Ma	Retrograde Metamorphose anschliessend an die statischen Rekristallisation bei grünschiefer-faziellen Bedingungen p <4 kbar, T = 400–450 C, Entstehung einer mylonitischen Foliation und Scherbänderung (S-C-Typ).
	Rifting	Späte Trias bis früher Jura, 230–180 Ma	Bildung von listrischen Ausdehnungsbrüchen in der gesamten Kruste, Entstehung der Lago-Maggiore-, Lugano- und Monte-Grona-Linien.
	Öffnung der Tethys	Jura bis frühe Kreide, 180–120 Ma	Entstehung eines passiven Kontinentalrandes, Ablagerung von pelitischen Sedimenten.
Alpin	Orobische Phase (ozeanische Subduktion)	Späte Kreide bis Paläozän, 95–55 Ma	Entstehung der ersten Überschiebungs- und Rücküberschiebungsstrukturen in den Südalpen. Beginn der Exhumation und Vertikalstellung der IVZ und CZ.
	Insubrische Phase (kontinentale Kollision)	Oligozän bis frühes Miozän, 35–18 Ma	Dextrale Transpression entlang der Insubrischen Linie und Bildung der Ausdehnungstektonik (Musso-Linie). Hebung der Zentralalpen und Ausrichten des IVZ-CZ-Komplexes in die heutige Stellung.
	Lombardische Phase	Miozän bis heute	Fortsetzen der transpressiven Verformung entlang der Insubrischen Linie und Reaktivierung von alten Überschiebungsflächen.

Die Insubrische Phase (Oligozän bis frühes Miozän, 35–18 Ma) entspricht der Hauptphase der südalpinen Entwicklung. Im Gebiet zwischen der Insubrischen Linie und Musso-Linie entstanden durch dextrale Blattverschiebung sigmoidale Ausdehnungszonen, sogenannte Zerrgraben (pull-apart-Struktur), verbunden mit Überschiebungsflächen in kompressiven Zonen. Ungefähr gleichzeitig endete die Hebung der Zentralalpen und der IVZ-CZ-Komplex verkeilte sich gegen Osten mit den Einheiten der Val Colla sowie der permo-mesozoischen Bedeckung (orobische Einheiten).

Während der Lombardischen Phase (mittleres bis spätes Miozän 18–8? Ma) setzte sich die dextral orientierte transpressive Verformung entlang der Insubrischen Linie fort. Alte Überschiebungsflächen wurden reaktiviert und an der Stirn der Südalpen gebogen.

Die oben beschriebenen drei alpinen Entwicklungsphasen wurden in der gesamten südalpinen Region unterschiedlich stark geprägt. Im verdickten Krustenkeil westlich des Lago Maggiore, der von transpressiver Verformung in Ost-West-Richtung geprägt ist, sind Rücküberschiebungs- und Rückfaltungsstrukturen zu erkennen.

In der zentralen Region zwischen dem Lago Maggiore und dem Lago di Como, in welcher sich die Linienführung des CBT befindet, führte die Abfolge mehrerer Deformationsphasen während der Gebirgsbildung zu komplexen Strukturen. Das tektonische System mit Streichrichtung NE–SW, das sich durch die Rücküberschiebung der Südalpen spröde verformte wurde in Richtung Insubrische Linie zunehmend von West-Ost orientierten transpressiven Strukturen überprägt.

Östlich des Lago di Como erscheint eine Bedeckung aus permomesozoischer Sedimenten. Diese Prärift-Sedimente unterschiedlichen Alters, wie z.B. die Sedimente des Monte-Generoso-Beckens, sind mit diskontinuierlichen präalpinen Strukturen assoziiert.

2.3 Geologische und geotechnische Kenntnisse vor Baubeginn

2.3.1 Vorstudien und Erkundungen im Projekt

Das Projektgebiet ist durch die Blätter des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25000 abgedeckt (von Norden nach Süden sind es die Blätter Bellinzona, Tesserete und Lugano). Weitere verfügbare geologische Unterlagen sind diverse ältere Dissertationen sowie wissenschaftliche Publikationen.

Bereits während der Aufarbeitung vorhandener Grundlagendokumente im Vorfeld der Vorstudien erkannte der Projektverfasser die lithologische und strukturelle Komplexität und Heterogenität des Monte-Ceneri-Gebirges. Aufgrund dieser Erkenntnis wurden im Laufe der verschiedenen Projektphasen zwischen 1991 und 2004 die geologischen, geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse mit ergänzenden geologischen Kartierungskampagnen, Bohrkampagnen, dem Erkundungsstollen Sigirino sowie mit geophysikalischen Untersuchungen (Seismik, Bohrlochgeophysik) und petrographischen und felsmechanischen Laborversuchen erkundet.

Ergänzende Kartierungen

Ergänzt wurde das vorhandene Kartenmaterial durch eine lithologisch-strukturgeologische Detailkartierung des gesamten Projektgebiets im Massstab 1:5000. Es folgten weitere Detailkartierungen im Massstab 1:2000 in der Umgebung von bekannten und vermuteten Störungszonen.

Erkundungsbohrungen

Die ersten Erkundungsbohrungen wurden zwischen 1993 und 1994 auf Stufe Vorprojekt durchgeführt und dienten zur ersten Erhebung von lithologischen und felsmechanischen Grunddaten der Gesteine im Projektgebiet entlang des Tunnelkorridors zwischen Sant'Antonino und Lugano. Diese Bohrkampagne bezog sich auf die damaligen beiden untersuchten Linienführungen (Stufe *Vorprojekt*, *«Basisvariante»* und *«Alternativvariante»*). Es handelte sich um vertikale Bohrungen mit Längen von 30 bis 200 m.

Die Val-Colla-Linie (LVC), deren bautechnische Relevanz bereits in frühen Projektphasen erkannt wurde, war Objekt verschiedener Erkundungsbohrungen. Die ersten Erkundungsbohrungen im Bereich der LVC fanden während der Bohrkampagne Stufe Vorprojekt statt. Die eigentlichen Hauptbohrungen zur ausführlichen Erkundung der LVC erfolgten hingegen auf Stufe *Auflageprojekt CBT-Doppelspurtunnel* zwischen 1997 und 1999. Hierbei wurden im Gebiet Tesserete – Sala Capriasca Vertikal- und Schrägbohrungen von bis zu 400 m Länge abgeteuft.

Ausserhalb der LVC erkundete der Projektverfasser mit Bohrungen im Rahmen des Erkundungsprogramms «*CPS und integrierte Erkundungsbohrungen*» (jeweils Stufe *Auflageprojekt CBT-Doppelspurtunnel*) den Bereich des Nordportals Sant'Antonino, Vigana und den Tunnelabschnitt in der Val-Colla-Zone zwischen Ponte Capriasca und dem Südportal Vezia.

Nachdem 1999 der Bundesrat das definitive Tunnelsystem «zwei Einspurtunnel» genehmigt hatte, erfolgten entlang der endgültigen CBT-Linienführung auf Stufe Projekt weitere ergänzende Erkundungsbohrungen. Zentral waren die Tiefkernbohrungen an Schlüsselstellen im Val d'Isone und bei der Gola di Lago zur Erkundung von Störungszonen in der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone (CZ) mit einer Länge bis zu 700 m, um die Tunnelkote zu erreichen.

Erkundungsstollen Sigirino

Der Vortrieb des 3,1 km langen Erkundungsstollens Sigirino (CPS) fand in den Jahren 1997–2000 im Sprengvortrieb statt. Bis zur Fertigstellung des FIS diente der CPS als Zugang für den Ausbruch der Logistikkavernen (CAOP).

Der Bau des CPS bezweckte die lithologisch-strukturelle und geotechnisch-hydrogeologische Erkundung der Ceneri-Zone. Gleichzeitig erfolgte ein ausführliches felsmechanisches Untersuchungsprogramm, welches neben Laboruntersuchungen auch geotechnische In-situ-Messungen mit Inklino- und Extensometern auf der Teststrecke im Kreuzungsbauwerk beinhaltete. Der Vortrieb des CPS und des Kreuzungsbauwerks ermöglichte es, erste Erfahrungen über das Gebirgsverhalten in der Giumello-Gneis-Formation in und schräg zur Vortriebsrichtung der künftigen Einspurtunnel zu sammeln.

Geophysikalische Untersuchungen

Während in den meisten Erkundungsbohrungen bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (inkl. Fluid-Logging) durchgeführt wurden, liess der Projektverfasser zugleich auch seismische oberflächennahe Profile in projektrelevanten Gebieten, wie die LVC, Bigorio, Odogno, Lago d'Origlio und das Südportal Vezia–Cureglia, erstellen.

Hydrogeologie – Quellenkataster

Ein grossflächiger Quellenkataster (ca. 73 km^2) mit Beurteilung der möglichen Beeinträchtigung von Oberflächenquellen wurde auf Stufe Vorprojekt-Auflageprojekt 1993 bis 1997 erhoben. Dieser erfasste und klassifizierte mehr als 1000 Oberflächenquellen und deren Grunddaten in einer Datenbank. Dieser Kataster wurde laufend aktualisiert.

Die Grunddaten des Quellenkatasters, wie Hydrochemie, physikalisch-chemische Parameter sowie die Ergebnisse der Bohrlochuntersuchungen, konnten einerseits als Grundlage und anderseits für die Abschätzung der initialen und stationären Bergwasserzutritte sowie deren Beschaffenheit im CBT herangezogen werden.

2.3.2 Risikozonen und deren Erkundung

Der Schwerpunkt der projektrelevanten Risikozonen im Gebiet des CBT bezog sich einerseits auf die regionaltektonische Komplexität und lithologische Heterogenität des Gebirgsaufbaus des Kristallins der Südalpen, anderseits auf die Überprägung von präalpinen Strukturen. Diese sind durch die späteren alpinen Verformungsphasen im dextralen Blattverschiebungssystem entlang der Insubrischen Linie entstanden und durchtrennen das Gebirge mit komplexen Sprödstrukturen, insbesondere kataklastisch-kakiritischen Störungszonen und anderen Trennflächensystemen (Kap. 4).

Die folgenden Abschnitte beschreiben die projektrelevanten Risikozonen des CBT und erläutern die Vorgehensweise der Erkundungsmassnahmen zur Erhöhung der Prognosesicherheit.

Val-Colla-Linie

Die bereits erwähnte LVC, die mit kataklastisch-kakiritischen Störungszonen, Phylliten, Myloniten sowie Gneisen und Glimmerschiefern einen Baugrund mit schwierigen geologisch-geotechnischen Verhältnissen bildet, wird in Kap. 2.5.4 ausführlich beschrieben.

«Subparallelismus», mittlere Ceneri-Zone

Der komplexe Gebirgsaufbau und die daraus resultierenden Raumlagen der präalpinen tektonischen Strukturen ergeben für die Trennflächen im Streckenabschnitt mittlere bis südliche Ceneri-Zone ungünstige Verschneidungswinkel mit der Tunnelachse (Kap. 4.1). Eine Umgehung des Subparallelismus war im Variantenvergleich der Optimierungsstudie (A 2) selbst mit einer anderen Auslegung der Linienführung nicht oder nur teilweise vermeidbar gewesen, weil im zentralen Streckenabschnitt des CBT die geologischen Hauptstrukturen überwiegend schliefend bis parallel zur Tunnelachse von Norden nach Süden verlaufen. Der Projektverfasser bezeichnete diesen Streckenabschnitt als «Subparallelismus». Diese Zone entspricht entlang der Tunnelachse einer geschätzten Streckenlänge von 3,6 bis 4,0 km, welche ungefähr 25 % der Gesamtlänge des CBT beträgt.

Die Prognose der Störungszone 15B.1 basierte auf den Ergebnissen der geneigten Kernbohrung CB 84 (Länge 665 m) und den lithologisch-strukturellen Beschaffenheit der Aufschlüsse an der Oberfläche. Die Bohrkerne zeigten im Bereich der Störungszone 15B.1 tektonisch stark beanspruchte, zerscherte z.T. kohäsionslose Störungsgesteine wie Kakirit und Kataklasit, die sich mit leicht gestörten oder intakten Gesteinen über einen längeren Streckenabschnitt abwechseln. Wegen der bautechnischen Relevanz wurde sie während der Ausführungsphase als intensiv tektonisierte Zone (ITZ) oder Lago-di-Gola-Störungszone benannt. Obwohl die Bohrung bis in die Nähe der Tunnelachse gelangte und sich dadurch die Raumlagen der Trennflächen und die Gesteinsgrenzen mit relativer Zuverlässigkeit auf Tunnelebene projizieren liessen, bestanden für die Prognosegenauigkeit der SZ 15B.1 dennoch Unsicherheiten. Das Mass für diese Unsicherheit wird als Streubereich bezeichnet und ist eine der Grundlagen für die Risikoanalyse. Der Streubereich wurde für jede Störung berechnet und im Werkvertrag als Grenze für die Beschaffenheit des Gebirges angegeben (Fig. 2-2). Die Ausdehnung des Streubereichs ist abhängig von der Gebirgsüberlagerung, der Prognoseunsicherheit durch die Interpretation der Kernbohrung und schliesslich von der Lage der Störung und deren Topologie (räumlicher Zusammenhang). Für die SZ 15B.1 wurde ein Streubereich von 170 m festgelegt.

Für die Einschätzung des Gebirgsverhaltens im Bereich der SZ 15B.1 erwartete der Projektverfasser sowohl Verformungen entlang von Trennflächen im Randbereich der Störungszone als auch innerhalb derselben entlang von petrographischen Diskontinuitäten gegeben durch einen abwechselnden Zerscherungsgrad. Verformungen wurden ebenfalls im Zusammenhang mit den niedrigen Gesteinsfestigkeiten (insbesondere im kakiritischen Gestein) erwartet. Die felsstatischen Untersuchungen liessen auf Verformungen in der Grössenordnung von 20–30 cm schliessen, weshalb die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Gefährdungsbilder plastische Verformung, Ortsbrustinstabilität, Auflockerung, Kluftkörper und Ablösung als hoch eingestuft wurde.

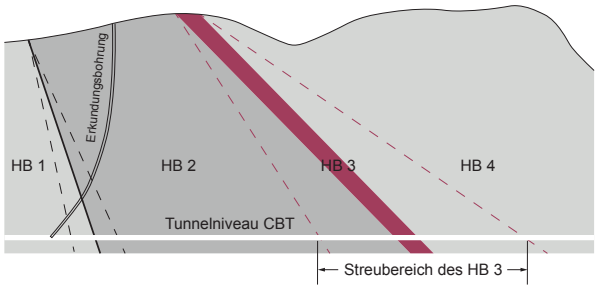


Fig. 2-2: Schematische Darstellung der Definition der Streubereiche in den Homogenbereichen des CBT.

Im Bauprojekt wurden geologisch-bautechnische Risikoanalysen durchgeführt, um die Auswirkungen der Prognoseunsicherheiten im Hinblick auf die Bauzeiten und Baukosten abzuschätzen und die Wahl der Vortriebsmethode mittels fundierter Unterlagen zu prüfen. Angesichts der Unsicherheiten bezüglich Gebirgsaufbau, der ungünstigen Raumlagen der prognostizierten Hauptstrukturen, welche trotz relativ geringer Mächtigkeiten entlang der Tunnelachsen relevante Ausdehnung der SZ 15B.1 zu Folge hatten, sowie der Schwierigkeiten, den Baugrund ausreichend erkunden zu können, entschied sich der Bauherr, den nördlichen Abschnitt des CBT nur im konventionellen Sprengvortrieb auszuschreiben.

2.4 Modell der Homogenbereiche

Für die Erarbeitung der Prognose wurde das Gebirge entlang der Tunnelachse in Homogenbereiche (HB) unterteilt (SIA 199, Fig. 2-4), welche Gesteine mit gleichem oder ähnlichem lithologischem und strukturellem Charakter gemäss Tabelle im Anhang 13-a gruppieren. Dieses Vorgehen hat sich als besonders nützlich für die vereinfachte Beschreibung lithologischer Formationen erwiesen, wie z.B. die vielzähligen und dünnen Amphibolitabfolgen, die im Ceneri-Paragneis der mittleren Ceneri-Zone eingebettet sind (Fig. 2-4). Die Homogenbereiche wurden nicht nur aufgrund von geologischen und petrographischen Kriterien festgelegt; ausschlaggebend waren zusätzlich auch hydrogeologische, strukturgeologische, geotechnische sowie bautechnische Kriterien. Zum Beispiel wurde die Grenze zwischen der nördlichen und südlichen Val-Colla-Zone rein aufgrund strukturgeologischen Kriterien, wie z.B. die Abflachung der Schieferung in der südlichen Val-Colla-Zone, definiert. Die Homogenbereiche 28B (CAOP), 44 (Unterquerung Val Ponteggia, Kap. 11.4.11), 45A (Gegenvortrieb Vezia) und 45B wurden aus technischen Gründen festgelegt. Das in Homogenbereiche unterteilte, vereinfachte geologische und tektonische Modell wurde im Projekt für die Festlegung der Ausbruchsicherungstypen weiterverwendet, zudem erleich-

terte es den Vergleich zwischen Prognose und Befund.

Für jede der Grenzen der Homogenbereiche wurde ein Streubereich bestimmt, dessen Grössenordnung von der Gebirgsüberlagerung, der räumlichen Orientierung der Grenze oder der Störung und der Qualität des erkundeten Baugrunds abhängt. In einem mit zahlreichen Kernbohrungen gut erkundeten Baugrund nahe der Tunnelachse sind die Streubereiche deutlich kleiner als in einem Baugrund mit wenig bis keinen Bohrungen, grosser Gebirgsüberlagerung und subparallelen Strukturen (Fig. 2-2).

Das Konzept der Homogenbereiche wurde für die Prognose und Bauausführung standardmässig bei allen Analysen und Auswertungen angewendet. Die im Vortrieb erfassten geologischen Daten wurden zusammen mit allen signifikanten Attributen, wie z.B. Tunnelmetrierung, SISO-Grad, Einstufung, nach Homogenbereich, Gesteinstyp usw., in den Datenbanken eingetragen. Dies ermöglichte eine parameterbezogene Datenabfrage geordnet nach Homogenbereich im Baustellenjournal SISO und in den GIS-Datenbanken. Parameterbezogene statistische Analysen, wie z.B. die Bestimmung der Intensität der Klüftung, die Durchtrennung oder Orientierung der Schieferung, waren Grundlage für die während der Bauausführung oft durchgeführten Rückanalysen und Studien oder die Schlussdokumentation. Die während der geologischen Begleitung verwendete GIS-Arbeitsmethode ermöglichte eine lückenlose geologische

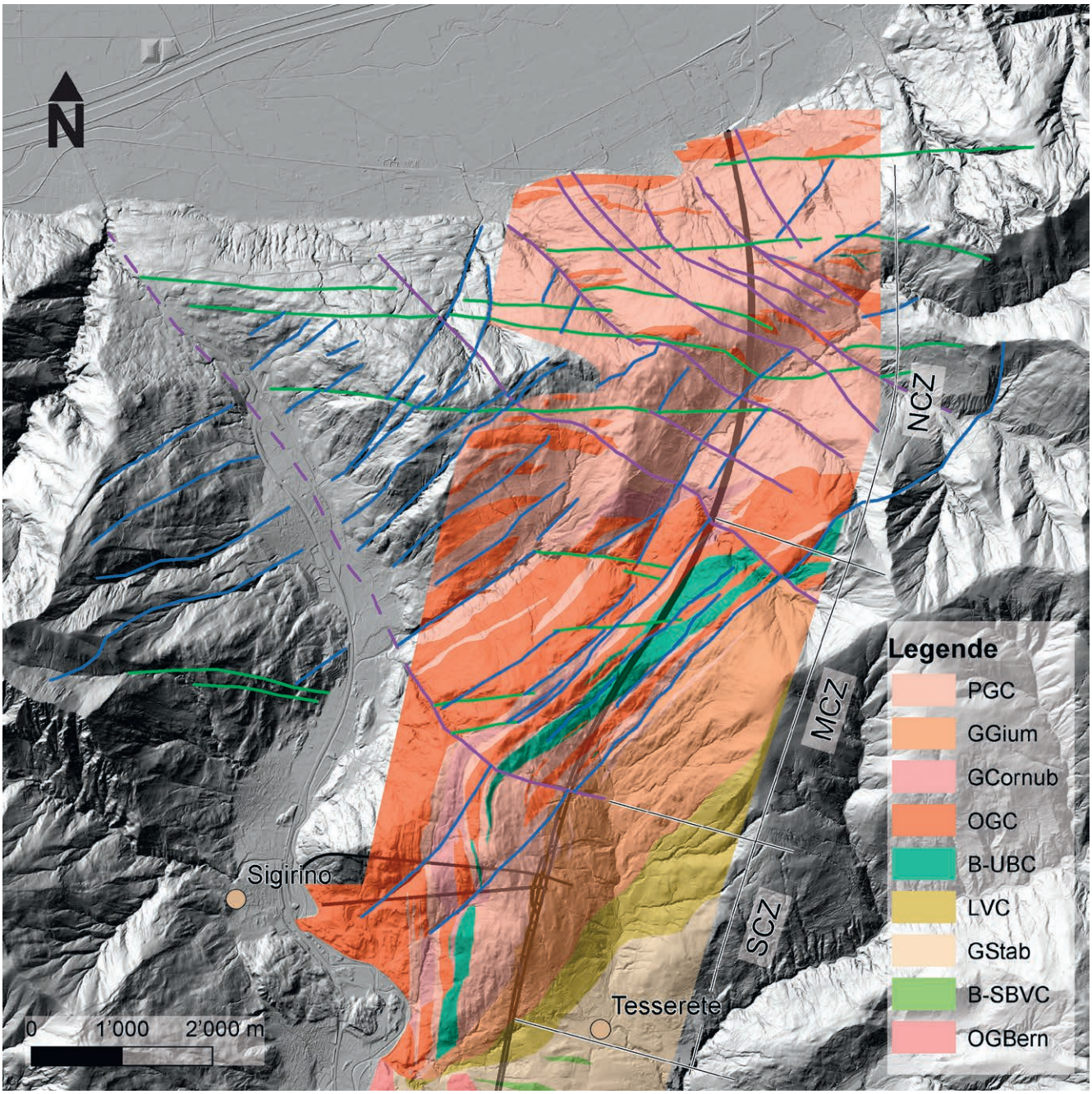


Fig. 2-3: Darstellung des Störungssystems an der Oberfläche im Bereich der nördlichen bis mittleren Ceneri-Zone abgebildet über dem swissALTI^{3D} Höhenmodell und der geologischen Karte der Projektprognose. Legende: Blau = Präalpine Strukturen (Brüche, Verwerfungen oder Störungen) des «Subparallelismus», Grün = Strukturen parallel zur Insubrischen Linie und Violett = En-échelon-Strukturen, beides alpine Strukturen, NCZ = nördliche Ceneri-Zone, MCZ = mittlere Ceneri-Zone, SCZ = südliche Ceneri-Zone. (Topographischer Hintergrund swissALTI^{3D}: swisstopo).

Dokumentation und folglich einen fundierten Soll/Ist-Vergleich.

Das Modell der Homogenbereiche vereinfachte im Grunde genommen die Zusammenarbeit zwischen allen Projektbeteiligten.

2.5 Tektonische und lithologische Gliederung

Aufgrund der strukturellen Komplexität des Baugrundes und lithologischen Vielfalt (Fig. 2-3) wurden für die geologische Prognose sechs tektonische Einheiten ausgearbeitet und in 49 Homogenbereiche feingegliedert (Tab. 3-3, Fig. 2-4). Zudem wurde ein Kataster der total 41 Störungszonen erstellt, welcher den Tunnel in Bereiche ähnlicher geotechnischer Eigenschaften unterteilt. Im Folgenden werden die tektonischen Einheiten und die bautechnisch wichtigsten zu erwartenden Störungszonen beschrieben

2.5.1 Nördliche Ceneri-Zone

Die nördliche Ceneri-Zone (NCZ) erstreckt sich vom Nordportal am Fusse des Monte Ceneri bis zum Val Mara nordöstlich von Medeglia (auf der linken Seite des Val d'Isone) und entspricht auf der CBT-Achse einer Länge von ca. 4,2 km (HB 0A – 12A).

Sie ist durch ihre Hauptstrukturen mit einer Streichrichtung Ost–West (Schieferung und lithologische Kontakte) gekennzeichnet und besteht hauptsächlich aus Ceneri-Paragneis (PGC, Fig. 2-3). Untergeordnet treten Ceneri-Orthogneis (OGC), «Mischgneis» (GM) und wenig Hornfels (GCornub) auf. Der Ceneri-Gneis (CG) keilt weiter westlich aus und erreicht folglich den CBT nicht. Unterhalb der Cima di Fuori erreicht die Gebirgsüberlagerung mit 820 m den Maximalwert des gesamten CBT.

Diese nördliche Ceneri-Zone wird durch ein transversales und steil stehendes (Einfallen >70°) SE-NW-vergentes Störungssystem dominiert, bestehend aus einer Staffel von 5–25 m mächtigen kataklastischen Störungen, die diskordant zur Hauptschieferung liegen. Entlang der Talflanken des Valle Ticino und Val d'Isone, erscheinen sie morphologisch als sichtbare Einschnitte an der Oberfläche (s. violette Strukturen in Fig. 2-3).

Angesichts ihrer räumlichen Auswirkung von mehr als 10 km nach Süden zeugt die Insubrische Linie von einem erheblichen tektonischen Spannungsfeld, dem das Gebirge während der alpinen Orogenese ausgesetzt war. Die Kernbohrungen CB86 und CB86bis zeigten in der Prognose, dass die erwähnten Störungen sich mit dem CBT kreuzen und eine bautechnische Relevanz für den Vortrieb aufweisen. Die Kernbohrung CB86 musste in einer Tiefe von 392 m abgebrochen werden, weil sich während der Erkundung der kakiritischen Störungszone Pianturino-Albarina (SZ 7.1) das Bohrloch verengte und dadurch das Bohrgestänge verklemmte. Die subvertikal einfallenden Störungen im Val d'Isone bei Pianascio (SZ 10B.1 und SZ 10B.2), die mit der Kernbohrung CB86bis erkundet wurden, erwiesen sich als eine komplexe Störungszone mit einzelnen Teilmächtig-

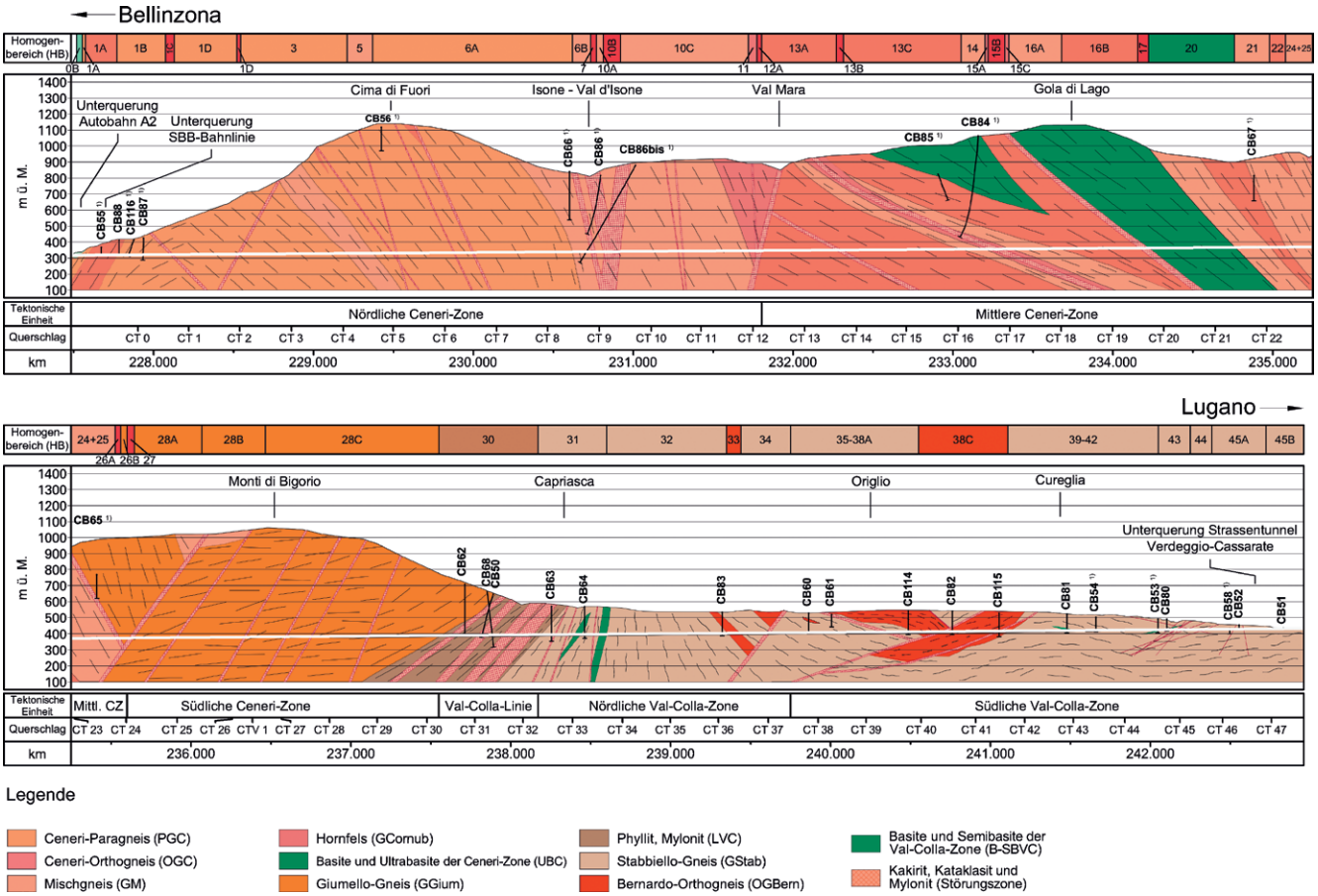


Fig. 2-4: Geologisches Längenprofil mit der Prognose und den projizierten Kernbohrungen für die Osttröhre.

keiten von 85 und 70 m, bestehend aus kataklastischem Fels. Die Störungszone SZ 12 A.1 Val Mara ist die dritte relevante Störungszone in dieser tektonischen Einheit. Sie begrenzt die nördliche Ceneri-Zone von der südlichen Ceneri-Zone. Die Val-Mara-Störung bildet eine komplexe, steil stehende Linie mit Streichrichtung SSE–NNW (040/70), die in der regionalen Tektonik wahrscheinlich eine Relation zwischen der Gambarogno- und Isone-Überschiebung und den beiden dextralen Blattverschiebungslinien Insubrische Linie und Tesserete-Grona-Linie darstellt.

2.5.2 Mittlere Ceneri-Zone («Subparallelismus»)

Ab der Val-Mara-Störung ändert sich in der mittleren Ceneri-Zone das tektonische Regime deutlich, indem das Insubrische System sukzessiv durch das LVC-System abgelöst wird (Pozzorini 2017). Es dominieren die Strukturen des «Subparallelismus» mit Südwest-Nordost-Streichrichtungen. Das Gebiet der mittleren Ceneri-Zone erstreckt sich auf einer Länge von 3,8 ± 0,2 km zwischen dem Val Mara und der Nordgrenze des Giumello-Gneises (HB 13A – HB 26B). Die Gebirgsüberlagerung beträgt zwischen 500 und 780 m. Petrographisch sind im CBT in der Reihenfolge ihrer Häufigkeit Aufschlüsse mit Ceneri-Orthogneis, Mischgneisen (s. Neudefinition Kap. 3.2.2.2), Basiten-und Ultrabasiten, sowie Hornfels zu erwarten gewesen. Am Südrand der mittleren Ceneri-Zone wurde ein Kontakt mit einer 10 m mächtigen kataklastischen Störung (SZ 26A.1) prognostiziert.

2.5.3 Südliche Ceneri-Zone

Diese tektonische Einheit enthält alle lithologischen Variationen des Giumello-Gneises und erstreckt sich bis zur Grenze der LVC. Die Gebirgsüberlagerung liegt in der Grössenordnung von 650–700 m und fällt am Südende steil auf 400 m ab. Die Tunnelachse verläuft praktisch parallel zur Hauptschieferungsrichtung und zu den lithologischen Grenzen, aufgrund dessen der Begriff «Subparallelismus» der Strukturen definiert wurde.

Die strukturellen und lithologischen Verhältnisse im Bereich der CPS, FIS und CAOP-Weströhre korrelieren mit den geologischen Informationen an der Oberfläche und ermöglichten in der Prognose, die Felsverhältnisse für die südliche Ceneri-Zone auf Tunnelniveau zu charakterisieren. Vergleichbar mit der mittleren Ceneri-Zone tritt ein Störungssystem mit Streichrichtung Nordost-Südwest auf, das diskret von Riedel-Strukturen diskordant durchtrennt wird. Die Störungen haben Mächtigkeiten zwischen 5 und 15 m und erreichen aufgrund ihrer parallelen Streichrichtung (320/70) zur Tunnelachse eine effektive Länge im Tunnelprofil von 35–50 m. Die Störungen SZ 28A.1, 28B.1 und 27.1 wurden mit dem Erkundungsstollen CPS durchörtert, während die Störung 28 C.3 zusätzlich mit den Kernbohrungen CB120 und CB122 erkundet wurden. Sie zeigen alle kataklastischen Felseigenschaften auf.

2.5.4 Val-Colla-Linie

Die Val-Colla-Linie (LVC) bzw. der Homogenbereich 30 stellt einen der bautechnisch anspruchsvollsten Abschnitte des CBT dar. Gründe dafür sind einerseits die ungünstigen geotechnischen Eigenschaften der Ausgangsgesteine und anderseits der komplexe strukturelle Gebirgsaufbau. Während der alpinen Gebirgsbildung entstanden in diesem Bereich kataklastische und kakiritische Störungszonen, die z.T. bis auf Tunnelniveau reichen.

Im Rahmen der Erkundungskampagnen wurde dieser Abschnitt mit mehreren Bohrungen erkundet, was ermöglichte, mittels Labor- und In-situ-Versuchen die geotechnischen Parameter zu ermitteln. Die Probenentnahme und -vorbereitung für Laborversuche gestaltete sich infolge der petrographisch bedingten Zerbrechlichkeit der glimmerreichen Mylonitproben als sehr schwierig. Es konnten daher nur wenige Versuche erfolgreich abgeschlossen werden.

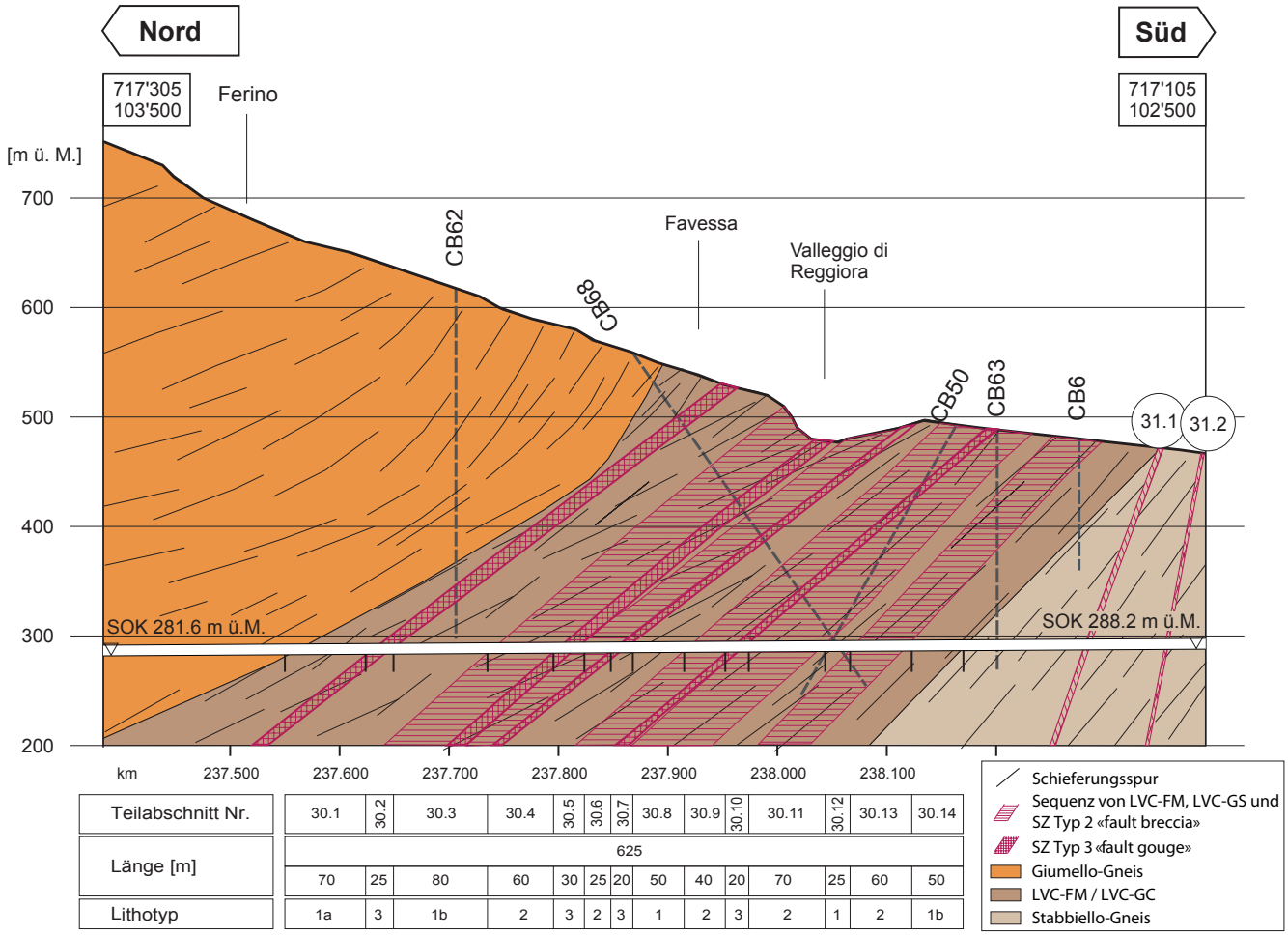
Die LVC stellt für den Tunnelbau einen bautechnisch relevanten Streckenabschnitt im Ceneri-Gebirge dar, denn diese präalpin gebildete duktile Scherzone wurde nachträglich von spröden tektonischen Strukturen überprägt. Die LVC, welche den Übergang zwischen der südlichen Ceneri-Zone und der nördlichen Val-Colla-Zone festlegt, besteht grossenteils aus Myloniten, Phylloniten und mehreren kakiritischen und kataklastischen Störungszonen, deren geotechnische Eigenschaften für den Tunnelbau ungünstig sind. Die Störungszonen entsprechen einem System mit Streichen in Nordost-Südwest-Richtung und Einfallen in Richtung Nordwest, welches auf regionaler Ebene die Gazzirola-Linie bildet, eine Riedel-Struktur vom Typ «P», die mit der dextralen Transpression assoziiert ist (Schumacher 1990). Aufgrund der strukturgeologischen und lithologischen Komplexität der LVC wurde für das Bauprojekt, basierend auf sieben Kernbohrungen, ein lokales geologisches Modell erstellt (Fig. 2-5). Die besonderen Herausforderungen bestanden darin, die lithologischen Grenzen sowie Störungen innerhalb der LVC zu identifizieren, welche aufgrund der graduellen Übergänge oft verwischt auftraten. Die wenigen Felsaufschlüsse an der Oberfläche sind häufig stark verwittert und geben wenig Hinweise auf die Beschaffenheit des Baugrundes. Das Fehlen von eindeutigen Referenzhorizonten innerhalb der Bohrungen erschwerte die Korrelation der Störungen im geologischen Modell.

Die gesamte Länge der LVC beträgt in beiden Tunnelröhren 600 m. Dank der Hanglage südlich des Monte Bigorio nimmt die Gebirgsüberlagerung rasch von 390 m bis auf 190 m ab.

Die Orientierung der Schieferung variiert innerhalb der LVC stark, zeigt aber im Mittel einen Nordwest-Trend mit Einfallswinkeln zwischen 40 und 70°. In der nördlichen Hälfte der LVC liegt die Schieferung bei 270–310°/40–60°, während sie sich in der südlichen Hälfte generell in eine günstigere Lage von 310–350°/40–70° dreht.

Dieser Nord-Süd-Unterschied geht mit den lithologischen und strukturgeologischen Verhältnissen der Gesteine im Homogenbereich 30 einher (petrographische Heterogenität, linsenförmige Gesteinskörper, Falten). Auch das spröde Störungssystem (Verwerfungsfalten) beeinflusst die Orientierung der Schieferung.

Das geologische Modell beinhaltet drei unterschiedliche Lithotypen (LT, Tab. 2-2).



Teilabschnitt Nr.	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	30.10	30.11	30.12	30.13	30.14
Länge [m]	625													
	70	25	80	60	30	25	20	50	40	20	70	25	60	50
Lithotyp	1a	3	1b	2	3	2	3	1	2	3	2	1	2	1b

Fig. 2-5: Das geologische Prognosemodell für die Durchörterung der Val-Colla-Linie stellt die Verteilung der Lithotypen im Homogenbereich 30 dar. Die abgebildeten Kernbohrungen CB sind in das Profil hineinprojiziert. Eine Beschreibung der Lithotypen wird in der Tabelle 2-2 dargestellt.

Tab. 2-2: *Unterteilung und Beschreibung der Lithotypen des geologischen Modells des Homogenbereichs 30 für die Durchörterung der Val-Colla-Linie.*

Lithotyp	Beschreibung des Gesteins	
1a	Phyllonit, Mylonit und Schiefer	Vorwiegend intaktes Gestein, z.T. spröd deformiert
1b	Gneis, z.T. mit schiefrigem Gefüge	
2	Hetereogenes Gestein, Gemisch zwischen intaktem Gestein (Lithotyp 1), Kakiriten des Typs «fault breccia» und «fault gouge» (Lithotyp 3)	
3	Gesteinsmehl («fault gouge»)	

Die Verteilung des Lithotyps 1 wird mit 80% LT 1a und 20% LT 1b evaluiert. Von den drei Lithotypen ist der zweite der komplexeste, weil er aus einem Gemisch des LT 1 und 3 besteht und deren Grenzen wegen der fliessenden Übergänge schlecht voneinander unterscheidbar sind. Zudem konnte dieser LT wegen zu geringer Mächtigkeiten anhand der Bohrungen oft nicht ausscheiden werden.

Aus den beobachteten effektiven Mächtigkeiten der kakiritischen Störungen in den Kernbohrungen resultiert im geologischen Modell für den LT 3 eine summierte Länge von 20–30 m. Für die Erkundungen wurden zusätzlich geophysikalische Messmethoden in Bohrlöchern angewendet (Akustischer Bohrloch-Televiewer, digitale Videokamera), die wegen technischer Bedingungen (Mantelrohr im brüchigen und ungünstigen Felsen notwendig) nicht erlaubte, Strukturen zu definieren, um damit lithologische Sequenzen zu korrelieren.

Wegen der höheren bautechnischen Risiken in der Val-Colla-Linie wurden für die Durchörterung zusätzlich ein Konzept für die Durchörterung und Vorauserkundung sowie ein Massnahmenplan für ausserordentliche Gebirgsverhältnisse erarbeitet. In Abhängigkeit der angetroffenen Gefährdungsbilder bestand in der LVC ein grosser Spielraum für den Einbau von hohen AST SPV 6 bis 10.

Damit die tatsächliche Beschaffenheit der LVC und die Projektannahmen sich für den Vortrieb verifizieren liessen, wurden gemäss Vorauserkundungskonzept für die Durchörterung der LVC Kernbohrungen in Kombination mit Schlagbohrungen geplant (s. Kap. 9.2.1).

Die Festlegung der Ausbruchsicherung für die ersten Vortriebsmeter in der LVC sollte auf der geologischen Interpretation der Kernbohrungen zur Erkundung der Nordgrenze der LVC erfolgen. Unter Umständen waren auch die Ergebnisse der entsprechenden Laborversuche zur Entscheidungsfindung heranzuziehen. Im Konzept für die

Duchörterung wurde empfohlen, zu Beginn der LVC einen AST mit ausreichend Verformungs- und Tragreserve einzubauen.

Es war geplant, dass die weitere Festlegung der Sicherung für die LVC gestützt auf die kontinuierlichen Ergebnisse der Beobachtungen im Vortrieb und die felsmechanischen Messungen sowie auf die Auswertung der Vorauserkundungsbohrungen bzw. geotechnischen Analyse gemäss dem üblichen Vorgehen nach projektinternem Dokument «Leitlinien für die Festlegung der Ausbruchsicherungstypen» (A 1) erfolgte.

2.5.5 Nördliche Val-Colla-Zone

Die nördliche Val-Colla-Zone erstreckt sich ab der LVC-Südgrenze bis etwa zur Höhe des Lago d'Origlio. Gemäss Prognose umfasste diese Einheit die Homogenbereiche 31–34. Die dominierende Formation in dieser tektonischen Einheit ist der Stabbiello-Gneis, in geringerem Masse sind einige Meter bis Dekametergrosse Körper mit Basiten und Semibasiten der Val-Colla-Zone (B-SBVC) sowie Bernardo-Orthogneis (OGBern) aufgeschlossen. Angrenzend an die LVC fallen die Hauptstrukturen, wie Schieferung und lithologische Kontakte, zuerst in Richtung zwischen Nordwest und Nordost (340–040/50–80) ein, drehen dann kontinuierlich, bis sie eine Südwestrichtung einnehmen (180–220/40–80).

Im Störungszonenkataster sind kataklastische Störungszonen mit einer realen Dicke von weniger als 5 m aufgeführt, die der Tesserete-Grona-Linie zugeordnet sind und nach Norden gerichtete subvertikale Einfallen aufweisen (350–005/70–85).

Der Kontakt zwischen nördlicher Val-Colla-Zone und südlicher Val-Colla-Zone definiert eine wichtige strukturelle Änderung, die durch den Übergang von geneigter (HB 34) zu subhorizontaler Schieferung (HB 35–38A) gekennzeichnet ist.

Die Gebirgsüberlagerung über dem CBT ist deutlich kleiner als in der Ceneri-Zone und nimmt progressiv von 200 m im Norden auf 150 m im Süden ab.

Wegen der geringeren Gebirgsüberlagerung in der Umgebung des dichter überbauten Gebiets zwischen Sala Capriasca – Origlio – Capriasca und Vezia wurden im Hinblick auf Erschütterungen und Körperschall Einschränkungen beim Vortrieb in der gesamten Val-Colla-Zone geplant.

2.5.6 Südliche Val-Colla-Zone

Auch in dieser tektonischen Einheit herrscht der Stabbiello-Gneis vor, der mit wenigen Körpern von Bernardo-Orthogneis und kleineren Passagen von B-SBVC abgelöst wird. Im Abschnitt ZVC Süd liegt die Gebirgsüberlagerung zwischen 35 und 140 m. Sie verringert sich nach Süden hin bis zum Erreichen der minimalsten Höhe von 13 m im Val Ponteggia. Die Ausrichtung der Schieferung in der südlichen Val-Colla-Zone ist im Allgemeinen subhorizontal und wellig mit einem zu erwartenden Einfallen von 0–40°.

Das Verzweigungsbauwerk Sarè wurde in einem Baugrund mit Stabbiello-Gneis des Homogenbereichs 35-38A und in OGBern des Homogenbereichs 38C geplant. Auf Grundlage der Ergebnisse von Erkundungsbohrungen wurden in diesem Abschnitt diverse Störungen mit bautechnischer Relevanz entlang der tektonischen Kontakte zwischen Stabbiello-Gneis und Bernardo-Orthogneis prognostiziert, die wegen des Gesteinsmaterials, bestehend aus Kakirit und Kataklasit mit einer Mächtigkeit von weniger als 5 m und einem schwach geneigten Einfallen, in Betracht gezogen werden mussten.

Weitere Störungszonen mit geringer bautechnischer Relevanz, vorwiegend kataklastischer Gesteinsbeschaffenheit, sind ganz im Süden des CBT in der Umgebung des Val Ponteggia (HB 43) prognostiziert.

Die Gebirgsüberlagerung beträgt in der südlichen Val-Colla-Zone weniger als 150 m.

3. Geologischer Befund

Die geologischen Auswertungen der Befunddaten beruhen auf denselben Kriterien, wie bei der geologischen Prognose vor dem Vortriebsbeginn (Ausführungsprojekt). Einen gesamten Überblick über die Zusammenhänge zwischen Bauwerk, Geologie, Geotechnik und Hydrogeologie verschafft das geologisch-bautechnische Längenprofil der Oströhre in der Taf. I. Darüber hinaus stützt sich der geologische Befund auf dem Prognosemodell der Homogenbereiche (s. Kap. 2.4). In Tabelle 3-1 sind alle angetroffenen Homogenbereiche in der Reihenfolge von Nord nach Süd zusammengefasst.

Tab. 3-1: *Übersicht der angetroffenen Homogenbereiche und geologischen Formationen im CBT.*

Homogenbereich	Geologische Formation	Oströhre		Weströhre	
		Strecke [km]	Länge [m]	Strecke [km]	Länge [m]
Nördliche Ceneri-Zone					
0A	Quartär, Lockergestein	227.518–227.536	18	327.533–327.537	4
0B	Ceneri-Paragneis	227.536–227.542	6	327.537–327.547	10
1A	Ceneri-Orthogneis	227.542–227.579	37	327.547–327.587	40
1Bbis	Ceneri-Paragneis	227.579–227.669	90	327.587–327.669	82
1Abis	Ceneri-Orthogneis	227.669–227.693	24	327.669–327.710	41
1B	Ceneri-Paragneis	227.693–228.094	401	327.710–328.072	362
1Cbis	Störungszone	228.094–228.173	79	328.072–328.193	121
1D	Ceneri-Paragneis	228.173–228.202	29	328.193–328.221	28
1Dbis	Ceneri-Orthogneis	228.202–228.584	382	328.221–328.566	345
3	Ceneri-Paragneis	228.584–229.623	1039	328.566–329.683	1117
6A	Ceneri-Paragneis	229.623–230.620	997	329.683–330.600	917
6B	Ceneri-Paragneis	230.620–230.693	73	330.600–330.667	67
6C	Störungszone	230.693–230.766	73	330.667–330.748	81
10A	Ceneri-Paragneis	230.766–230.817	51	330.748–330.793	45
10B	Störungszone	230.817–230.973	156	330.793–330.948	155
10C	Ceneri-Paragneis	230.973–231.522	549	330.948–331.502	554
12Abis	Störungszone	231.522–231.666	144	331.502–331.647	145
Mittlere Ceneri-Zone					
10Cbis	Ceneri-Paragneis	231.666–231.790	124	331.647–331.792	145
11	Hornfels	231.790–231.803	13	331.792–331.823	31
13A	Ceneri-Orthogneis	231.803–232.727	924	331.823–332.790	967
14	Ceneri-Paragneis	232.727–233.101	374	332.790–333.195	405
15Bbis	Störungszone	233.101–233.576	475	333.195–333.675	480
15C	Hornfels	233.576–233.597	21	–	–
16A	Ceneri-Paragneis	233.597–233.818	221	333.675–333.861	186
16B	Hornfels	233.818–234.140	322	333.861–334.113	252

Homogenbereich	Geologische Formation	Oströhre		Weströhre	
		Strecke [km]	**Länge** [m]	**Strecke** [km]	**Länge** [m]
20	Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone	nicht angetroffen	–	334.113–334.128	15
17	Störungszone	234.140–234.158	18	334.128–334.238	110
20	Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone	234.158–234.923	765	334.238–335.108	870
21bis	Ceneri-Paragneis	234.923–235.176	253	335.108–335.259	151
22	Ceneri-Orthogneis	235.176–235.243	67	335.259–335.348	89
24+25bis	Ceneri-Paragneis	235.243–235.322	79	335.348–335.487	139
	Südliche Ceneri-Zone				
26A	Störungszone	235.322–235.354	32	335.487–335.526	39
26Bbis	Giumello-Gneis	235.354–235.568	214	335.526–335.636	110
27bis	Störungszone	235.568–235.583	15	335.636–335.671	35
26Bbis	Giumello-Gneis	235.583–235.610	27	335.671–335.694	23
28A	Giuimello-Gneis	235.610–235.627	17	335.694–335.719	25
27	Störungszone	235.627–235.654	27	335.719–335.743	24
28A	Giumello-Gneis	235.654–236.068	414	335.743–336.053	310
28B	Giumello-Gneis	236.068–236.465	397	336.053–336.451	398
28C	Giumello-Gneis	236.465–237.364	899	336.451–337.492	1041
	Val-Colla-Linie				
30A	Störungszone	237.364–237.530	166	337.492–337.612	120
30B	Gneis und Schiefer der Val-Colla-Linie	237.530–238.022	492	337.612–338.021	409
	Nördliche Val-Colla-Zone				
31	Stabbiello-Gneis	238.022–238.672	650	338.021–338.670	649
32	Stabbiello-Gneis	238.672–239.344	672	338.670–339.350	680
	Südliche Val-Colla-Zone				
33	Bernardo-Orthogneis	239.344–239.490	146	339.350–339.453	103
35–38A	Stabbiello-Gneis	239.490–240.555	1065	339.453–341.009	1556
38C	Bernardo-Orthogneis	240.555–240.580	25	nicht angetroffen	–
35–38A	Stabbiello-Gneis	240.580–240.735	155	nicht angetroffen	–
38C	Bernardo-Orthogneis	240.735–241.020	285	341.009–341.090	81
39–42	Stabbiello-Gneis	241.020–242.050	1030	341.090–342.060	970
43	Stabbiello-Gneis	242.050–242.250	200	342.060–342.210	150
44	Stabbiello-Gneis	242.250–242.384	134	342.210–342.309	99
45A	Stabbiello-Gneis	242.384–242.723	339	342.309–342.612	303
45B	Stabbiello-Gneis, Quartär	242.723–242.960	237	342.612–342.801	189
Total			**15 442**		**15 268**

3.1 Petrographische und mineralogische Beschreibung der durchörterten Formationen

Die in diesem Kapitel zusammengefasste petrographische und mineralogische Beschreibung der durchörterten Formationen der Ceneri-Zone basiert auf den geologischen Teilberichten des CBT, die bei swisstopo eingereicht wurden.

Die geologischen Formationen können der Tabelle 3-1 und dem geologisch-bautechnischen Längenprofil (Taf. I) entnommen werden.

3.1.1 Nördliche und mittlere Ceneri-Zone

Die nördliche und mittlere Ceneri-Zone bildet einen Gesteinskomplex, der abwechslungsweise durch vier Formationen vertreten ist. Dieser Gesteinskomplex umfasst vorwiegend polymetamorphe Metasedimente (Ceneri-Paragneis), metamorphe S-Typ-Granite (Ceneri-Orthogneis, Granite sedimentärer Herkunft), gebänderte oder lagige Amphibolite (Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone), die abwechslungsweise in Gneisen oder Schiefern der Ceneri-Paragneis-Formation eingebettet sind, sowie untergeordnet einige Hornfelsgneis-Vorkommen und wenige Metabasit-Gänge.

3.1.1.1 Ceneri-Paragneis (PGC)

Die durchörterte Strecke im Tunnel, die zwischen der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone liegt, zählt folgende drei unterschiedliche Lithotypen des Ceneri-Paragneises, die zusammen mit dem Ceneri-Orthogneis, den Basiten- und Ultrabasiten des Ceneri und dem Hornfels einen Gesteinskomplex aufbauen:

- Granat führender Biotitgneis
- Granat-Kyanit-Staurolith führender Muskovitschiefer
- Granat-Kyanit-Staurolith führender Zweiglimmergneis und -schiefer

In Figur 3-1a sind die Modalwerte der Minerale Muskovit und Biotit sowie Quarz+Feldspat dargestellt und mit den Alumosilikaten verglichen. Die Ergebnisse zeigen das Verhältnis zwischen Glimmer, felsischen Mineralen und Alumosilikaten (Granat, Staurolith und Kyanit). Die Grösse der Blase repräsentiert den Modalgehalt der Alumosilikate. Mit Hilfe von Figur 3-1b lassen sich die verschiedenen Lithotypen des Ceneri-Paragneises in Bezug auf die Modalwerte Quarz+Feldspat, Muskovit und Biotit deutlich unterscheiden.

Während der modale Gehalt an Biotit im Biotitgneis unter 30% liegt, erreicht der Muskovit-Gneis modale Werte von bis zu 65% Muskovit, mit viel grösseren Streubreiten. Daraus resultiert, dass ein Biotitgneis deutlich reicher an felsischen Mineralen ist als der Muskovit-Gneis.

Ein weiterer Trend widerspiegelt der Gehalt an Granat-Kyanit-Staurolith, der im Muskovit-Gneis deutlich höher liegt als im Biotitgneis (Fig. 3-1a).

Der Granat führende Biotitgneis (Fig. 3-2) und der Granat-Kyanit-Staurolith führende Muskovitschiefer (Fig. 3-3) bilden die beiden Endglieder des Ceneri-Paragneises. Dazwischenliegend können im Verhältnis Biotit/Muskovit eine Gruppe von Granat-Kyanit-Staurolith führenden Zweiglimmergneisen und Schiefern beschrieben werden (Fig. 3-1).

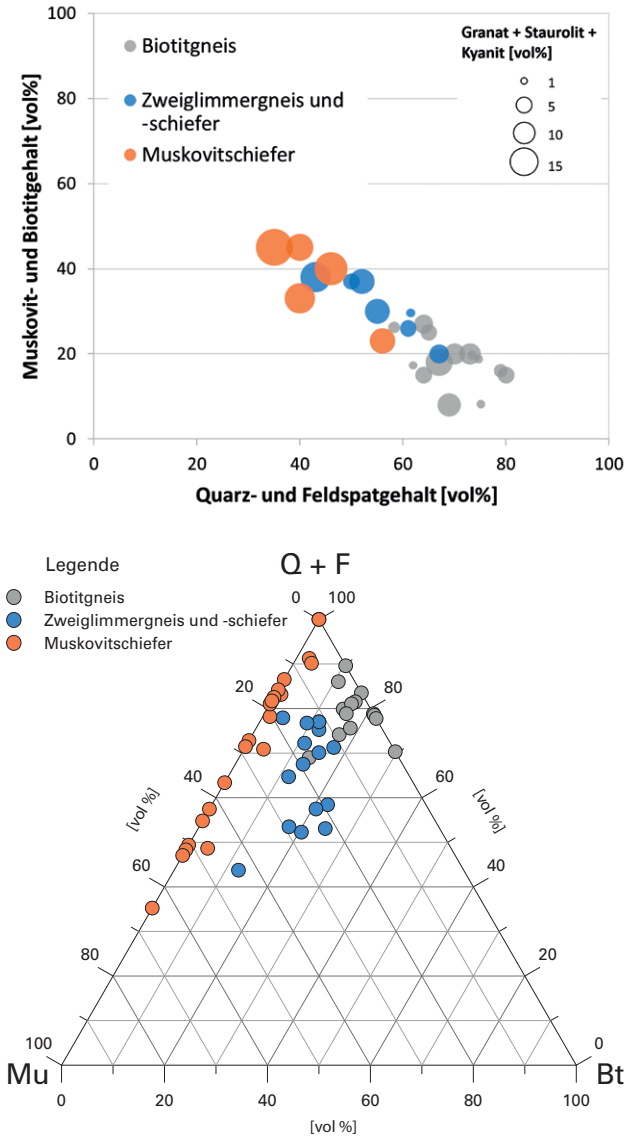


Fig. 3-1: a) Diskriminationsdiagramm für Ceneri-Paragneise mit Modalwerten aus Dünnschliff- und XRD-Analysen. b) Das Dreiecks-Diagramm repräsentiert die Modalwerte Quarz+Feldspat, Muskovit und Biotit.

In Anbetracht der petrographischen und mikrostrukturellen Ähnlichkeit zwischen Biotitgneis und Biotit führendem Ceneri-Orthogneis können für deren Unterscheidung die Erkenntnisse der Bestimmung der akzessorischen Minerale herangezogen werden. Im Dünnschliff lässt sich erkennen, dass der Ceneri-Paragneis eine deutlich höhere Vielfalt an akzessorischen Mineralen enthält als der Ceneri-Orthogneis. Akzessorien, wie Granat, Kyanit, Staurolith oder Turmalin sind in unterschiedlichem Gehalt in der Regel im Ceneri-Paragneis immer vertreten.

Auffällige Merkmale des bräunlichen bis grau-grünlichen, Granat führenden Biotitgneises an der Ortsbrust sind die zahlreichen Kluftflächen, belegt mit Chlorit-, Plagioklas-, Quarz- oder Kalzit-Kristallen, welche die Schieferung meistens senkrecht schneiden sowie die Krenulationsschie-

ferung der biotitreicheren Lagen, aus denen oft Granatprophyroblasten herausragen. Zudem gibt es innerhalb dieses Lithotyps Proben, welche durch eine Pseudo-Bänderung auffallen und sich abwechslungsweise aus quarz- und feldspatreichen Lagen und glimmerreichen Lagen mit Alumosilikaten zusammensetzen. In einigen Proben ist der Grad der Biotit-Chloritisierung erhöht, was dem Gestein eine grünliche bis dunkelgraue Färbung verleiht.

Fig. 3-2: a) Granat führender Biotitgneis Oströhre km 228.927 im Handstück und b) in der Ortsbrust km 229.249 (Fotos IG ITC).

Das andere Endglied der Ceneri-Paragneis-Serie, der Granat-Kyanit-Staurolith führende Muskovitschiefer (Fig. 3-3), zeichnet sich durch eine ausgeprägtere Schieferung sowie durch charakteristische S-C'-Strukturen aus. Dieser Lithotyp erscheint etwas heller, meist in grünlicher bis grau-silberner Farbe, bedingt durch den erhöhten Muskovitgehalt. Im Handstück stechen oft isolierte Kristalle aus Granat, Staurolith oder Disthen hervor, die in Chlorit-Glimmernestern eingewickelt sind (Fig. 3-3 a). Das Verhältnis zwischen felsischen Mineralen und Muskovit ist variabel und steuert dadurch die Korngrösse und damit die Textur des Gesteins. Es lässt sich feststellen, je mehr felsische Minerale im Ceneri-Paragneis vorhanden sind, desto feinkörniger ausgebildet ist er.

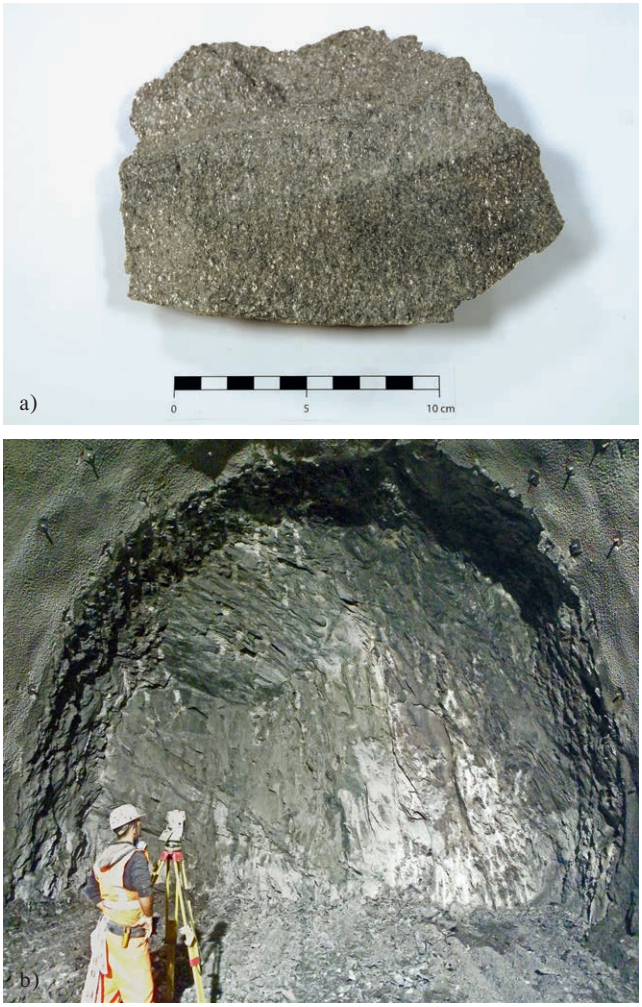


Fig. 3-3: a) Granat-Kyanit-Staurolith führender Muskovitschiefer Oströhre km 231.179 b) Ortsbrust Weströhre km 332.977 (Fotos IG ITC).

Der dritte Lithotyp besteht aus einer Mischreihe der beiden oben beschriebenen Endglieder des Ceneri-Paragneises (Fig. 3-4). Im Handstück ist die makroskopische Unterscheidung des Granat-Kyanit-Staurolith führenden Muskovitschiefers nicht immer auf Anhieb ersichtlich. Typische Merkmale dieses Gesteins sind S-C'-Strukturen, millimeter- bis zentimetergrosse grau-silbern schimmernde serizitreiche Flecken und violett schimmernde Schlieren an der Ortsbrust. In den Glimmernestern fallen Granat-Staurolithporphyroblasten oder seltener feine Turmalinnadeln auf. Die Kyanite lassen das Gestein bläulich glänzen. Die Gesteinsfarbe variiert stark, je nach mineralogischer Zusammensetzung. Die Textur ist, abhängig vom Gehalt an Schichtsilikaten, häufig schiefrig.

Die Mikrostrukturen des Ceneri-Paragneises zeigen einige weitere interessante Eigenschaften, mit denen eine mehrphasige Metamorphose rekonstruiert werden kann. Subkornbildung von Quarz oder Albit, die häufig an den Rändern von Mineralaggregaten oder in Druckschatten von Granat-, Staurolith- oder Kyanitblasten anzutreffen sind, deuten auf eine dynamische Rekristallisation während einer duktilen synkinematischen Phase hin. Drucklösungsränder an grosskörnigen Blasten und Mineralaggregaten sowie die Bildung von Kinkbändern in den Glimmern, die vorwiegend in Biotitkörnern zu erkennen sind, können als Aus-

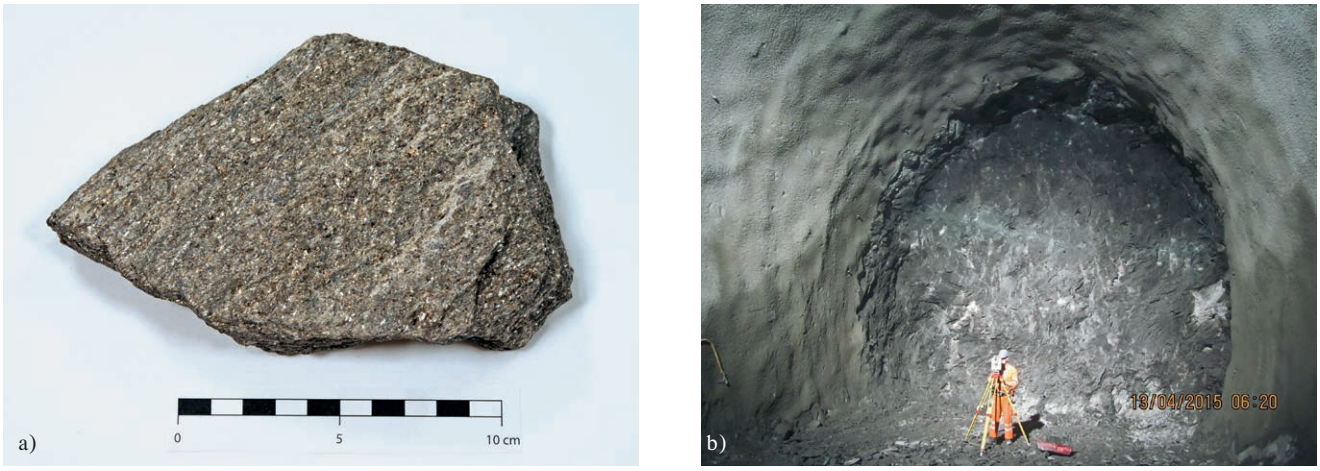


Fig. 3-4: a) Granat-Kyanit-Staurolith führender Muskovitschiefer, entnommen in der Oströhre beim km 230.105. b) Das gleiche Gestein im Aufschluss. Die Ortsbrust in der Oströhre km 230.096 zeigt in der Kalotte einen violett schimmernden massigen Bereich, während die Strosse eine schiefrige Textur aufweist (Fotos IG ITC).

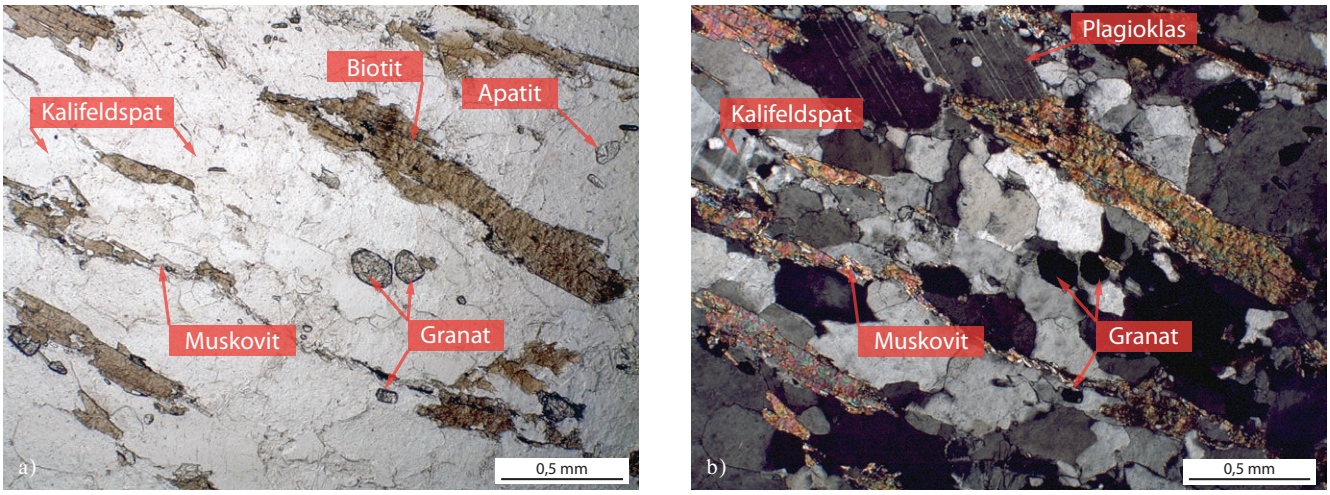


Fig. 3-5: a) Granat führender Biotitgneis in der Dünnschliffaufnahme GbC-NO-R-5907.5 mit normalem Licht, km 330.145 und b) mit polarisiertem Licht. Hier zeigen sich Merkmale für ein postkinematisches Ereignis in einem semiduktilen Regime mit Kink-Bänder-Bildung im Biotit und Subkorn-Bildung im Quarz. Auffällig sind die Drucklösungsränder von verschiedenen Porphyroblasten (Fotos IMM).

druck der semiduktilen postkinematischen Phase erklärt werden. Dieses Ereignis kann vermutlich als mikrostrukturelles Relikt der Rückfaltung (back-folding) der Ceneri-Zone interpretiert werden.

Der Granat führende Biotitgneis zeigt öfters eine wellige Textur mit einer Schieferung, die sich durch längliche und zum Gefüge parallel orientierte Blasten aus Quarz-, Feldspat-, Biotit- und Epidot-Aggregaten hervorhebt (Fig. 3-5 a, b). Das Gestein ist hauptsächlich durch eine ungleichkörnige und granoblastische Struktur gekennzeichnet, die meistens durch einen höheren Gehalt an felsischen Mineralen in einer mosaikartigen Matrix auffällt. Ein weiteres typisches Merkmal des biotitreichen Ceneri-Paragneises ist die Anordnung von parallel orientiertem Biotit und Epidot, verteilt in einer lepidoblastischen Struktur (Fig. 3-5 a). In den Glimmerlagen sind zahlreiche Granatporphyroblasten oder seltener Staurolith oder Kyanit untergebracht.

Im Gegensatz zum Granat führenden Biotitgneis zeigt der Muskovitschiefer ein ungleichkörniges und granoblastisches Gefüge, das durch Muskovit-Lepidoblasten betont ist und nur gelegentlich ein wenig Biotit und/oder Chlorit mit

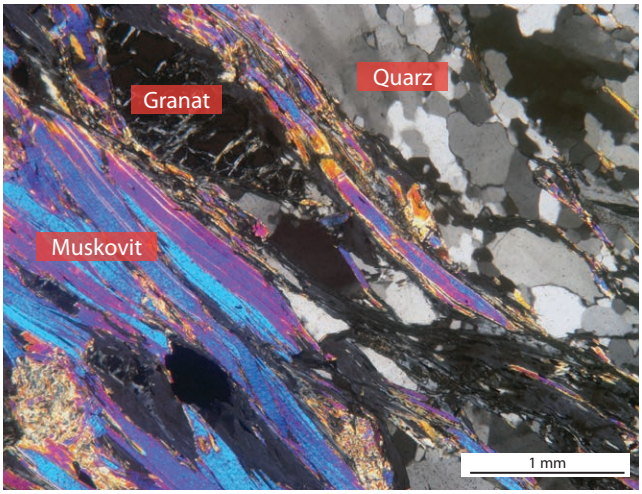


Fig. 3-6: Der Dünnschliff GbC-NE-R-1328.7 aus der Oströhre km 235.054 mit polarisiertem Licht zeigt die typischen S-C'-Strukturen aus sigmoidalen Granatblasten im Muskovit-Gneis (Foto TransGeo).

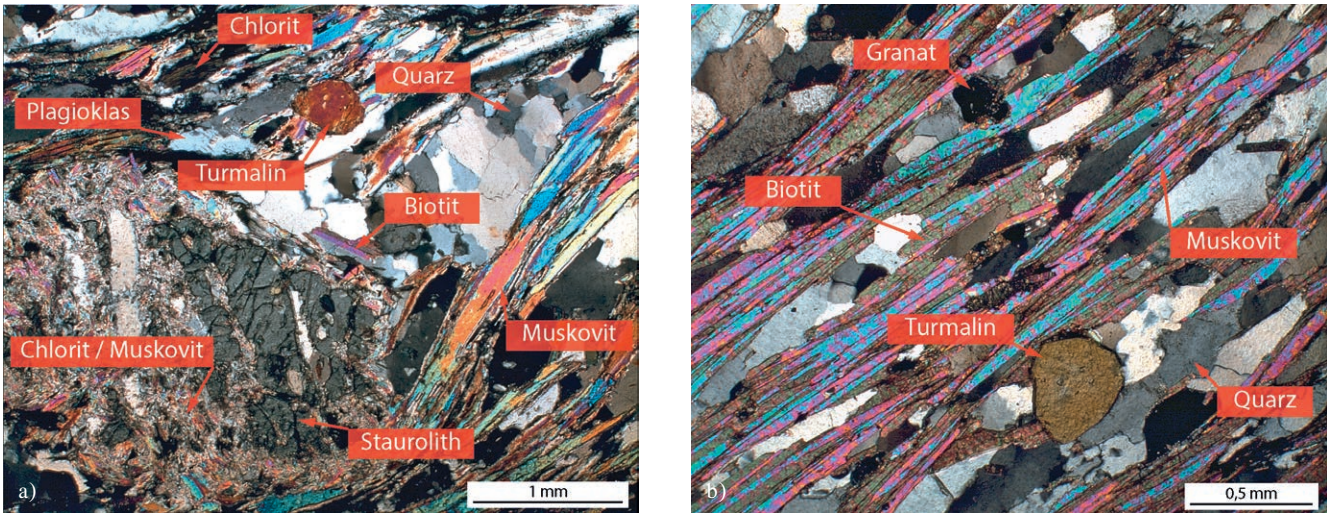


Fig. 3-7: a) Sigmoidaler skelettförmiger Staurolith mit Verformungsschatten im Dünnschliff GbC-NO-SPS-04 Bm 263 Weströhre bei km 332.958, polarisiertes Licht. b) Dünnschliff GbC-NO-R-4429.9 im polarisierten Licht bei km 331.623 zeigt einen Granat und Turmalin führenden Zweiglimmergneis (Fotos IMM).

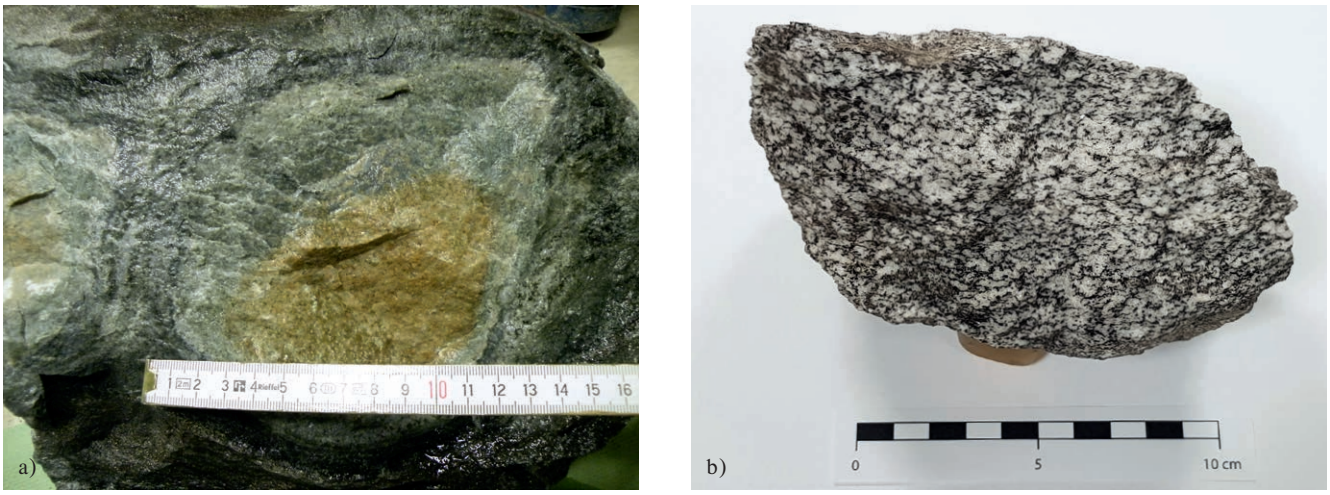


Fig. 3-8: Kalksilikatknauer im Ceneri-Paragneis der Kaverne West in Vigana km 328.102. b) Granitoidlinse im Anschluss Oströhre km 228.257 (Fotos IG ITC).

Bändern aus feinkörnigen Quarzkörnern, Quarz, Plagioklas oder Kalifeldspat enthält. Skelettförmige Granat-, Staurolith- oder Kyanitblasten erzeugen die charakteristischen Verformungsschatten, die Quarz, Plagioklas und Glimmer beherbergen (Fig. 3-7a). Auf diese Weise haben sich S-C'-Strukturen aus sigmoidalen Blasten entwickelt (Fig. 3-6).

Lokal sind Chlorit, Epidot, opake Minerale und reliktische Granat-, Staurolith- oder Kyanit-Aggregate sichtbar.

Der Zweiglimmergneis zeichnet sich durch eine komplexe und ausgeprägte Schieferungstextur aus, die durch die Abfolge von Muskovit-Lepidoblasten, Biotit und Chlorit gebildet wird (Fig. 3-7a). Unter ihnen erscheinen zahlreiche ungleichförmige Kristalle von Quarz, Plagioklas und Feldspat, begleitet von einigen Granat-, Staurolith-, Kyanit oder seltener Turmalinporphyroblasten unterschiedlicher Grösse (Fig. 3-7b). In den schichtsilikatreichen Horizonten sind wiederum S-C'-Strukturen erkennbar. Die Lepidoblasten-Struktur wird durch millimetergrosse, lamellare Kristalle von Muskovit und Biotit betont, die zu gleichen Teilen auftreten und submillimetrische Kornaggregate aus Quarz, Plagioklas und seltener Kalifeldspat trennen. Granat-, Staurolith- oder Kyanitblasten bilden sigmoidale Aggregate mit Verformungsschatten aus Quarz, Plagioklas, Chlorit, Muskovit oder Serizit.

Im Teilabschnitt Vigana gibt es untergeordnet Bereiche, in denen vorwiegend Plagioklas führender Gneis und Schiefer aufgeschlossen ist, der auch Hornblenden enthält. Dieser tritt oft verzahnt mit dem Bänderamphibolit oder Biotit führenden Amphibolitgneis auf. Der kalifeldspatreiche Gneis mit Epidot und Chlorit ist hingegen im Kontakt zum OGC zu finden. In Abschnitten mit schiefrigem PGC sind häufig Kalksilikatknauer oder linsenförmige Granitoid-Körper mit einer Mächtigkeit bis zu 2 m anzutreffen (Fig. 3-8). Weil der Ceneri-Gneis bei der Cima di Medeglia, nach Reinhard (1953) ein granulierter Plagioklas-Biotitgneis, nicht bis auf die Kote des CBT hinunterreicht, konnte nicht geklärt werden, ob die angetroffenen Granitoidlinsen dem Ceneri-Gneis zuzuordnen sind.

3.1.1.2 Ceneri-Orthogneis (OGC)

In der Ceneri-Zone ist der OGC oft mit dem PGC assoziiert und erscheint in der nördlichen Ceneri-Zone, ab der Baulosgrenze zwischen Vigana und Sigirino, verbreitet in einer Serie von einzelnen Körpern mit einer Ausdehnung von wenigen Metern bis hin zu einigen Dekametern. Die grösste Ausdehnung erreichen die OGC-Körper in der mittleren Ceneri-Zone mit einer Streckenlänge von bis zu 970 m. In der Regel ist die Mineralogie des OGC innerhalb eines Körpers homogen, in wenigen Aufschlüssen sind etwas leukokratere Randbereiche zu erkennen. Vier Lithotypen können anhand der makroskopischen Beschreibung und der mineralogischen Zusammensetzung unterschieden werden:

- Zweiglimmergneis
- Chlorit- und Epidot führender Zweiglimmergneis
- Leukokrater Muskovit führender Zweiglimmergneis
- Biotit, Hornblende und Epidot führender Gneis

Das Hauptvorkommen ist vertreten durch den «klassischen» Lithotyp, der massig, teils streifig, gebändert ist, oder mit einer flaserigen Textur versehen ist und auffällig viele Klüfte mit chloritisierten Randzonen enthält. Wegen der Koexistenz von OGC und PGC liess sich der OGC makroskopisch anhand der Textur oder Mineralogie im Vortrieb nicht immer eindeutig vom PGC unterscheiden. Oft musste zusätzlich als weiteres Kriterium, wie z.B. das Aussehen oder das Erscheinen der Ausbruchsfläche an der Ortsbrust, verwendet werden. Ein hilfreiches Merkmal, um diesen Lithotypen von den anderen zu unterscheiden, war die veilchenblau schimmernden Farbe der Gesteinsoberläche. Im Gegensatz zum mineralogisch ähnlichen PGC, gestaltete sich Ausbruchsfläche im Tunnelprofil beim OGC eher glatt und neigte zu Entspannungsschlägen (Kap. 10.2.3) oder Abschalungen vorwiegend im Kämpferbereich.

Der Zweiglimmergneis, ein granitoidähnlicher Gneis, hat meistens eine massige (Fig. 3-9a), lokal augige, streifige oder flaserige Textur (Fig. 3-9b). Obwohl er ähnliche petrographische Eigenschaften wie der Ceneri-Gneis (Reinhard 1953) zeigt, ist er ihm nicht gleichzustellen. An der Ortsbrust ist eine sichtliche Schieferung ausgeprägt, in der häufig S-C'-Strukturen ersichtlich sind (Fig. 3-9b). Im Allgemeinen ist der Zweiglimmergneis fein- bis mittelkörnig (0,1–1,0 mm), während der «flaserige» Zweiglimmergneis zwischen mittel- bis sehr grobkörnig (1,0–33 mm) variiert. Makroskopisch ist dieser Lithotyp nur schwer von einem Biotitgneis der Ceneri-Paragneise zu unterscheiden. Als Ausschlusskri-

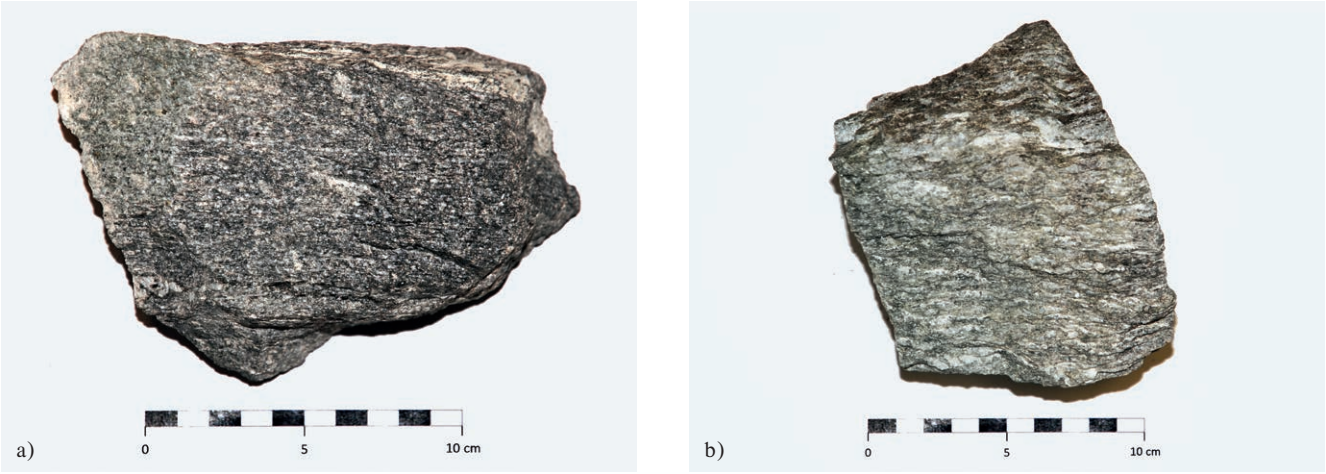


Fig. 3-9: a) Zweiglimmergneis in der Weströhre km 335.102. b) Zweiglimmergneis mit flaseriger Textur in der Weströhre km 333.913 (Fotos IG ITC).

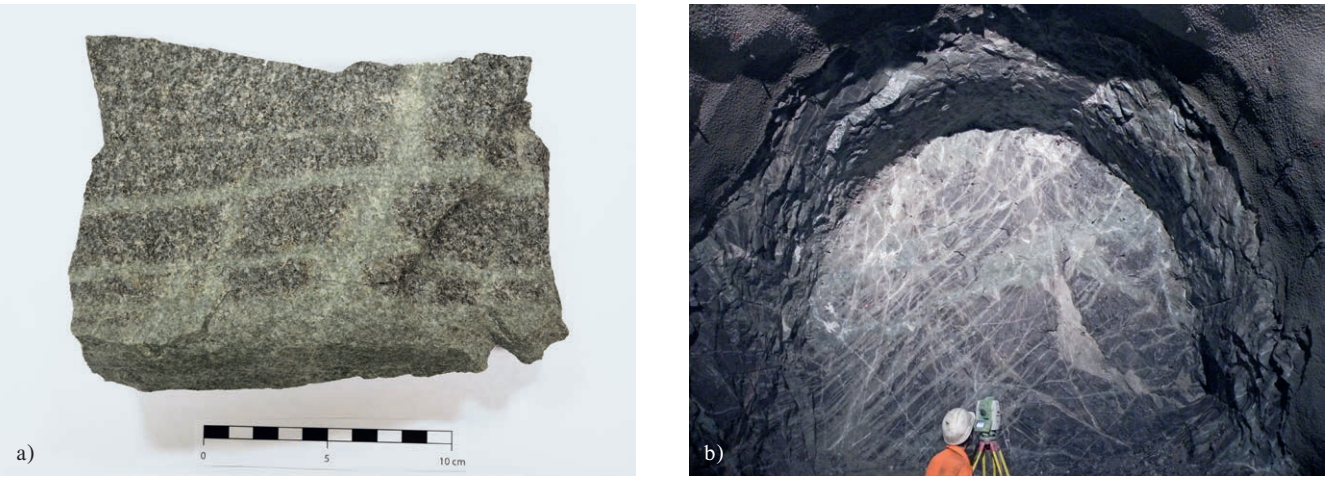


Fig. 3-10: a) Zweiglimmergneis mit mineralisierten Klüften im Handstück in der Oströhre km 232.356 und b) in der Ortsbrust bei gleichem Vortriebsstand (Fotos IG ITC).

terien helfen dabei Granat, Kyanit, Staurolith und Turmalin, die für die Ceneri-Paragneise typisch sind.

Die Farbe des Gesteins variiert von grau bis grün, je nach Chloritgehalt und dem Verhältnis zwischen Biotit und Muskovit. Der klassische Lithotyp enthält charakteristische Klüfte, mineralisiert mit felsischen Mineralen (Quarz, Feldspat), Eisenmineralen (Pyrit, Hämatit) sowie Chlorit und Karbonaten (Dolomit, Ankerit), die an den Rändern grünlich bis gelblich gefärbte Säume aufweisen.

Die mikroskopische Untersuchung des Zweiglimmergneises zeigt eine relativ geringe mineralogische Vielfalt, die immer durch dieselben Komponenten wie Quarz, Feldspat, Plagioklas, Muskovit und Biotit gekennzeichnet ist, wobei das letzte Mineral in einigen untersuchten Proben nur akzessorisch auftritt.

Das Gestein zeigt eine Textur aus quarz und feldspatreichen Lagen, die, abwechselnd mit dünnen Glimmerlagen, eine Foliation akzentuieren. Die Mikrostruktur des «klassischen» Lithotyps ist äquigranular und feinkörniger (0,1–0,4 mm), während im streifigen oder flaserigen Zweiglimmergneis Quarz- und Feldspataggregate Korngrössen bis 8 mm erreichen.

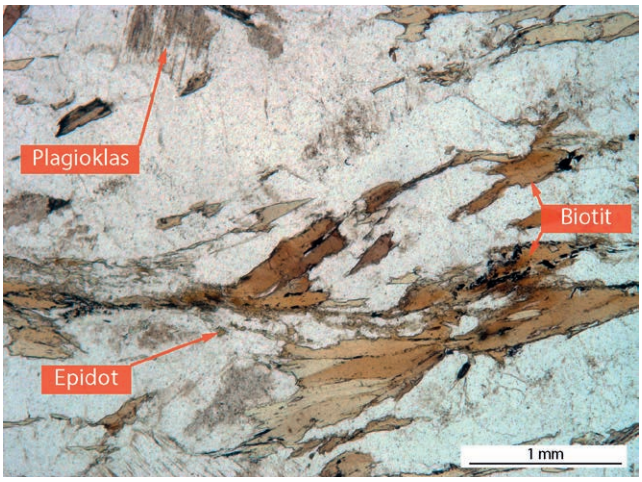


Fig. 3-11: Dünnschliffaufnahme mit normalem Licht des im CBT weit verbreiteten «klassischen» Ceneri-Orthogneises (Zweiglimmergneis). Handstück GbC-NO-R-862.7 aus der Oströhre bei km 335.190 (Foto TransGeo).

Der Serizitisierungsgrad von Kalifeldspat und Plagioklas ist ein Indikator für die Menge an zirkulierenden Fluiden entlang der Kluftsysteme (s. dazu Chloritisierungsgrad im nächsten Abschnitt).

Der Chlorit und Epidot führende Zweiglimmergneis ist dem Zweiglimmergneis sehr ähnlich, zeigt aber einen deutlich höheren Gehalt von Chlorit und Epidot, nicht nur entlang von Klüften, sondern auch in der Gesteinsmatrix (Fig. 3-12). Dieser Lithotyp ist an seiner massigen Textur und den häufig mit Chlorit mineralisierten Zonen leicht an der Ortsbrust identifizierbar.

Die Hauptkomponenten sind Quarz, Kalifeldspat und Albit in Form von grossen Aggregaten, gebildet aus Subkörnern mit einer Grösse bis 5 mm. Die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie (XRD) zeigen, dass in allen analysierten Proben Plagioklas häufiger als Kalifeldspat vorkommt. Gelegentlich können in der Matrix in Abhängigkeit des Gesteinschemismus akzessorisch feine Granatporphyroblasten auftreten (Fig. 3-13 a), was für S-Typ-Granite nicht ungewöhnlich ist.

Bis 2,0 mm grosse Epidotkristalle mit xenomorphem, isometrischem und tabularem Habitus (Fig. 3-13 b) sind mehrheitlich entlang der Foliation zu finden und scheinen mit Biotit assoziiert zu sein.

Chlorit ist oft Produkt retrograder Umwandlung von Biotit und befindet sich als feine idiomorphe Lamellen an den ausgefransten Rändern des Biotits. Weiter häuft sich Chlorit in den serizitisierten Feldspäten.

Zur im CBT angetroffenen Granitoid-Serie zählt auch der leukokrate, Muskovit führende Zweiglimmergneis. Sehr wahrscheinlich stellt dieser Gesteinstyp ursprünglich die stärkste Differenzierung der Gesteinsschmelze dar. Er ist an seiner massigen Textur und hellen Farbe leicht von allen anderen Lithologien zu unterscheiden und beinhaltet (Fig. 3-14) vorwiegend Quarz, Kalifeldspat und Plagioklas mit wenig Biotit oder Muskovit, verteilt entlang der Foliation. Die grössten Vorkommen dieses Lithotyps sind im Homogenbereich 22 zu finden, während untergeordnet in wenigen Ceneri-Orthogneis-Aufschlüssen weiter in der nördlichen Ceneri-Zone vereinzelt linsenförmiger leukokrater Zweiglimmergneis erscheint. Gelegentlich waren nester-

Fig. 3-12: a) Zweiglimmergneis mit Chlorit und Epidot in der Weströhre km 329.620 und b) in der Ortsbrust der gleichen Tunnelröhre bei km 329.607 (Fotos IG ITC).

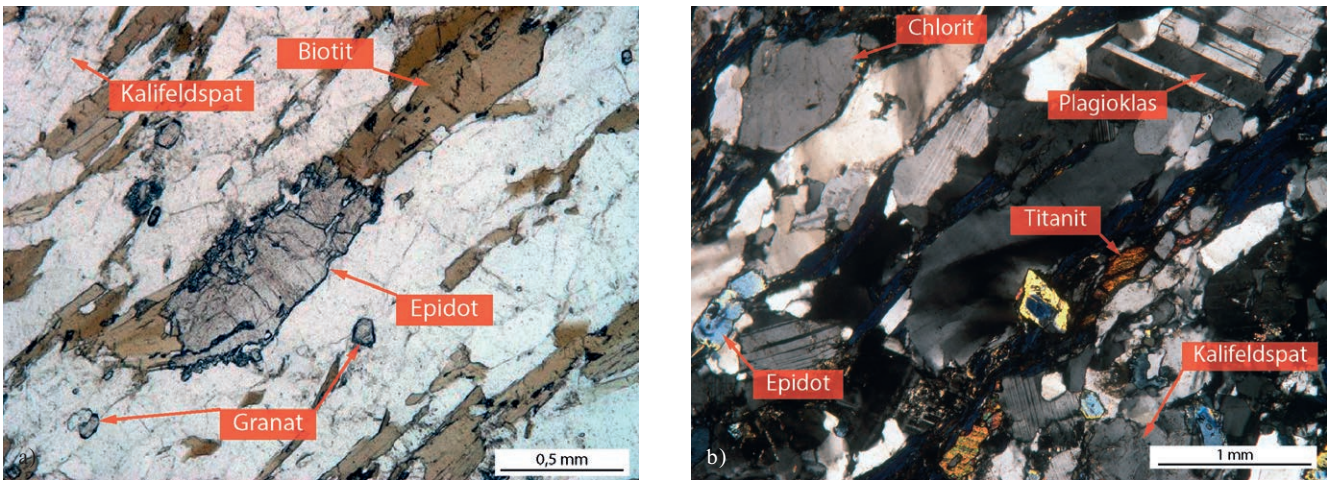


Fig. 3-13: a) Akzessorischer Granat im Handstück GbC-NO-R-5964 bei km 330.089 im Zweiglimmergneis. Dünnschliffaufnahme mit normalem Licht (Foto TransGeo), b) Die mikroskopische Aufnahme mit polarisiertem Licht zeigt Epidot und Titanit im Dünnschliff GbC-NO-R-6433 bei km 329.620 (Foto TransGeo).

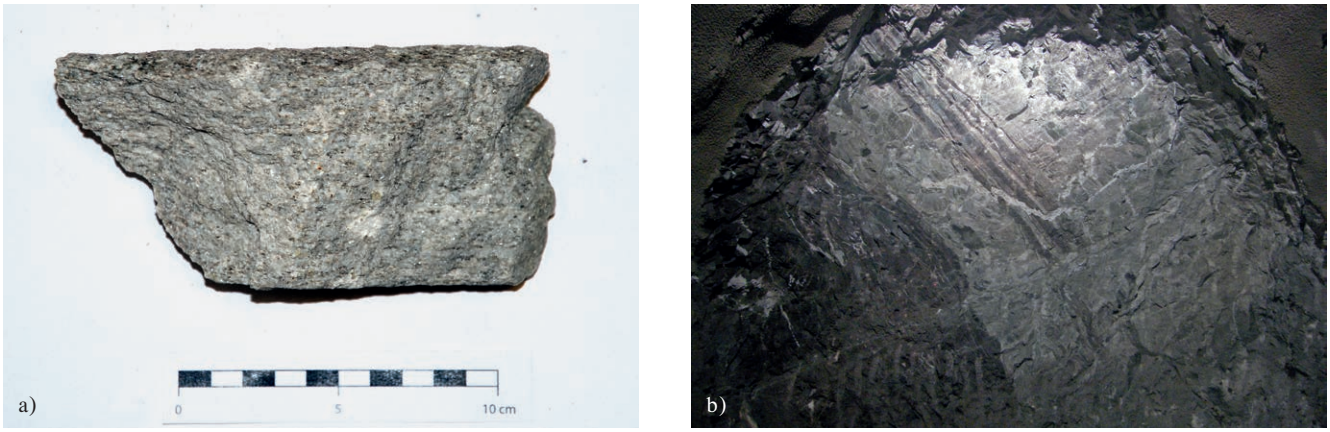


Fig. 3-14: a) Leukokrater Zweiglimmergneis im Handstück und b) in der Ortsbrust der Oströhre km 235.188. Der leukokrate Zweiglimmergneis steht im Kontakt zum Ceneri-Paragneis (dunkelgrau links) (Fotos IG ITC).

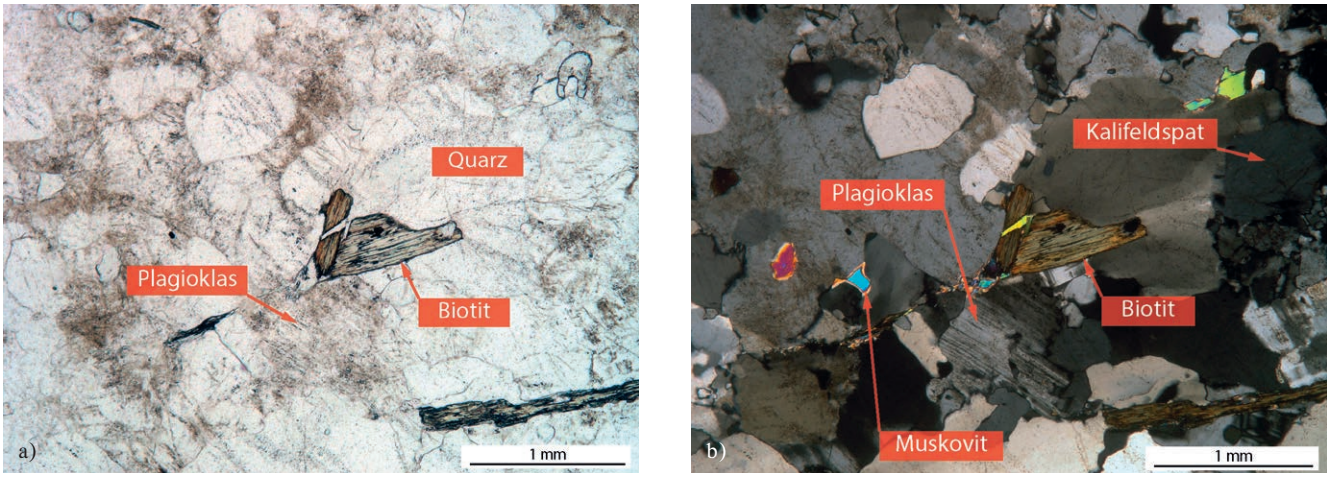


Fig. 3-15: a) Handstück GbC-NE-R-1195 in der Weströhre km 235.188, entspricht dem leukokraten Zweiglimmergneis des Homogenbereichs 20. Dünnschliffaufnahme mit normalem und b) polarisiertem Licht (Fotos TransGeo).

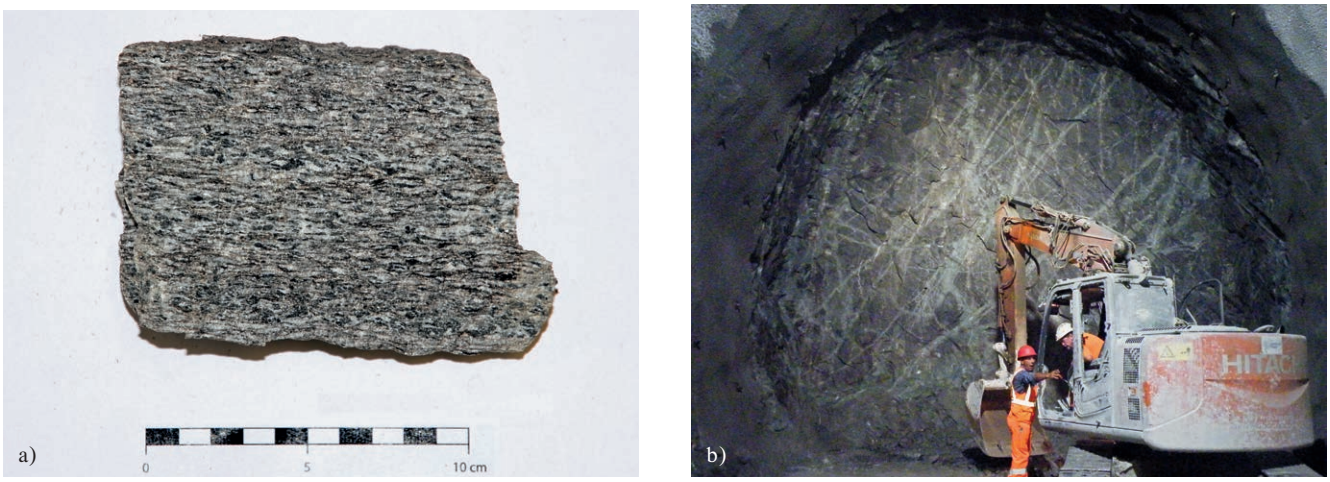


Fig. 3-16: a) Handstück GbC-NO-R-3864,7 in der Weströhre km 323.188, entspricht dem leukokraten Zweiglimmergneis des Homogenbereichs 20. b) Repräsentative Ortsbrust bei km 332.179 (Fotos IG ITC).

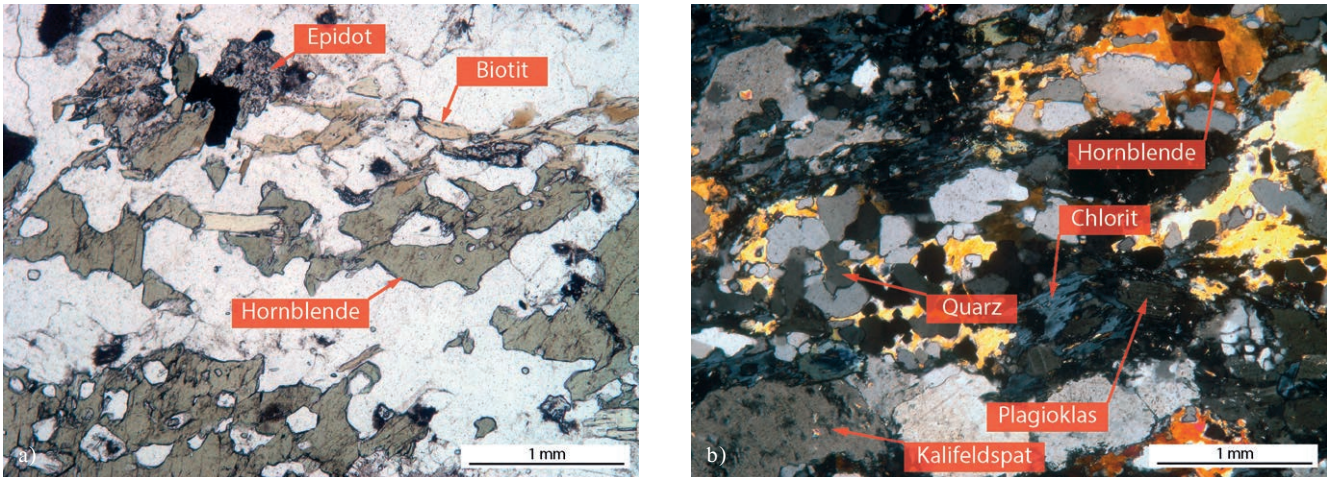


Fig. 3-17: a) Dünnschliffaufnahme des Handstücks GbC-NO-R-3864.7 in der Weströhre km 332.188 aufgenommen mit normalem Licht. b) Dünnschliffaufnahme mit polarisiertem Licht zeigt das Handstück GbC-NE-R-4345 bei km 232.038 in der Oströhre (Fotos TransGeo).

förmige Ansammlungen von Erzmineralen wie Pyrit und Hämatit bereits an der Ortsbrust sichtbar.

Der Biotit, Hornblende und Epidot führende Gneis ähnelt einem Granitgneis und ist an seiner massigen Textur (Fig. 3-16) zu erkennen, die eine mittlere Körnung mit grobkörnigen Hornblenden, umrandet von Biotit, aufweist, die in den gewellten Schieferungsebenen leicht zu erkennen sind.

Durch ihre Leitminerale lässt er sich makroskopisch vom Zweiglimmergneis unterscheiden. Die zahlreichen Kluftscharen-Flächen sind mit Kalzit, Chlorit und Epidot belegt, was dem Gestein mit schlieriger violettlicher Hintergrundfarbe grünlich gefärbte Streifen entlang der Klüfte verleiht.

Makroskopisch lassen sich die Hauptminerale Quarz, Kalifeldspat, Plagioklas, Hornblende und Biotit erkennen, akzessorisch und nur mikroskopisch erkennbar enthält der Hornblende führende Biotitgneis Apatit, Kalzit, Rutil, Titanit, Zirkon und opake Minerale, wobei die letzteren häufig in Form von Pyrit oder Hämatit entlang von Klüften zu beobachten sind.

Die gneisige Textur ist gekennzeichnet durch ungleichkörnige und lepidoblastische Mineralkörner, begleitet von hornblende- und biotitreichen Lagen, die abwechslungsweise Quarz- und Feldspat ablösen (Fig. 3-17). Epidot mit tafeligem, z.T. auch hypidiomorphem Habitus kommt verstreut in der Matrix vor. Feinkörniger Serizit und Kalzit in Form von unregelmässigen Kornaggregaten ersetzten vermutlich pseudomorph Kalifeldspat. Die Korngrössen liegen im Bereich von fein- bis mittelkörnig (0,01–3,0 mm).

Die Hauptkomponenten Albit und Kalifeldspat haben xenomorphe Habiten. Plagioklas überwiegt modalmässig Kalifeldspat mit perthitischer Struktur. Albit ist leicht an seinen polysynthetischen Zwillingen zu erkennen.

Hornblenden mit prismatischen unregelmässigen Korngrenzen beinhalten oft Quarzeinschlüsse und bilden, verwachsen mit verfransten lamellenförmigen Biotitkörnern, die typischen dunklen Lagen des Gesteins.

3.1.1.3 Hornfels (GCornub)

Der Hornfels umfasst feinkörnigen Biotit führende Gneismit Muskovit, der oft chloritreich ist und in den Homogenbereichen 11, 15Bbis und 15C vorkommt. Dieses mas-

Fig. 3-18: a) Feinkörniger Biotitgneis des Hornfels-Formation b) entnommen in der Ortsbrust der Weströhre bei km 333.586 (Fotos IG ITC).

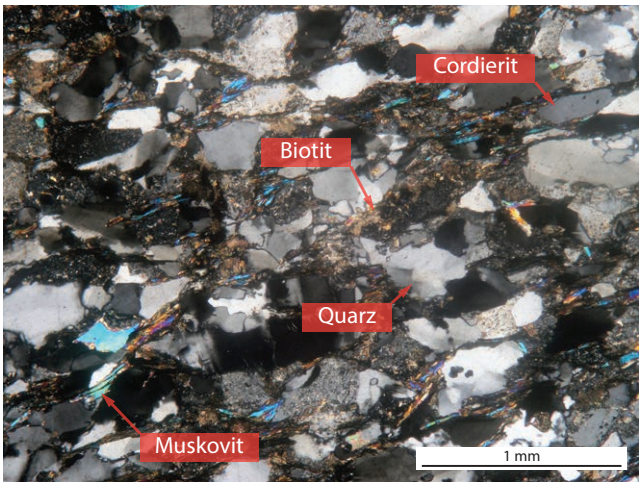


Fig. 3-19: Dünnschliffaufnahme mit polarisiertem Licht zeigt Cordierit in der Probe G195-852NO2449 in der Weströhre bei km 333.604 (Foto IG ITC).

sige Gestein, welches in bräunlicher Farbe mit violettem Schimmer erscheint (Fig. 3-18) ist identisch mit den angetroffenen Hornfelsen aus den Erkundungsstollen CPS und des FIS. Nach dem geologisch-tektonischen Befundmodell des CBT sind die Hornfelse hauptsächlich mit der intensiv tektonisierten Zone im Homogenbereich 15 Bbis assoziiert, erscheinen aber auch als Meter- bis Dekametergrosse Körper innerhalb des Ceneri-Paragneises in den Homogenbereichen 15Bbis und 15C bei km 233.173–233.597 und im Kontakt zwischen Ceneri-Orthogneis und Ceneri-Paragneis im Homogenbereich 11 bei km 231.790–231.803.

Die Kriterien zur Unterscheidung zwischen Hornfelsen im engeren Sinn und Ceneri-Paragneis sind die gleichkörnigen Minerale mit Korngrössen, welche im Hornfels deutlich feiner sind, und die temperaturbetonten Leitminerale, wie Cordierit oder Sillimanit. Die Mehrzahl dieser im Dünnschliff untersuchten Gesteinsproben liefern wegen fehlendem Cordierit oder Sillimanit keine eindeutigen Hinweise auf kontaktmetamorphe Bedingungen. Die Proben in der Weströhre bei km 333.604 (Fig. 3-19) und die Gesteinsprobe FIS-R-1523 sind die einzigen Hornfelsproben, die Cordierit enthalten. Sie liegen zusammen mit der Hornfels-Formation im CPS bei Tm 1900 in gleicher tektonischer Position.

Das Fehlen von Cordierit in einigen Gesteinsproben könnte auf dynamische Rekristallisation zurückzuführen sein, die in duktiler Umgebung bei gerichteter Verformung die Mineralparagenesen einer vorherigen Kontaktmetamorphose vollständig löschte. Typische Hinweise für dynamische Rekristallisation sind die Bildung von sigmoidalen Mineralaggregaten sowie die Reduktion von Mineralkorngrössen, sichtbar insbesondere bei Quarz und Plagioklas.

Das Gestein weist eine granoblastische Textur auf, charakterisiert durch eine massige Matrix mit ungleichkörnigen Quarzen und Plagioklasen (Fig. 3-20).

Lamellenförmiger Biotit und Muskovit sind so ausgerichtet, dass sie dünne, diskontinuierliche Schichten bilden, die eine Foliation kennzeichnen.

Glimmerminerale schieben sich diskordant zwischen Quarz- und Feldspataggregate und formen dünne Lagen. Die rundlichen Quarzaggregate mit unregelmässigen Korngrenzen zeigen undulierende Auslöschung im polarisierten Licht.

3.1.1.4 Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone (B-UBC)

Der Befund beim Vortrieb veranschaulicht, dass die metabasischen Gesteine der Ceneri-Zone mit dem Ceneri-Paragneis assoziiert sind und im Tunnel in zwei Bereichen auftreten, nämlich beim Nordportal in Vigana und im B-UBC-Hauptkomplex der mittleren Ceneri-Zone. Die Metabasite in Vigana sind vertreten durch zentimetermächtige bis mehrere Meter mächtige, Amphibol führende Horizonte, oft ausgebildet in Form von Bänderamphibolit oder Amphibol führendem Biotitgneis, zwischengelagert im Gestein des Ceneri-Paragneises mit felsischen Mineralen (Fig. 3-21a, b).

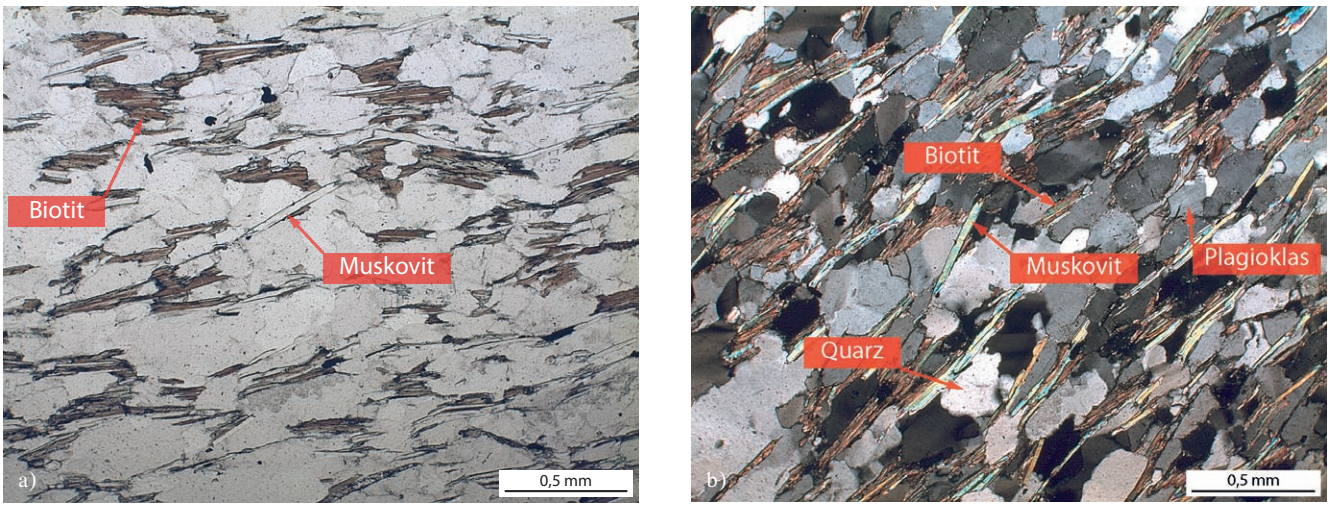


Fig. 3-20: a) Feinkörniger Zweiglimmergneis des Handstücks GbC-NO-R2466.7 bei km 333.586 in der Dünnschliffaufnahme mit normalem Licht und b) mit polarisiertem Licht (Fotos IMM).

Weiter südlich in der nördlichen Ceneri-Zone sind die Aufschlüsse mit Gneisen basischer Zusammensetzung seltener, und häufig sind ihre Grenzen zum Ceneri-Paragneis verwischt und deshalb im Tunnel nur schlecht erkennbar. Oftmals konnten die geringen Amphibolgehalte im Ceneri-Paragneis nur mit optischen Hilfsmitteln wie dem Binokular- oder Polarisationsmikroskop sicher diagnostiziert werden.

Die metabasischen Gesteine in der mittleren Ceneri-Zone sind mit Ausnahme von mehreren basischen Gängen ausschliesslich im Homogenbereich 20 der den beiden Tunnelröhren und in den beiden Nebenbauwerken CPS und FIS aufgeschlossen. Diese erscheinen in Form von Horizonten oder Körpern mit einer Ausdehnung von einigen Metern bis mehreren Dekametern, umgeben von Ceneri-Paragneis, welcher an dieser Stelle überwiegend aus Biotitgneis oder Granat führendem Glimmerschiefer besteht (Fig. 3-21).

Die lithologischen Grenzen des metabasischen Gesteinskomplexes stehen in der Regel leicht diskordant zu den benachbarten Lithologien und werden von transversalen Scherzonen oder Störungen mit einem Betrag von wenigen Zentimetern bis einigen Dekametern in dextraler Richtung versetzt (s. geologisch-bautechnisches Längenprofil Taf. I). Die Südgrenze zwischen B-UBC und Ceneri-Paragneis wurde mit der Kernbohrung GbC-NO-SPS-01 im Rahmen des Erkundungskonzeptes im «Subparallelismus» im Nordvortrieb von Sigirino aus ermittelt.

Die ultrabasischen Gesteine, welche in der Prognosekernbohrung CB84 aufgeschlossen wurden, erreichen das Tunnelniveau des CBT nicht.

Die metabasischen Gänge, die beim Nordvortrieb in Sigirino angetroffen wurden, sind weiter unten beschrieben.

Amphibol führender Gneis und Bänderamphibolit

Als Bänderamphibolit sind Gesteine zusammengefasst, die eine millimeter- bis mehrere zentimeterdicke Bänderung aufweisen, die von einer Wechsellagerung von Amphibol führenden Bereichen und felsischen Mineralen herrührt. Der Protolith (Ursprungsgestein) wurde durch simultane vulkanoklastische Aktivität (Ceneri-Basite) und marine Sedimentation (Ceneri-Paragneis) erzeugt (Fig. 3-22 a). Häufig können im felsischen Bereich Leptinit-Lagen beobachtet werden (Fig. 3-22 a–c). Die mineralogische Zusammensetzung variiert innerhalb der einzelnen Bänder. Während die felsischen Bänder überwiegend Quarz und Muskovit enthalten, bestehen die basischen Bänder aus gemeiner Hornblende und/oder Aktinolith-Tremolit-Mischkristallen (Kap. 6.2.3, Fig. 3-21 f), Plagioklas, Epidot und Chlorit. Die auffälligen gelblichen bis grünlichen Klüfte in den Amphibol führenden Gneisen und Bänderamphiboliten enthalten Quarz, Kalzit, Dolomit und Epidot (Fig. 3-22 b).

Die Hornblenden bilden ein Mikrogefüge entlang der Foliation der Metabasite durch eingeregelte, idiomorphe und prismatische Kristalle mit unregelmässigen Korngrenzen, welche durch faserige Tremolit-Aktinolith-Kristalle ersetzt sind. Tremolit-Aktinolith-Fasern sind ebenfalls in den Rissen der Hornblenden kristallisiert (Fig. 3-22 d). Sigmaförmige präkinematische Hornblendeaggregate, in dessen Verformungsschatten Biotit, Muskovit, Albit, Quarz und Chlorit kristallisiert sind, deuten auf eine synkinematische Phase mit Bildung von Drucklösungsrändern und gleichzeitigem Wachstum von Biotit und Aktinolith-Tremolit-Mischkristallen in einem duktilen Umfeld (Fig. 3-22 e, f).

Albit ist erkennbar durch einen subidiomorphen und prismatischen Habitus, häufig polysynthetisch verzwillingt und tritt verstreut innerhalb von Hornblendeaggregaten, an Korngrenzen, in Druckschatten oder assoziiert mit Quarz in den felsischen Bändern auf.

Quarz ist meistens in Form von xenomorphen Mineralaggregaten mit Subkörnern rekristallisiert und befindet sich vorwiegend in den hellen Bändern, in Verformungsschatten und in der Matrix im Bereich von basischen, Amphibol führenden Bändern.

Lamellenförmiger Chlorit mit ausgefransten Korngrenzen ist zusammen mit Epidot und Klinozoisit in der Gesteinsmatrix auf oder in Verformungsschatten als Rekristallisationsprodukt von Hornblende oder Plagioklas sichtbar.

Die Gesteinsmatrix wird ergänzt durch opake Minerale, welche grösstenteils durch Titanit vertreten sind.

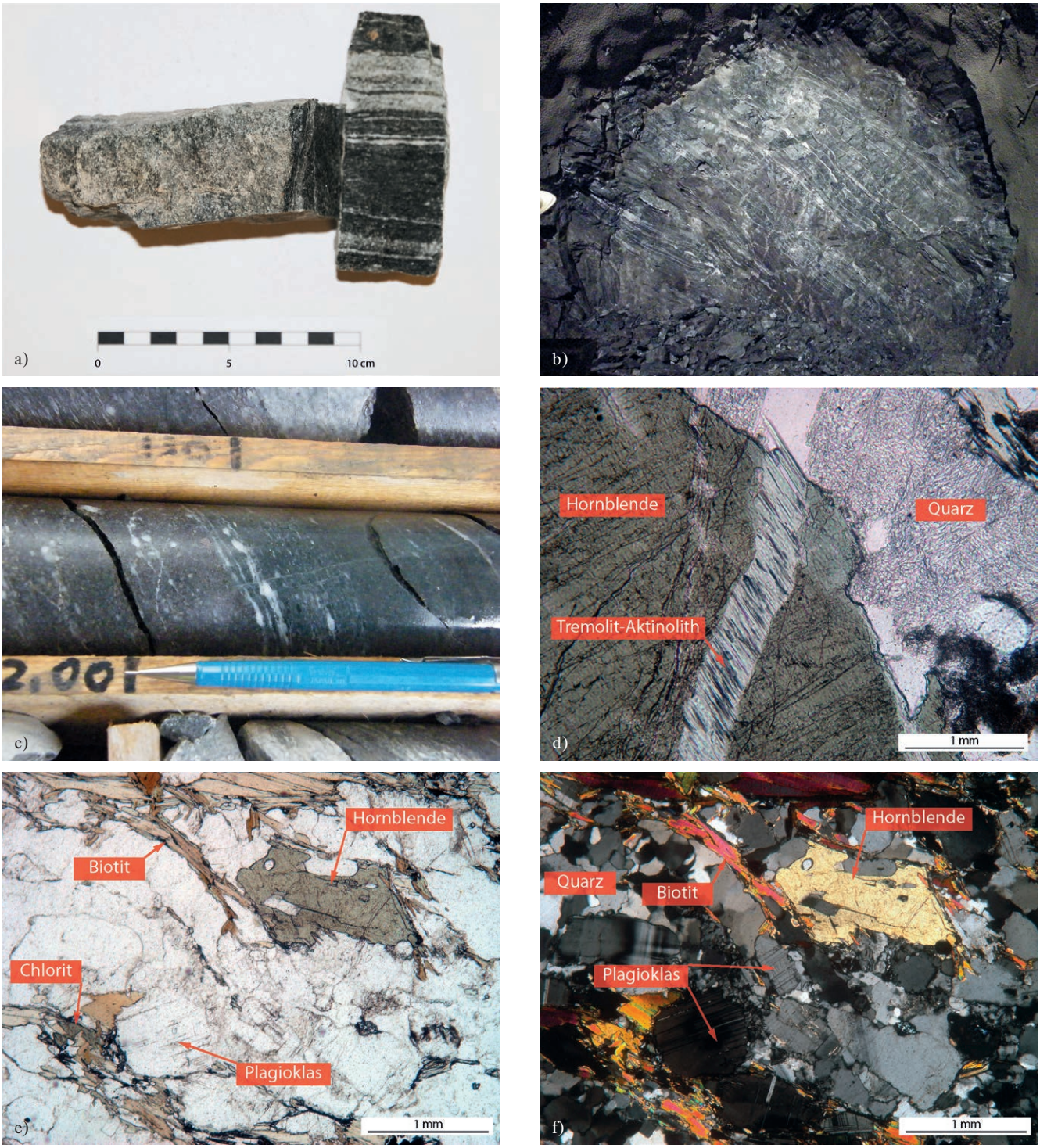


Fig. 3-21: a) Bänderamphibolit mit leptitischen Lagen aus der Oströhre bei km 234.906. b) Petrographischer Kontakt zwischen Amphibol führendem Gneis (B-UBC) und Zweiglimmergneis (PGC) auf Skala Ortsbrust bei km 234.906. c) Amphibolit führender Gneis mit leptitischen Bändern aus der Kernbohrung GbC-NO-SPS-01 bei Bm 130. Diese Kernprobe zeigt im Detail den lithologischen Kontakt zwischen Ceneri-Paragneis mit bräunlicher Farbe und Amphibol führendem Gneis mit dunkelgrüner Farbe. d) Faseriger Tremolit-Aktinolith-Mischkristall ersetzt Hornblende in einer Ader, Dünnschliffaufnahme GbC-NO-R-3708 (km 332.345) mit normalem Licht. e) Beispiel einer dynamischen Rekristallisation in der Dünnschliffaufnahme GbC-NE-R-4275 (km 232.108) mit normalem Licht und f) polarisiertem Licht. (Fotos a–c: IG ITC, Fotos d–f: IMM).

Metabasische Gänge (FBC)

Beim Vortrieb wurden zwischen Val d'Isone und dem basischen und ultrabasischen Gesteinskomplex mehrere, bis zu zwei Meter mächtige, metabasische Gänge, bestehend aus Augit oder Hornblende führendem Spessartit angetroffen, die diskordant zum Ceneri-Orthogneis und Ceneri-Paragneis verlaufen (Tab. 3-2 und Taf. I). Der metabasische Gang bei Val d'Isone (km 230.825) kann mit den Befunden der Kernbohrungen CB86 und CB86bis korreliert werden.

Fig. 3-22: Steil stehender metabasischer Gang bei km 233.308 schneidet im rechten Kämpferbereich die Schieferung des Ceneri-Paragneis diskordant (Foto IG ITC).

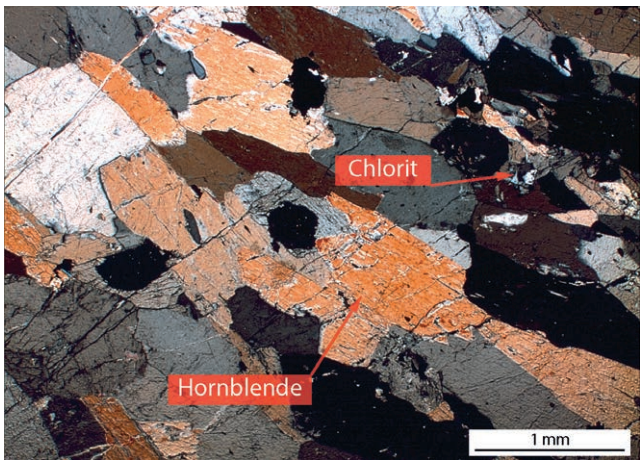


Fig. 3-23: Hornblende führender Spessartit in der Dünnschliffaufnahme mit polarisiertem Licht (Handstück GbC-NO-R-3407.5 bei km 332.645) (Foto IMM).

Tab. 3-2: *Beschreibung und Korrelation derangetroffenen metabasischen Gänge im CBT.*

Lithologie	Oströhre [km]	Weströhre [km]	HB
Augit führender Spessartit	233.301	–	14
Hornblende führender Spessartit	232.598	332.618	13A
Augit führender und Hornblende führender Spessartit	230.825	330.788	10B

An der Ortsbrust ist dieses Gestein leicht an seiner massigen, feinkörnigen und dunkelgrünen Textur zu erkennen, welche oft durch zahlreiche Klüfte mit Harnischen durchtrennt ist. Die Harnischflächen sind belegt mit Kalzit, Epidot oder Chlorit. Auffällig sind grössere Plagioklasporphyroblasten, die sich deutlich aus der Matrix hervorheben. Im Spessartit-Gang lassen sich zudem metasomatische Randzonen beobachten.

Die Textur ist durch grosse Hornblende- oder z.T. reliktische Klinopyroxenklasten gekennzeichnet, die von einer feinkörnigen Matrix aus Plagioklas, Chlorit und zahlreichen opaken Mineralen umgeben sind. Hornblenden und Klinopyroxene können in einigen Dünnschliffbereichen gehäuft vorkommen (Fig. 3-23). In einigen Dünnschliffen beschreiben die mittel- bis grosskörnigen Klinopyroxenkristalle einen prismatischen Habitus und sind oft stark umgewandelt (alteriert) oder vollständig durch Chloritaggregate ersetzt. Chlorit ersetzt ebenfalls Klinopyroxen in zahlreichen Adern.

Die grösseren subidiomorphen Plagioklase sind durch eine mässig starke Alteration gekennzeichnet und haben einen prismatischen Habitus mit häufigen, einfachen Zwillingen.

3.1.2 Südliche Ceneri-Zone

In der südlichen Ceneri-Zone, die zwischen den Homogenbereichen 26 Bbis und 28C liegt, ist ausschliesslich Giumello-Gneis aufgeschlossen. Diese Gesteinsformation, welche im CBT nur in dieser tektonischen Einheit vorkommt, durchquert unter anderem auch die CAOP, den FIS und CPS.

3.1.2.1 Giumello-Gneis (GGium)

Die westliche Grenze des Giumello-Gneises verläuft vom CPS bei Tm 2400 weiter durch den FIS bei Tm 2060. Beim Vortrieb Baulos Sirigino erscheint dieser ab km 235.322 und endet an der Val-Colla-Linie bei km 237.364. Der Giumello-Gneis setzt sich aus zwei Lithotypen zusammen: Granat führender Zweiglimmergneis (Fig. 3-24) und Granat-Staurolith-Kyanit führender Glimmerschiefer. Aufgrund der unterschiedlichen Kompetenz beider Lithotypen und der Abfolge von unregelmässig dicken Lagen zwischen quarzreichem Zweiglimmergneis und Glimmerschiefer, erhält der Giumello-Gneis oft ein «flyschähnliches» Aussehen und zeugen von einer Herkunft pellitischer Sedimente (Zurbriggen 2015). Die Dicke der Gesteinslagen variiert zwischen Zenti- und Dekametern. Oft sind graduelle Übergänge in Abhängigkeit der mineralogischen Zusammensetzung anzutreffen, was hauptsächlich auf das Verhältnis zwischen Quarz und Phyllosilikaten zurückzuführen ist. Zwei typische Merkmale, die den Giumello-Gneis vom Ceneri-Paragneis unterscheiden, sind die zahlreichen sigmaförmigen Quarzadern, die parallel zur Schieferung eingeregelt sind und der deutlich höhere Gehalt an Phyllosilikaten, der in der Textur des Gesteins zusammen mit Granatporphyroblasten oft zentimetergrosse rostigbraune «Glimmernester» bildet. Der Glimmergehalt, der das Mikrogefüge des Giumello-Gneises steuert, beeinflusst gleichzeitig auch das geomechanische Verhalten des Gesteins und hat deshalb in Hinsicht auf die bautechnische Relevanz einen bedeutenden Einfluss im «Subparallelismus» (Kap. 9-11).

Granat führender Zweiglimmergneis

Das Gefüge des Granat führenden Zweiglimmergneises zeigt in der Regel eine granoblastische Matrix mit ungleichkörniger Korngrössenverteilung der Mineralaggregate, die aus fein- bis kleinkörnigen Quarz- und Plagioklaskristallen (0,1–1,0 mm) bestehen. Die rekristallisierten Quarzkör-

Fig. 3-24: a) Granat führender Zweiglimmergneis Handstück GbC-SE-R-623, z.T. krenuliert und entnommen b) an der Ortsbrust der Oströhre bei km 237.006 (Fotos IG ITC).

ner geben Hinweise auf eine dynamische Rekristallisation. Biotit und Muskovit mit nadelförmigem Habitus und ausgefranster Korngrenze akzentuieren die Hauptschieferung.

Die Phyllosilikate liegen auch oft in submillimeterdicken Schichten parallel zur Hauptschieferung, die sich mit quarz- und feldspatreichen Schichten abwechseln.

Quarz und – weniger ausgeprägt – Feldspat veranschaulichen eine intensive dynamische Rekristallisation, gekennzeichnet durch Kornverkleinerung, Korngrenzenwanderung oder Subkornbildung (Fig. 3-25). Porphyroblastischer Plagioklas hat selten auch postkinematisch andere Minerale überwachsen. Granate erscheinen in zwei Generationen: präkinematische Porphyroblasten und postkinematischer Granat. Präkinematische Porphyroblasten sind gerundet, lokal stark resorbiert und zerbrochen und haben zahlreiche Einschlüsse aus Quarz, Feldspat und Glimmer. Postkinematischer Granat ist später entstanden. Das Gestein hat allgemein eine dominante und penetrative Schieferung, gegeben durch die Orientierung von Glimmer und Quarz sowie leicht

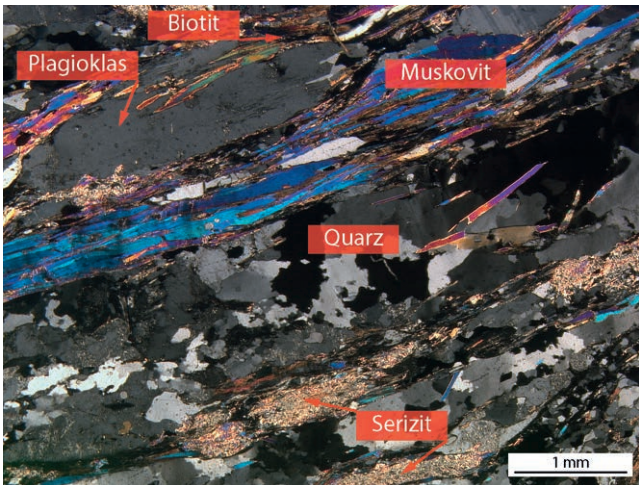


Fig. 3-25: Abfolge von granoblastischen Lagen, in denen der Quarz Anzeichen einer dynamischen Rekristallisation zeigt, und lepidoblastischen Lagen mit Biotit und Muskovit, welche die Hauptschieferung markieren. Dünnschliffaufnahme GbC-NO-R-139 bei km 335.914 mit polarisiertem Licht (Foto IG CBT).

gelängte Feldspatkristalle. Gesteine in der Nähe von Störungszonen können eine intensive Bildung von Serizit, Plagioklas, Kalzit zeigen, wie z.B. der helle serizitreiche Glimmerschiefer am Übergang südliche Ceneri-Zone – Val-Colla-Linie (Fig. 3-28). Oft ist Biotit ersetzt durch Chlorit.

Granat-Kyanit-Staurolit führender Glimmerschiefer

Oft können im Handstück mit Granat-Kyanit-Staurolith führendem Glimmerschiefer Granatporphyroblasten oder Alumosilikatkristalle mit Korngrössen von einigen Millimetern mühelos von Auge erkannt werden. Die stark gelängte und schiefrige Textur, in der oft eine Krenulationsschieferung oder S-C'-Strukturen zu erkennen sind, zeugt von einer intensiven duktilen Verformung.

Quarz, Plagioklas und seltener Kalifeldspat bestimmen zusammen mit nadelförmigen, millimeterfeinen Muskovit- und Biotitkristallen die ausgeprägte lepidoblastische Struktur des Gesteins. Die einzelnen Quarz- und Feldspatkristalle gestalten zusammen ein ungleichkörniges und zerfranstes Korngefüge, in dem die beim undulös auslöschenden Quarz erfolgte Subkornbildung und Korngrenzenmigration als Ergebnis einer dynamischen Rekristallisation zu interpretieren ist.

Wie im Granat führenden Zweiglimmergneis, lassen sich im Granat zwei Wachstumsstadien erkennen (Fig. 3-27). Wachstumsstadium 1 bildet abgerundete, häufig durch Drucklösung gelängte, hypidiomorphe Granate, die prä- bis synkinematisch gewachsen sind und oft Quarz-, Feldspat-, Muskovit- und Biotiteinschlüsse enthalten. Wachstumsstadium 2 hingegen kristallisierte idiomorphen Granat mit postkinematischen Wachstumszonen. Die Figur 3-27b beschreibt eine Abfolge von granoblastischen Lagen mit Quarz und Plagioklas sowie lepidoplastischen Lagen mit Biotit und Muskovit. Die länglichen Porphyroblasten mit Granat hinterlassen eine Krümmung der Hauptschieferung, welche auf die präkinematische Entstehung der Blasten hinweist.

Kyanit bildet prismatische Kristallformen, die undulöse Auslöschungen in Schieferungsrichtung aufweisen und Quarz-, Feldspat-, Biotit-, Muskovit- und seltener Granateinschlüsse des Wachstumsstadiums 1 enthält.

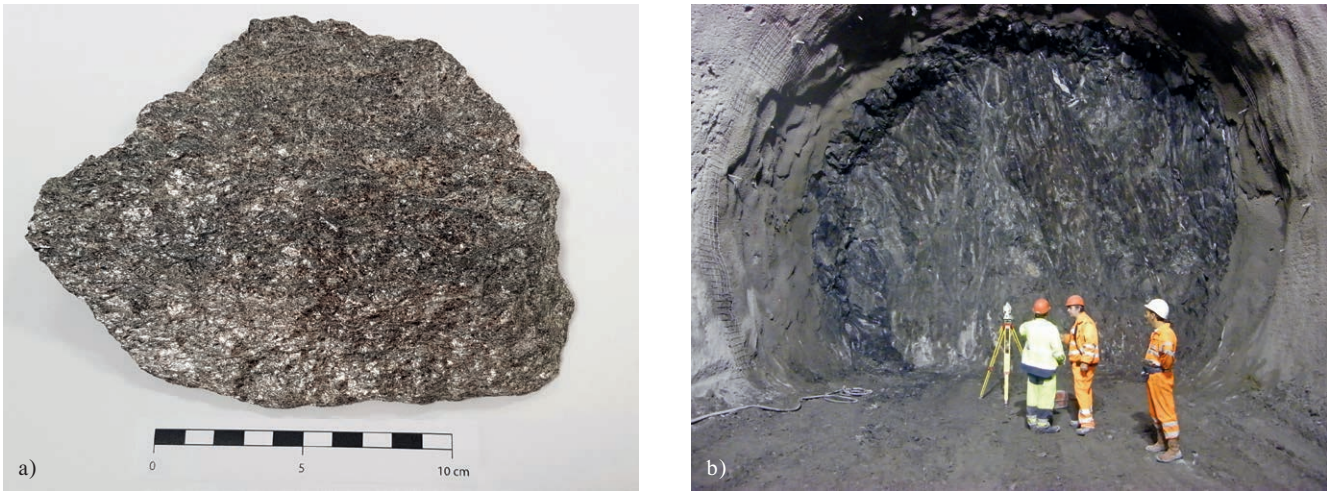


Fig. 3-26: a) Granat-Kyanit-Staurolith führender Glimmerschiefer GbC-NE-R-450.7. b) Ortsbrust der Oströhre bei km 235.911 mit entsprechendem Lithotyp (Fotos IG ITC).

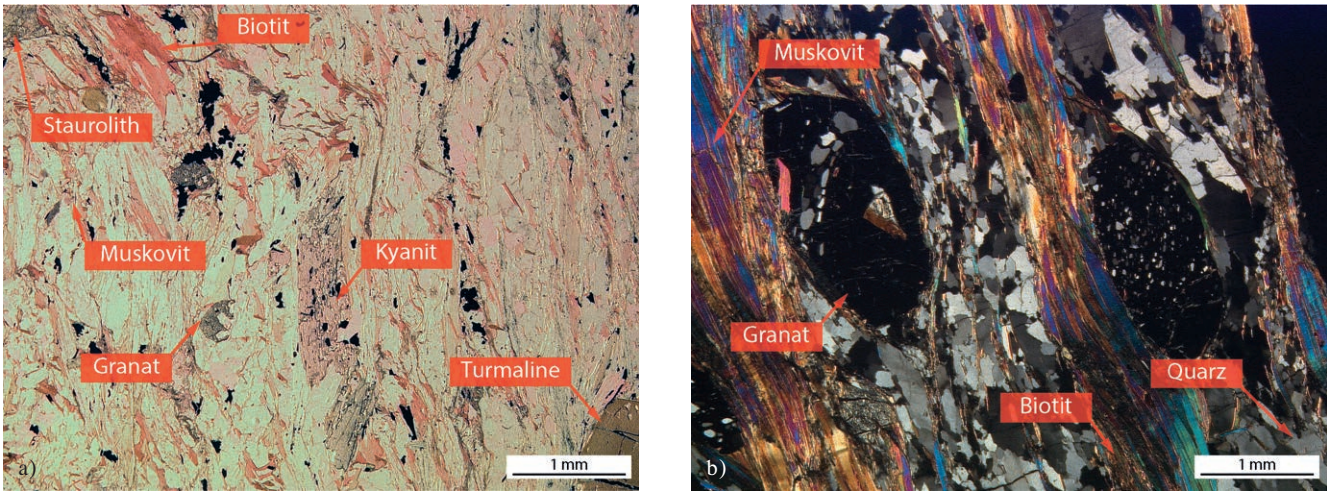


Fig. 3-27: a) Granat-Kyanit-Staurolith führender Glimmerschiefer, Gesteinsprobe GbC-NO-R-424.5 bei km 335.628 in der Dünnschliffaufnahme. Probe GbC-NE-R-823.0 bei km 236.383 aufgenommen mit normalem Licht. b) Probe GbC-NE-R-823 bei km 235.560 mit polarisiertem Licht (Fotos IG CBT).

Ähnlich wie Granat, weist Staurolith zwei Wachstumsphasen auf. Analog zu Kyanit entstand Staurolith prä- bis synkinematisch und enthält zahlreiche Mineraleinschlüsse. Der Staurolith, der zu porphyroblastischen hypidiomorphen Kristallen wuchs, repräsentiert das postkinematische Wachstumsstadium. Alle porphyroblastischen Mineralphasen liegen hauptsächlich in den glimmerreichen Lagen und widerspiegeln stoffliche Zonierungen im sedimentären Ursprungsgestein.

Letztendlich sind diese stofflichen und mineralogischen Zonierungen eine Ursache für die transversale Anisotropie des Giumello-Gneises. Die Subkornbildung im Quarz, Plagioklas und Feldspat sowie die schwache Verzahnung der Mineralphasen im Mikrogefüge senken die Druckfestigkeit des Gesteins wesentlich. Die an die lithologische Anisotropie gebundene anisotrope Druckfestigkeit verursachte somit im Tunnelprofil Ablösungen und Auflockerungen im östlichen Kämpferbereich, besonders auf dem Streckenabschnitt des «Subparallelismus». Zum Thema «Gefährdungsbilder und Ereignisse» im Zusammenhang der Geotechnik werden in den Kapiteln 9, 10 und 11.4.4 weitere Ergebnisse präsentiert.

3.1.3 Val-Colla-Linie (LVC)

Als Folge der mehrphasigen tektonometamorphen Entwicklungsgeschichte der Val-Colla-Linie, die bereits präalpin begann, resultiert für den Homogenbereich 30 ein petrographisch und strukturgeologisch komplizierter Gesteinskomplex. Zur Vereinfachung der Festlegung der Ausbruchsicherung wurde das geologische Prognosemodell deswegen in folgende vier Lithotypen unterteilt:

1a Phyllonit, Mylonit und Schiefer
1b Gneis und schiefriger Gneis
2 Komplex aus heterogener und unregelmässiger Zusammensetzung von Lithotyp 1a, 1b, Kataklasit und Kakirit Typ «fault breccia» sowie Kakirit Typ «fault gouge»
3 Kakirit Typ «fault gouge»

Im geologischen Befund ergibt sich unter Berücksichtigung des Prognosemodells eine Unterteilung der Val-Colla-

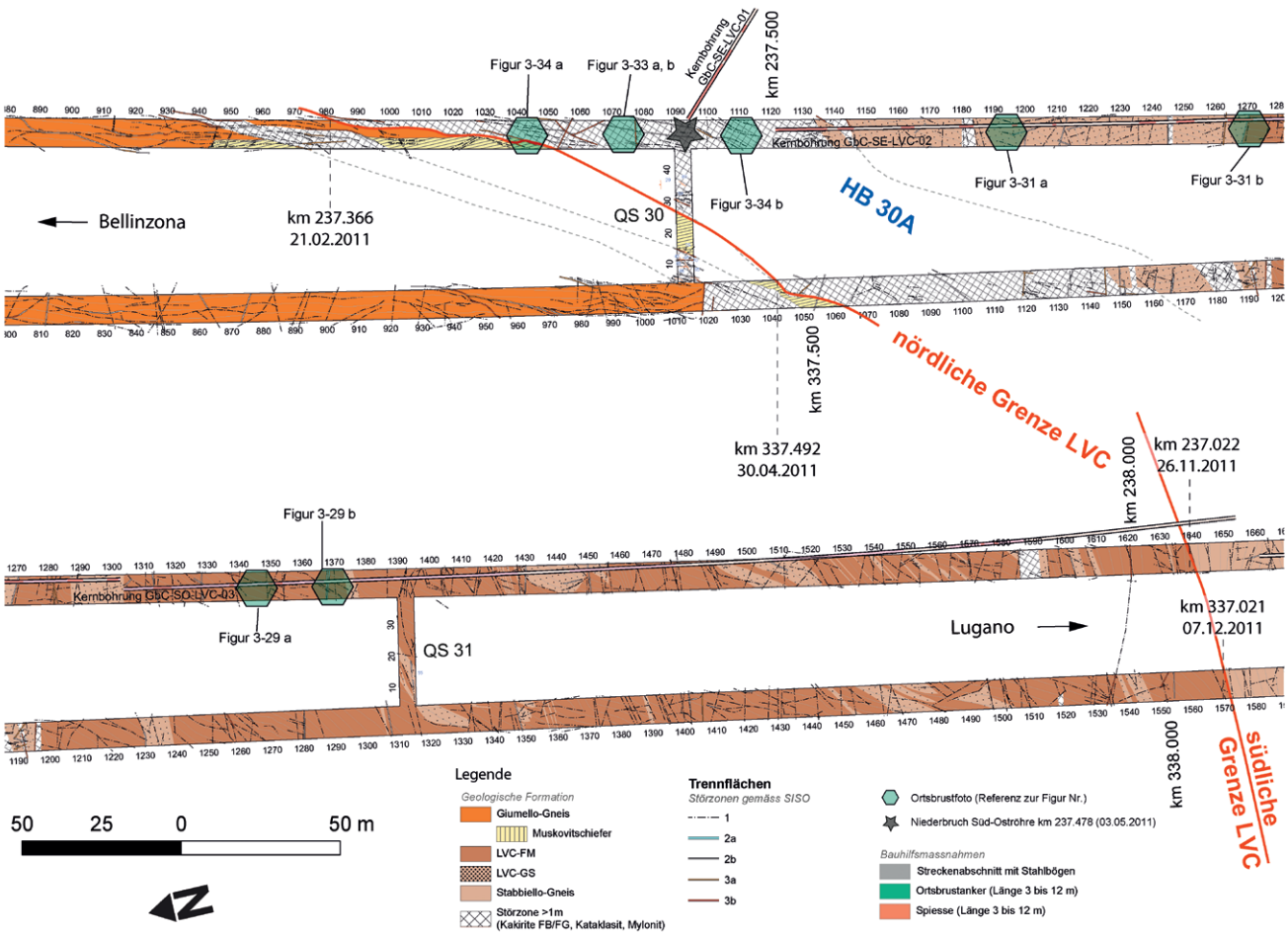


Fig. 3-28: Horizontalschnitt auf Kote Schienenoberkante. Er veranschaulicht die angetroffenen Hauptstörungszonen und Lithologien in der Val-Colla-Linie (HB 30A und 30B).

Linie in einen nördlichen und einen südlichen Homogenbereich (30A und 30B). Während im nördlichen Homogenbereich bis km 237.530 hauptsächlich gestörter Fels durchörtert wurde (Fig. 3-28), der aus den Lithotypen 2 und 3 besteht, war der Fels der aus den Lithotypen 1a und 1b im südlichen Abschnitt vorliegt, wenig gestört bis ungestört. Der Lithotyp 1b liegt auf dem Streckenabschnitt zwischen km 237.530 und km 237.562, danach folgt vorwiegend Lithotyp 1a bis zur südlichen Grenze des Homogenbereichs.

3.1.3.1 Lithotyp 1a: Phyllonit, Mylonit und Schiefer

Dieser mittel- bis dunkelgrau anstehende Lithotyp besteht hauptsächlich aus Quarz, Feldspat, Muskovit und Chlorit, weist sehr feine bis feine Korngrössen auf und ist ge-

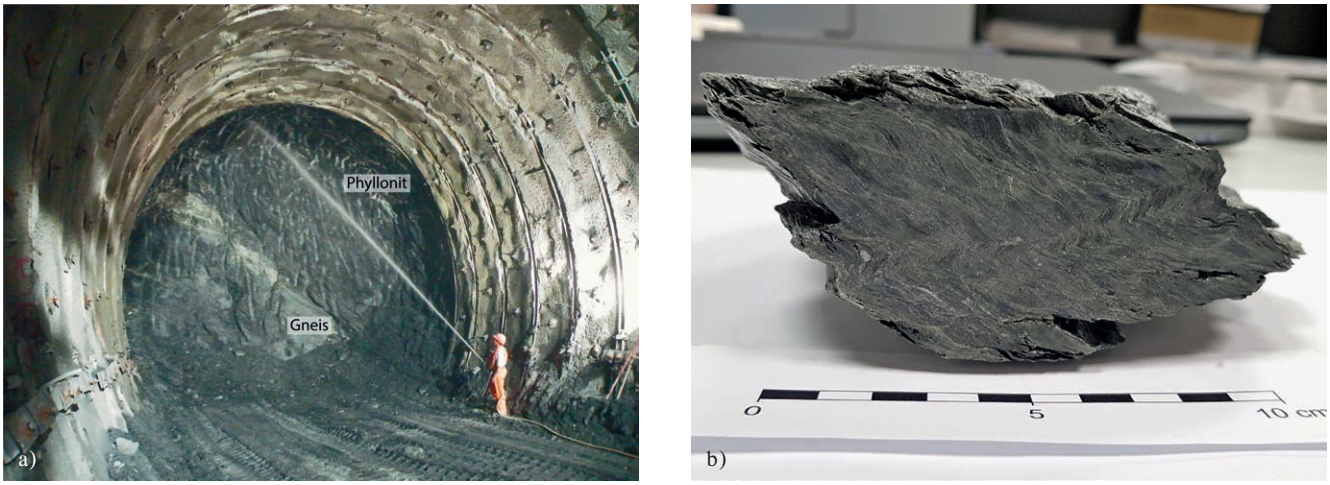


Fig. 3-29: a) Ortsbrust Oströhre km 237.731 mit Phyllonit auf der rechten Hälfte (Lithotyp 1a) und quarzreichem Gneis, der dem Lithotyp 1b entspricht. b) Handstück eines Phyllonits, GbC-SE-R-1370, Oströhre km 237.753 (Fotos IG CBT).

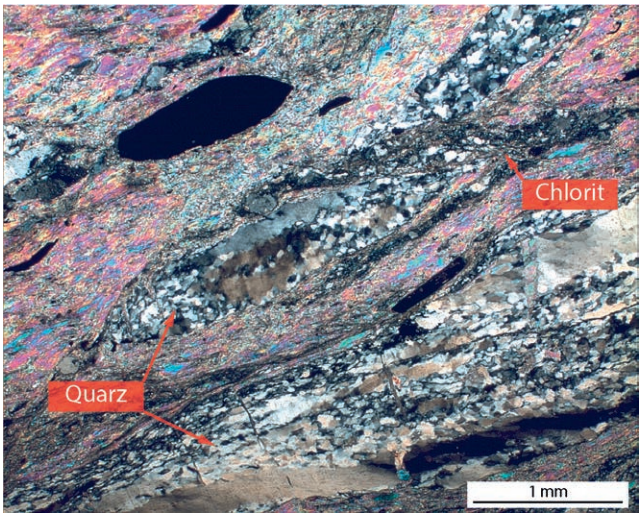


Fig. 3-30: Phyllonit in der Dünnschliffaufnahme GbC-SO-R-1250.4 mit polarisiertem Licht, Oströhre km 337.701 (Foto IMM).

kennzeichnet durch ein intensives planares Gefüge, das gewöhnlich von einer Krenulationsschieferung überprägt ist.

Abhängig vom modalen Quarz- und Phyllosilikatgehalt erhält der Phyllonit ein lepidoblastisches oder granoblastisches Mikrogefüge. Auffällig häufig sind opake Minerale in der Gesteinsmatrix verstreut.

Die untersuchten Mylonite haben einen höheren Quarzgehalt und bestehen aus granoblastischen, gleich- bis ungleichkörnigen Quarz- und Feldspatverbänden. Quarz mit Korngrössen zwischen sehr fein und fein (0,01–0,3 mm) und undulierender Auslöschung deutet auf Subkornbildung. Hingegen reagiert Plagioklas weniger stark auf die dynamische Rekristallisation und weist abgerundete, oft mit Drucklösungsrändern umflossene Porphyroblasten auf, die meistens serizitisiert sind. Die Mylonite werden durch eine intensive Schieferung geprägt. Häufig wird die Schieferung, durch Kalzit gefüllte Mikrorisse diskordant durchquert.

3.1.3.2 Lithotyp 1b: Gneis und schiefriger Gneis

Der Lithotyp 1b entspricht petrographisch dem Stabbiello-Gneis und tritt in grösseren Vorkommen vorwiegend südlich der Störungszone SZ 30A.1 auf, wo er mit dem Lithotyp 1a eng verknüpft ist. Eine mögliche Erklärung ist, dass diese Stabbiello-Gneis-Härtlinge ein Relikt einer tektonischen Akkretion der präalpinen Phase beschreibt (Zurbriggen 2015). Bereits in der SZ 30A.1 können im weniger gestörten Gestein Fragmente von Stabbiello-Gneis erkannt werden. Im Homogenbereich 30B ist in der Oströhre zwischen km 237.529 und km 237.652 sogar ein 123 m mächtiger Köper aufgeschlossen. Häufig tritt der Lithotyp 1b in gemischter Abfolge mit dem Lithotyp 1a auf. Mit fortlaufendem Vortrieb gegen Süden sind im Homogenbereich 30B häufiger unregelmässig gebankte Schichten mit quarzreicherem Gneis in Wechsellagerung mit Glimmerschiefer aufgeschlossen. Die Bankung beträgt einige Zentimeter bis Meter.

Der quarzreichere, hellgraue Gneis ist fein- bis kleinkörnig. Das Gefüge ist meist gleichkörnig und besteht aus vielen verschiedenen und unterschiedlich häufigen Mineralen, wie Quarz, Plagioklas, Kalifeldspat, Muskovit, Biotit, Chlorit, Granat, Kyanit und opake Mineralen. Das Gefüge wird durch granoblastische, ungleichkörnige Aggregate aus Quarz und Feldspat, die mit Muskovit und Chlorit verzahnt sind, bestimmt. Wie für den Lithotyp 1a beschrieben, deutet der Quarz auf Subkornbildung und Korngrenzenwanderung hin. Der Plagioklas und der Kalifeldspat sind schwach rekristallisiert und zum Teil serizitisiert. Insgesamt sind die Quarz- und Feldspatverbände leicht gestreckt und werden von den eingeregelten Phyllosilikaten mit einer diskreten Foliation betont. Daher ist die quarzreichere Varietät dieses Lithotyps meist massig, und eine anisotrope Textur ist schwer zu erkennen.

Fig. 3-31: a) Ortsbrust Oströhre km 237.577, bestehend aus quarzreichem Gneis, welcher dem Lithotyp 1b entspricht. b) Handstück GbC-SE-R-1271, Lithotyp 1b, ähnliches Gestein wie Stabbiello-Gneis, Oströhre km 237.654 (Fotos IG CBT).

Demgegenüber hebt sich die phyllosilikatreiche Varietät durch seine Schieferung hervor. In diesen Lagen überwiegt das lepidoblastische Gefüge, das aus millimeterdicken Muskovit- und Biotitverbänden aufgebaut ist und durch Quarz- und Feldspatlagen abgelöst wird. Abgerundete postkinematische Granatporphyroblasten sowie Kyanit- und Disthenkristalle erscheinen häufig in den glimmerreichen und lepidoblastischen Lagen.

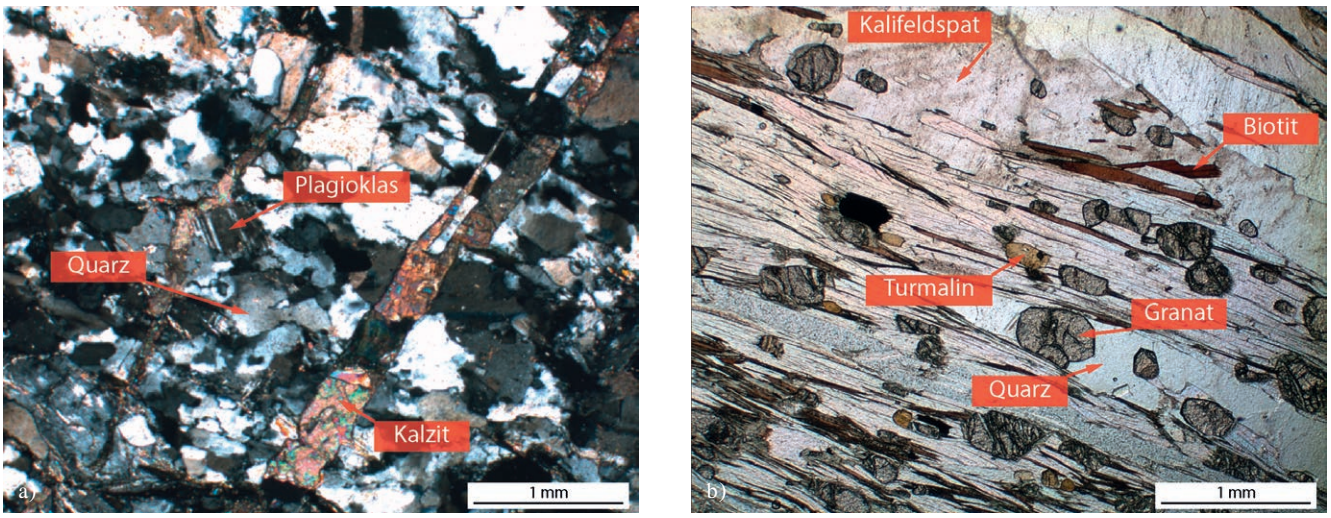


Fig. 3-32: Beide Gesteinsproben repräsentieren den Lithotypen lb. a) Quarzreicher Gneis im Dünnschliff mit polarisiertem Licht mit Anzeichen von dynamischer Rekristallisation und Kalzitadern, GbC-SO-R-1054 Weströhre bei km 337.505. b) Dünnschliffaufnahme eines Granat und Turmalin führenden Schiefers aus der schrägen Erkundungsbohrung LVC-01 bei Bm 23.75 mit normalem Licht (Fotos IMM).

3.1.3.3 Lithotyp 2: Heterogene Zusammensetzung verschiedener Lithotypen der LVC

In den Homogenbereichen 30A und 30B sind im insgesamt 26% dieses Lithotyps aufgeschlossen, wobei die Hauptmenge in der Störungszone 30A.1 anzutreffen ist. Das Gestein besteht aus einer unregelmässigen Aufeinanderfolge von Phyllonit und Mylonit, durchmischt mit Kataklasit des Typs «fault breccia» und Kakirit des Typs «fault gouge». Im Homogenbereich 30B ist der Lithotyp 2 nur lokal in Störungszonen von wenigen Metern Mächtigkeit vertreten.

Das dunkelgraue bis schwarze Gestein deutet meist auf eine schwach kohäsive Kornverbindung hin und ist durch eine unregelmässige Foliation geprägt, die oft intensiv verfältelt oder krenuliert ist. In diesem Gestein stehen oft Kataklasit mit schwarz glänzenden Bruchflächen zusammen mit zenti- bis dezimeterdicken, grauen bis beigen kohäsionslosen Kakiritlagen des Typs «fault gouge» und schwach deformierten aber z.T. intensiv verglimmerten Gneislinsen an. In den Bereichen mit Kataklasit des Typs «fault breccia» kann aufgrund der sehr geringen Korngrössen mit der Lichtmikroskopie keine Mineralparagenese identifiziert werden.

3.1.3.4 Lithotyp 3: Kakirit Typ «fault gouge»

Gestein das nur aus Kakirit des Typs «fault gouge» besteht wurde in den Störungszonen selten angetroffen. Kakirit ist vorwiegend in Form von millimeterdicken Schmierlassen bis hin zu mehreren Dezimetern mächtigen hellgrauen, oft verfalteten Kakiritlinsen in einer Gesteinsmatrix des Lithotyps 2 eingeschlossen. Bei der Untersuchung von Kakiritproben wurde festgestellt, dass beim Zufügen von Wasser das Gestein seine Kohäsion komplett verliert und in einen Gesteinsbrei umgewandelt wird. Genau der gleiche Effekt wurde an der Ortsbrust beobachtet. Durch den Einbau von Ortsbrustankern wurde die Ortsbrust zu stark mit Wasser benetzt, so dass die Kohäsion verloren ging und die Ortsbrust nachbrüchig wurde (Fig. 3-34). Diese Erfahrung wurde im Vortrieb umgesetzt, indem der Wassergebrauch für die Vortriebsarbeiten an der Ortsbrust auf ein Minimum reduziert wurde.

Die ETHZ untersuchte im Rahmen einer Kampagne die Verformung von Gesteinsproben im Bereich der Kakirite der Val-Colla-Linie (Anagnostou et al. 2011), (s. Kap. 9).

3.1.4 Nördliche und südliche Val-Colla-Zone

Die Unterteilung der Val-Colla-Zone ist tektonisch (s. Kap. 2) und nicht petrographisch bedingt, deshalb werden alle angetroffenen Lithologien der Val-Colla-Zone in einem Kapitel zusammengefasst.

3.1.4.1 Stabbiello-Gneis

Analog zum Giumello-Gneis der südlichen Ceneri-Zone bildet auch die Stabbiello-Gneis-Formation einen Komplex aus den vier folgenden Lithologien:

- Muskovit-Granat-Kalifeldspat führender Gneis und Schiefer
- Granat führender Biotitgneis
- Granat und Serizit führender Muskovitschiefer
- Alumoslilikat führender Zweiglimmergneis und Schiefer

Muskovit-Granat-Kalifeldspat führender Gneis und Schiefer

Der Granat führende Muskovit-Gneis erscheint als grau-gelbliches Gestein und fällt besonders mit zahlreichen ockergelb bis rostig rötlichen Harnischflächen, die mit Kalzit, Dolomit oder Ankierit mineralisiert sind, auf.

Abhängig vom Verhältnis Quarz/Phyllosilikate erhält das Gestein eine schiefrige bis massige Textur. Oft kann eine lamellare, zentimeterdicke Bankung mit «marmorisierten» Horizonten festgestellt werden.

Das Gestein besteht vorwiegend aus Quarz, Kalifeldspat, Muskovit und Granat. Biotit fehlt oder wurde nur als akzessorisches Mineral identifiziert. Im Dünnschliff kann eine granolepidoblastische Struktur beobachtet werden, die

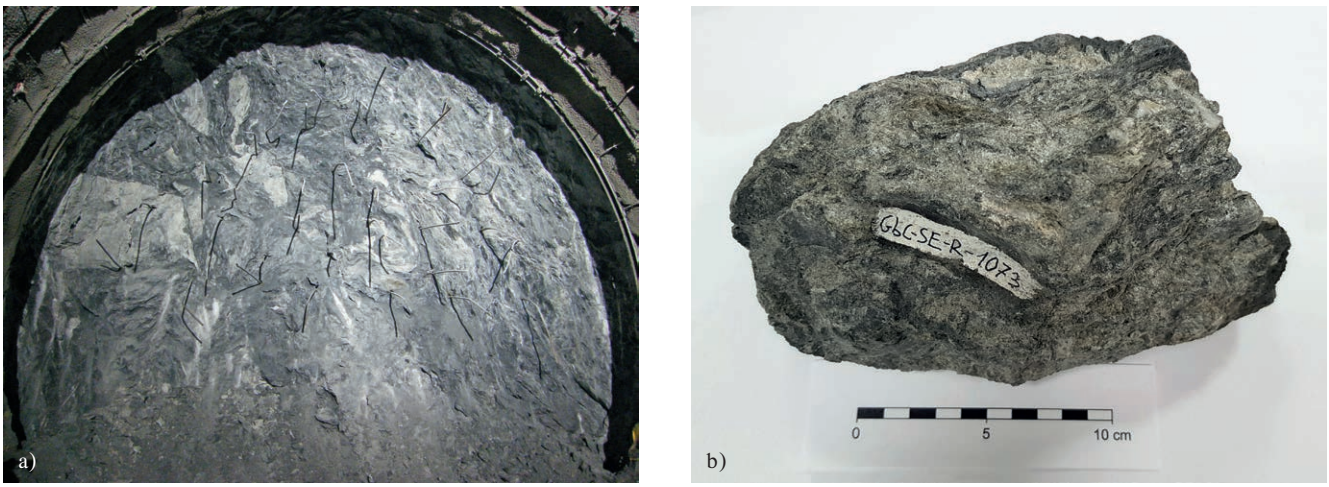


Fig. 3-33: a) Vortrieb Oströhre bei km 237.459 in einer kakiritischen Störungszone des Typs «Störungsbrekzie». Es sind kantige Fragmente aus stabbielloähnlichem Gneis erkennbar. b) Äquivalentes Handstück GbC-SE-R-1073 bei km 237.456 (Fotos IG CBT).

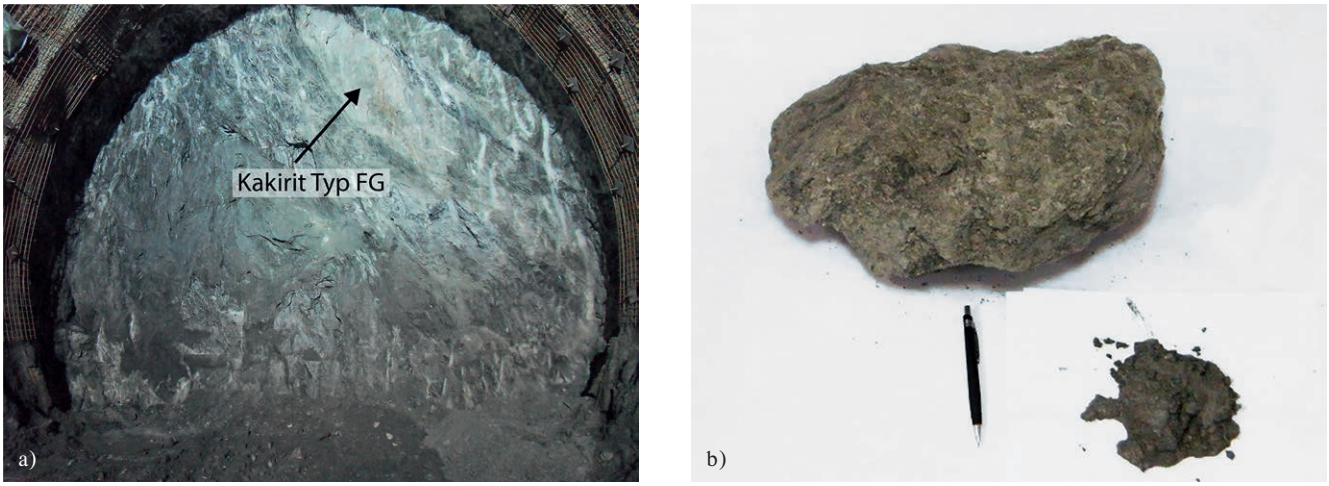


Fig. 3-34: a) Ortsbrust mit kakiritischer Störungszone des Typs (fault breccia) und lokalem Gesteinsmehl (fault gouge) in der Oströhre bei km 237.429. b) Handstück aus der Oströhre km 237.491 zeigt die Verflüssigung von Störungsgestein des Typs «fault gouge» nach Zugabe von Wasser (Fotos IG CBT).

hauptsächlich aus grossen und verformten Muskovitporphyroblasten besteht, die zusammen mit Granatporphyroblasten in einer ungleichkörnigen Quarz-Feldspat-Matrix kristallisiert sind.

Der Quarz entwickelte sich zu mikrokristallinen Aggregaten mit undulöser Auslöschung und ist meistens komplett rekristallisiert. Der Kalifeldspat weist sowohl einen xenomorphen als auch einen isometrischen Habitus auf, mit gelappten oder gezackten Korngrenzen und ist oft serizitisiert oder karbonatisiert. Der Granatgehalt variiert. Einige Proben sind granatreich, in anderen ist der Granat nur akzessorisch vorhanden oder sogar komplett pseudomorph in sekundäre Mineralphasen, wie Epidot, Serizit, Kalzit oder Chlorit, umgewandelt.

Skelettförmige Granatporphyroblasten enthalten in ihrem Kern zahlreiche Quarz-, Chlorit- oder Kalziteinschlüsse. Granatporphyroblasten entwickeln aufgrund ihrer Verformung oft einen pseudo-hexagonalen oder asymmetrischen Habitus. An ihren Kontakten senkrecht zur Foliation beobachtet man Spuren von Drucklösungsprozessen. Wahrscheinlich haben die Granate Relikte einer älteren Foliation

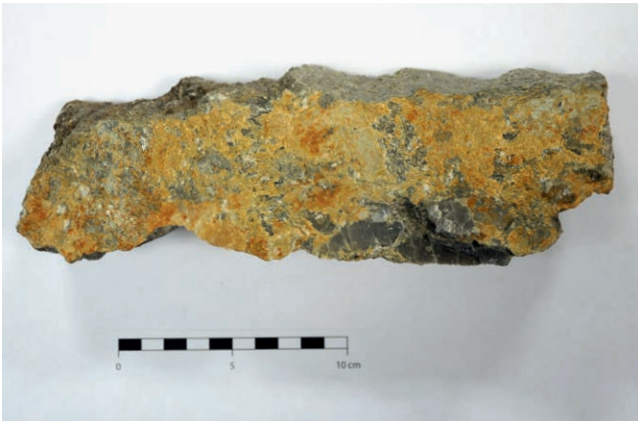


Fig. 3-35: Gesteinsprobe aus der Weströhre km 341.482 mit «marmorisierten» Horizonten und Mineralisierung von Kalzit und/oder Ankerit. Diese verleihen dem Gestein eine ockergelbe Farbe (Foto IG CBT).

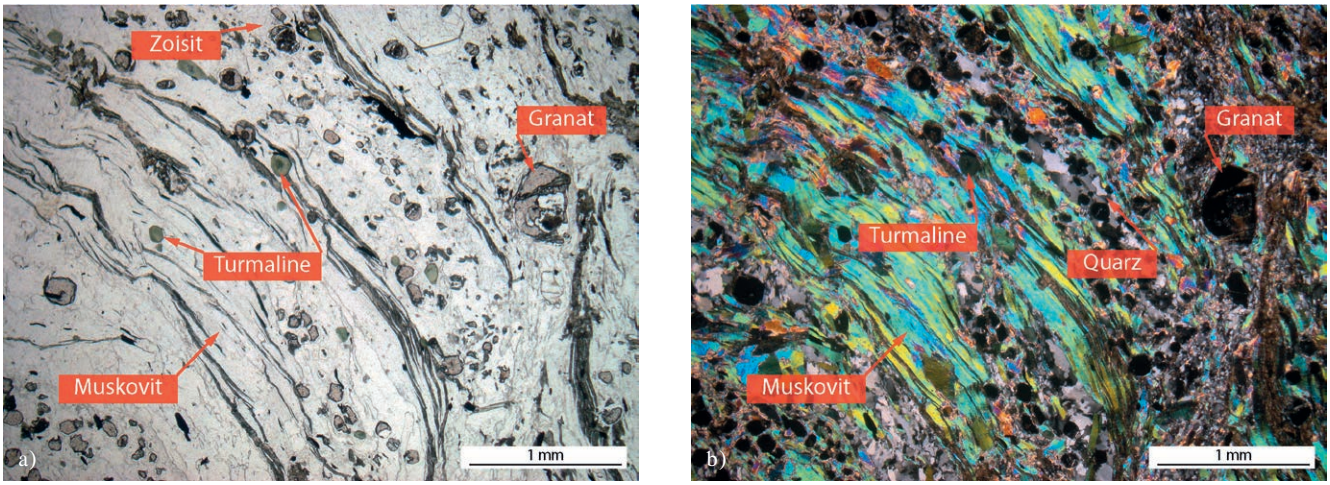


Fig. 3-36: a) Dünnschliffaufnahme eines Granat führenden Muskovitschiefers mit Turmalin (GbC-SO-R-3391.8, km 239.774) aufgenommen mit normalem und b) polarisierten Licht (Foto TransGeo).

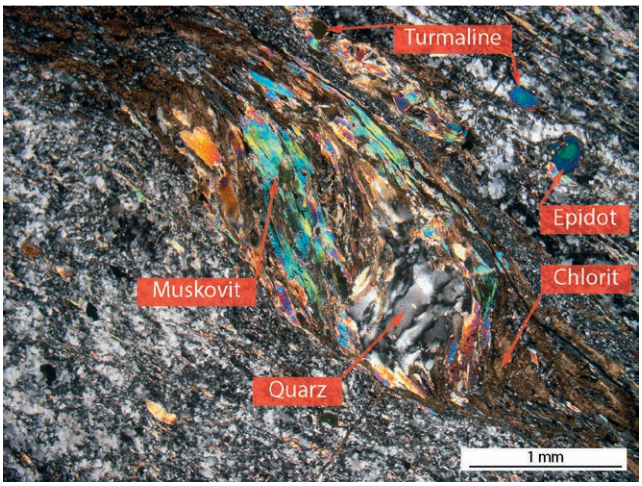


Fig. 3-37: Mylonitische Textur mit feinkörniger Gesteinsmatrix und zahlreichen reliktischen Mineralen in der Gesteinsprobe GbC-SO-R-5031, km 341.482, aufgenommen mit polarisiertem Licht. Das Mineralaggregat mit sigmaförmigem Schweif weist aufgrund seiner Mineralparagenese auf reliktischen Granat hin (Foto TransGeo).

und anderer Minerale eingeschlossen. Entlang der Granatporphyroblasten formt Muskovit in Paragenese mit Chlorit und Quarz Sigmaklasten (Fig. 3-37). In pseudomorphen Mineralverbänden ist es häufig möglich, idiomorphe Chlorit- und Epidotlamellen zu identifizieren. Grosse opake Minerale sind manchmal entlang der reliktischen Textur oder entlang von Schieferungsflächen erkennbar. Akzessorische Minerale, wie Rutil, Titanit, Apatit, Zirkon und Turmalin, vervollständigen das mineralogische Spektrum der Gesteinsmatrix.

Granat führender Biotitgneis

Inmitten des gelblichen bis hellgrauen Zweiglimmergneises fällt der dunkle Granat führende Biotitgneis besonders auf. Seine lithologischen Grenzen sind häufig verfaltet und diskordant zur Hauptschieferung. Der Biotitgneis zeigt sich in Form linsenförmiger, bis zu mehreren Metern grosser Einlagerungen, eingebettet in anderen Lithologien des Stabbiello-Gneises. Oft sind zentimetergrosse mineralisierte Klüfte mit Quarz zu erkennen. Obwohl dieses Gestein auf den ersten Blick massig erscheint, ist eine Foliation erkennbar.

Mikrostrukturell setzt sich das Gestein aus beinahe gleichkörnigen und granoblastischen Mineralaggregaten, bestehend aus Quarz oder Kalifeldspat, sowie biotitreichen Schichten, z.T. mit wenig Muskovit und skelettförmigen Granatblasten zusammen (Fig. 3-39). Lokal sind Chlorit-, Zoisit- oder opake Mineralaggregate und Granat- sowie Staurolithrelikte anzutreffen.

Feldspatkristalle sind subidiomorph und oft mit Serizit verglimmert. Die Granate sind meistens fast vollständig zu Chlorit und/oder Kalzit umgewandelt (Pseudomorphose).

Die Schieferung wird durch lamellare subidiomorphe Biotitkristalle markiert, die manchmal am Rand leicht chloritisiert sind. Biotit ist in einer Paragenese überwiegend zusammen mit Chlorit und Epidot vergesellschaftet. Lamellarer Chlorit bildet die Matrix des Gesteins. In einigen Dünnschliffen ist er ein Zersetzungsprodukt von Kalifeldspat. In den analysierten Gesteinsproben ist Klinozoisit in unterschiedlichen Umwandungsstadien vorhanden, von chloritreichen Korngrenzen bis hin zur vollständigen Umwandlung in Chlorit.

Granat und Serizit führender Muskovitschiefer

Der Granat und Serizit führende Muskovitschiefer ist anhand der S-C'-Struktur und den auffälligen millimeter- bis zentmetergrossen, grau-silbernen Flecken (Mineralaggregate aus Serizit) leicht zu identifizieren und gibt Hinweise auf intensive duktile Verformung. In diesem Gestein ist ein lithofazielle Nord-Süd-Gradient feststellbar. In der Nähe der Grenze zur Val-Colla-Linie ist der Biotit grösstenteils in Chlorit umgewandelt, was dem Gestein eine grünliche bis dunkelgraue Farbe verleiht. Mit zunehmender südlicher Entfernung zur Val-Colla-Linie ist der Biotit weniger stark chloritisiert, wodurch das Gestein seine ursprüngliche braune Farbe wiedererlangt.

Die Textur ist überwiegend schiefrig, z.T. verleiht die Orientierung von Phyllosilikaten dem Gestein eine lokale Krenulation.

Fig. 3-38: a) Gesteinsprobe eines Granat führenden Biotitgneises aus der Weströhre bei km 339.609. b) Lithologische Grenze zwischen Zweiglimmergneis (hellgraue Farbe) und Granat führendem Biotitgneis (dunkle Farbe) an der Ortsbrust der Oströhre bei km 239.774 (Foto IG ITC).

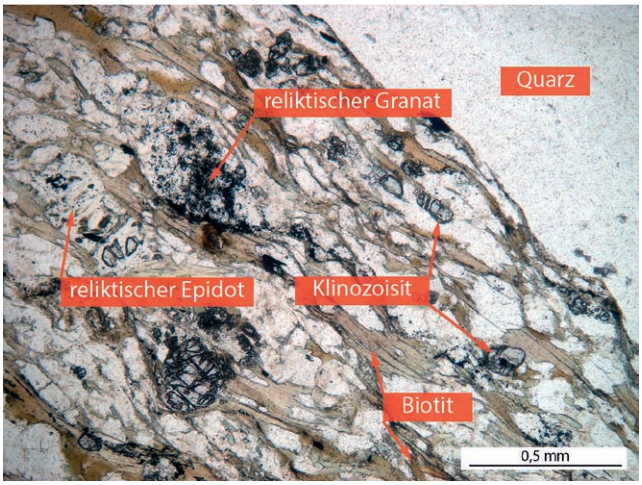


Fig. 3-39: Granat führender Biotitgneis im Dünnschliff mit normalem Licht. Gesteinsprobe GbC-SO-R-3158, Weströhre km 339.609 (Foto TransGeo).

Das Gestein zeigt eine komplexe und ausgeprägte schiefrige Textur in Form von Lagen aus Hellglimmer, Serizit und Kalzit, abwechselnd mit Quarz- und Feldspatlagen. In den hellglimmerreichen Lagen sind häufig Mikrofalten sichtbar, und ebenso häufig sind S-C'-Strukturen vorhanden. Im Gestein sind verstreut Porphyroblasten aus Granat oder reliktischem Kalifeldspat vorhanden. Quarz mit undulöser Auslöschung im Lichtmikroskop deutet auf Subkornbildung.

Die grossen Granatporphyroblasten mit abgerundetem Habitus sind zerbrochen und enthalten zahlreiche Mineraleinschlüsse. Sie deuten auf eine mehrphasige metamorphe Entwicklung. In den zonierten Granatkristallen kann ein alterierter Kern mit Substitution von feinen Chlorit-, Silikat- und opaken Aggregaten entlang einer reliktischen Foliation beobachtet werden. An ihren Korngrenzen sind fast immer Druckauflösungsprodukte und Verformungsschatten («pressure shadow») zu erkennen, gefüllt mit Chlorit- und Quarzaggregaten, die sigmaförmige Schweife bilden.

Plagioklas erscheint in verschiedenen Formen, oft mit gerundetem und langgestrecktem Habitus, im Allgemeinen eingeregelt in der Schieferung. Grosse Plagioklasporphyro-

Fig. 3-40: a) Granat und Serizit führender Muskovitschiefer nahe an der Val-Colla-Linie in der Oströhre km 238.886. Biotit ist fast vollständig zu Chlorit umgewandelt. b) Mit zunehmender Entfernung von der Val-Colla-Linie entspricht das Gestein einem Granat führenden Zweiglimmergneis. Der Biotit ist nahezu intakt und nur leicht chloritisiert. Die Gesteinsprobe stammt aus der Weströhre km 339.571 (Foto IG ITC).

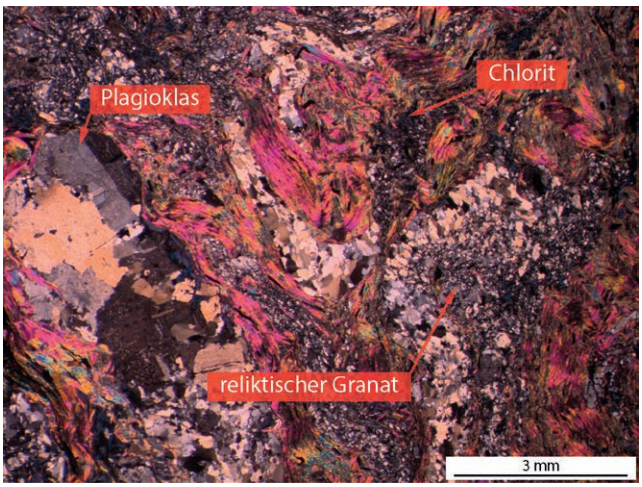


Fig. 3-41: Granat und Serizit führender Muskovitschiefer GbC-SE-R-1747.5, Oströhre km 238.130, Dünnschliffaufnahme mit polarisiertem Licht (Foto IG ITC).

blasten sind häufig in Serizit und Kalzit umgewandelt und führen zu einem augigen Gefüge.

Alumoslilikat führender Zweiglimmergneis und Schiefer

In der Umgebung des Verzweigungsbauwerks Sarè erscheint eine lithologische Varietät der Stabbiello-Gneis-Formation mit den Leitmineralen Granat, Kyanit und Staurolith. Die Gesteinsfarbe variiert von grau bis gelblich mit z.T. bläulichem Schimmer entlang der Schieferungsflächen. Der Fels ist häufig durchtrennt mit mineralisierten Klüften, die aus Karbonat, meistens Dolomit und Ankerit von gelblicher bis rötlicher Farbe bestehen. Die schichtsilikatreichen Lagen wechseln mit quarzreichen Lagen ab und erzeugen ein planares Gefüge.

Die Besonderheit dieser Lithologie im Vergleich zu den anderen der Stabbiello-Gneis-Formation liegt in der bemerkenswerten Variabilität des Mineralgehalts an Alumosilikaten und akzessorischen Mineralen. Aus den mikroskopischen Untersuchungen gehen zwei Lithotypen hervor: alumosilikatreicher Zweiglimmergneis gekennzeichnet durch

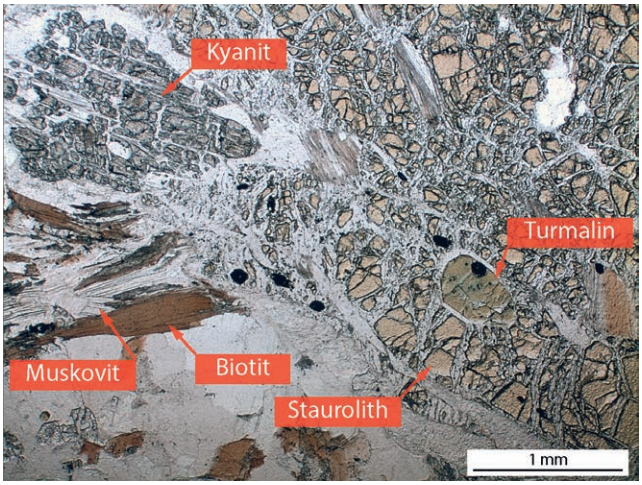


Fig. 3-42: Granat und Serizit führender Muskovitschiefer GbC-Sarè-SO-01 Bm 220.25, Oströhre km 340.540, Dünnschliffaufnahme mit normalem Licht (Foto IG ITC).

Fig. 3-43: Gesteinsprobe mit Granat, Kyanit und Staurolith führendem Zweiglimmergneis aus der Kernborhung GbC-Sarè-SO-01 bei Bm 220.25 (entspricht der Station in der Weströhre bei km 340.540) (Foto IG ITC).

die Paragenese Granat-Staurolith-Kyanit-Biotit und alumosilikatarmer Zweiglimmergneis, der reliktische Minerale enthält. Der alumosilikatärmere Zweiglimmergneis beschreibt die Paragenese Granat-Zoisit-Chlorit-Serizit und weist eine deutlich stärker deformiertere z.T. mylonitische Textur auf.

Typisch für den ersten Lithotyp ist ein porphyroblastisches Gefüge, welches sich durch grosse Kristalle aus Granat, Staurolith oder Kyanit auszeichnet, die in einer feinkörnigen Matrix aus Quarz, Feldspäten und Glimmer liegen. Der Grad der retrograden Mineralisation ist sehr unterschiedlich. Im Allgemeinen zeigt der Quarz xenomorphe, ausgefranste Korngrenzen. Plagioklas tritt in subidiomorphem und prismatischem Habitus auf und ist oft mit Quarzaggregaten vergesellschaftet. Lokal sind polysynthetische Zwillinge zu finden.

Grosse Granatporphyroblasten mit unterschiedlichen Wachstumsstadien zeugen von einer mehrphasigen Metamorphose. Zusätzlich sind Staurolith und Kyanit mit prismatischem Habitus, meistens skelettförmig in der Gesteinsprobe, vorhanden. Biotit, Muskovit sowie Chlorit treten am häufigsten auf.

Der zweite Lithotyp hat ebenfalls ein granoblastisches Gefüge mit Quarz, Plagioklas, Biotit, Staurolith, Kyanit und Klinozoisit. Dabei sind Staurolith oder Kyanit grösstenteils nur noch als Relikte erkennbar.

3.1.4.2 Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone

Amphibol führender Gneis und Schiefer der Val-Colla-Zone wird in der Projektphase des CBT zur Formation Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone (B-SBVS) gezählt. Das grösste zusammenhängende Vorkommen von Basiten und Semibasiten liegt in der nördlichen Val-Colla-Zone zwischen km 238.563–238.673 im Bereich der Tesserete-Grona-Linie (vgl. geologisches Längenprofil, Taf. I und Kap. 6.2). Weitere einzelne Aufschlüsse sind im Abschnitt km 238.973–239.083 anzutreffen. Diese mafischen Gesteine sind unregelmässig linsenförmig, gebändert oder als einzelne Horizonte in der Stabbiello-Gneis-Formation eingelagert. Die Mächtigkeit variiert von wenigen Dezi- bis mehreren Dekametern (Fig. 3-44).

Im Hinblick auf die Prävention von Asbest und die Sicherheit am Arbeitsplatz wurden die Vorkommen basischer Gesteine mit besonderem Interesse dokumentiert. Basite

Fig. 3-44: Amphibolitlinsen im Zweiglimmergneis, Oströhre km 238.615 (Foto IG ITC).

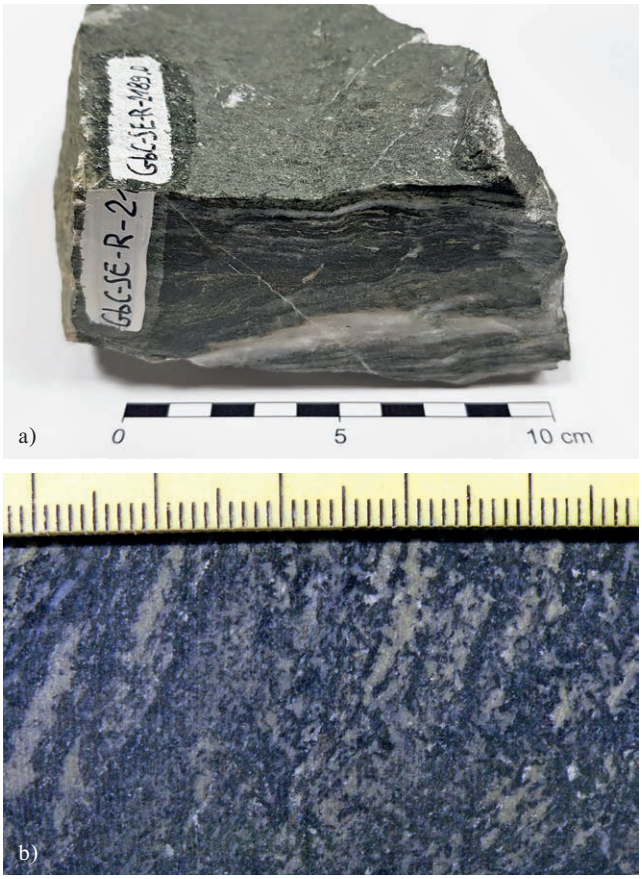


Fig. 3-45: a) Bänderamphibolit in der Oströhre km 238.572. b) Hornblende führender Gneis, z.T. mit Granat und Epidot aus der Kernbohrung GbC-SE-01 Bm 162 (entspricht der Station km 238.777) (Foto IG ITC).

und Semibasite sind deshalb während der Bauausführung Gegenstand von detaillierten Untersuchungen geworden. Die Thematik Asbest und die Ergebnisse werden in Kap. 6.2 ausführlich dargestellt.

In dieser Formation können folgende zwei Lithologien voneinander unterschieden werden:

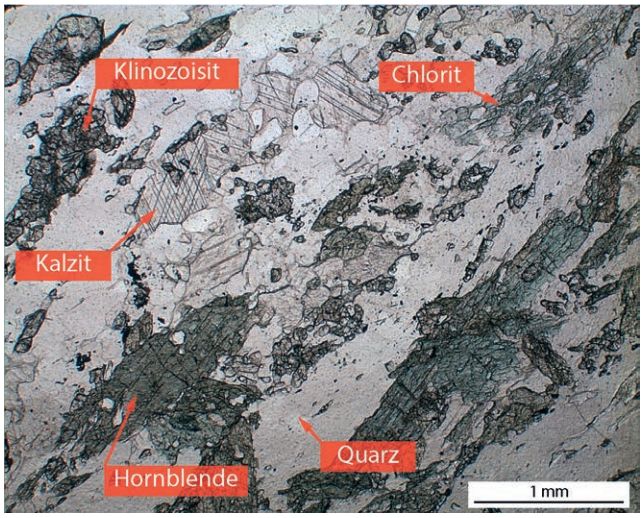


Fig. 3-46: Amphibolitlinsen im Zweiglimmergneis GbC-SE-R-2189.0, Oströhre km 238.572, Dünnschliffaufnahme mit normalem Licht (Foto IMM).

- Bänderamphibolit, z.T. mit Granat
- Hornblende und Granat führender Gneis

Die mineralogische Zusammensetzung der Bänder schwankt zwischen felsischen Mineralen, Phyllosilikaten und Hornblenden. Granat ist seltener vorhanden und dann meistens paragenetisch mit glimmerreichen Lagen vergesellschaftet. Auffallend in diesem Gestein sind die gelblich bis grünlich gefärbte Klüfte, die mit Kalzit oder Dolomit und häufig Epidot ausgekleidet sind.

Im Bänderamphibolit ist eine ausgeprägte Foliation sichtbar, die durch die diskontinuierliche Abfolge von leukokraten Mineralen (Quarz und Muskovit) und melanokraten Mineralen (Hornblende, Epidot und Chlorit) betont ist.

Hornblende- und Granat führender Gneis hat etwas grössere Mineralkörner als der Bänderamphibolit und eine massige dunkelgrüne Textur. Oft enthält das Gestein millimeter- bis zentimeterdünne felsische Minerallagen oder quarzgefüllte Adern. Abgerundete anhedrische Quarzkörner mit Pleochroismus deuten auf dynamische Rekristallisation hin. Lamellenförmiger Chlorit ist in der Gesteinsmatrix gleichmässig verteilt und oft zusammen mit feinschuppigem Serizit metasomatisch aus Feldspat oder Amphibol entstanden. Epidot und Klinozoisit mit subidiomorphem Habitus sind in zahlreichen Dünnschliffen vertreten. In der Matrix fallen Titanit und Ilmenit auf.

3.1.4.3 Bernardo-Orthogneis (OGBern)

Im mittleren Bereich der Val-Colla-Zone, hauptsächlich in der Umgebung des Verzweigungsbauwerkes Sarè, ist leukokrater Muskovit führender Augengneis im Stabbiello-Gneis eingeschaltet, die der Bernardo-Orthogneis-Formation zugeordnet werden. Dieser Gesteinskomplex, der z.T. durch Scher- und Störungszonen durchtrennt ist, hat eine sehr unregelmässige räumliche Ausdehnung und gestaltet an der Oberfläche in den Gebieten San Bernardo und San Zeno eine markante hügelige Morphologie rund um den Lago d'Origlio. Einige dieser Gneiskörper erreichen auf Tunnelniveau eine Ausdehnung von bis zu 300 m. Die petro-

Fig. 3-47: a) Leukokrater, Muskovit führender Augengneis im Handstück, Oströhre km 239.438. b) Kataklastische Störung am Übergang Muskovit führender Augengneis (Bernardo-Orthogneis) links und heller Zweiglimmergneis (Stabbiello-Gneis) rechts in der Ortsbrust der Oströhre km 240.724 (Fotos IG ITC).

genetische Stellung dieses augigen Muskovitgneis ist nicht vollständig gesichert. Nach El Tahlawi (1965) ist der leukokrate, Muskovit führende Augengneis paragener Natur. Die Morphologie der untersuchten Zirkone, das Mikrogefüge, der Chemismus und die tektonische Stellung sind gemäss dem Autor Argumente, die für eine Metaarkose sprechen. Köppel & Grünenfelder (1971) wiederlegten diese Hypothese mit geochemischen Untersuchungen. Die Isotopenverhältnisse der Zirkone deuten auf eine granitische Genese und lassen auf eine anatektische Herkunft des Muskovitgneises schliessen.

Die Untersuchung von Handstücken und Dünnschliffen an frischen Gesteinsproben aus dem Tunnel unterstützen eher die Hypothese von El Tahlawi (1965). Diese lässt sich anhand des Mikrogefüges interpretieren, weil darin oft Aggregatbruchstücke, bestehend aus unter sich verzahnten Quarz-, Kalifeldspat-, Albit- und Muskovitkristallen, die in Form von Klasten in einer kristallisierten Gesteinsmatrix verteilt sind. Innerhalb dieser bruchstückförmigen Aggregate ist ein originales granitisches Gefüge zu erkennen. Während im umliegenden Gestein, dem Stabbiello-Gneis, weit verbreitet duktile Mikrostrukturen sichtbar sind, fehlen sie im Muskovitgneis. Anderseits fehlen die kataklastischen Verformungsstrukturen im Stabbiello-Gneis, diese sind nur im Muskovitgneis sichtbar. Der überdurchschnittlich hohe Karbonatgehalt, vorwiegend Kalzit und Dolomit, nur allein mit hydrothermaler Metamorphose zu erklären, würde grosse Mengen an Fluiden erfordern, vor allem, weil diese Beobachtung sich auf den Muskovitgneis begrenzt. Ein Sedimentgestein, das ursprünglich als Arkose aus granitischen Bruchstücken in Becken und Trögen in einem Stabbiello-Gneis als Substrat abgelagert wurde, könnte den Karbonatgehalt und die Bildung eines brekzienähnlichen, kataklastischen Gefüges überzeugender erklären.

Der leukokrate, Muskovit führende Augengneis ist anhand des massigen, z.T. augigen Gefüges leicht zu erkennen. Gelegentlich sticht eine Foliation aus dem meistens tektonisierten Gefüge heraus. Das Verhältnis zwischen Karbonat, Epidot und Chlorit beeinflusst die Farbe des Gesteins, die im frischen Anschlag zwischen ockergelb und blassgrün erscheint. Zahlreiche Klüfte, die mit Dolomit oder Ankerit mineralisiert sind, geben dem Gestein einen gelblich bis rötlichen Farbstich. Die karbonatreichen Klüfte werden mit sulfitischen (Pyrit) und oxydischen (Hämatit) Erzmineralen ergänzt. In der Regel ist der Muskovit führende Augengneis an der lithologischen Grenze stark tektonisiert und diese mit einer schwarz glänzenden Farbe markiert. In diesem Übergangsbereich kann dort, wo das Gesteinsgefüge nicht vollständig durch Kataklase überprägt wurde, gebänderter Mylonit beobachtet werden.

Das Mikrogefüge ist ungleichkörnig und enthält millimeter bis zentimetergrosse Porphyroblasten, bestehend aus Kalifeldspat, Plagioklas und Quarz, die in einer feinen Matrix aus Muskovit und Kalzit zementiert sind. Kalifeldspat, z.T. mit perthitischem Entmischungsgefüge, ist meistens durch Serizit oder Kalzit subsituiert. Die Korngrenzen der felsischen Minerale haben isometrischen Habitus und sind gelappt oder gezackt. In der Matrix löschen die Quarzkörner undulös aus, sind oft gelängt und betonen zusammen mit lamellenförmigen, zerfransten Muskovitkörnern die Foliation. Im Verformungsschatten von Porphyroblasten ist Mus-

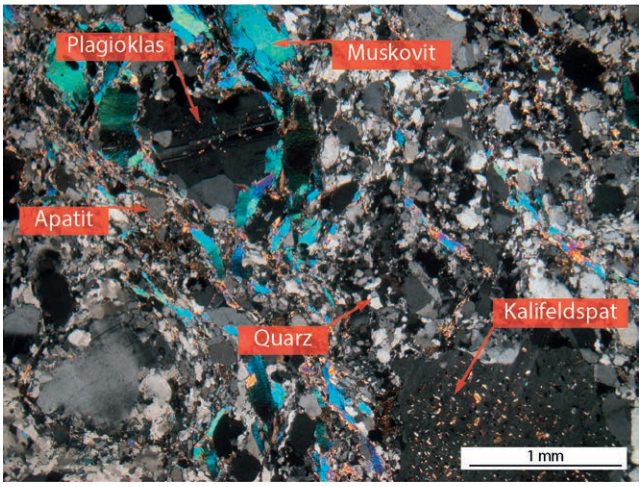


Fig. 3-48: Gesteinsprobe GbC-SE-R-3430.4 in Dünnschliffaufnahme mit polarisiertem Licht, Oströhre km 239.813 zeigt das Mikrogefüge eines Muskovit führenden Augengneises (Foto IG ITC).

kovit ebenfalls mit Quarz und rekristallisiertem Albit vergesellschaftet und gestaltet die geschweiften Schwänze der Sigmaklasten. Akzessorische Minerale sind Epidot, Apatit, Titanit, Zirkon und seltener Granat (GbC-SE-R-3055 bei km 338.020). Opake Minerale sind regelmässig entlang der Foliation oder in den Quarz- und Feldspataggregaten verteilt.

3.1.5 Quartär

Quartäres Lockergestein wurde nur beim Vortrieb beider Portale Vigana (HB 0A) und Vezia (HB 45B) sowie auf einer bautechnisch unbedeutenden Streckenlänge von wenigen Metern beim Portaleinschnitt der FIS angetroffen.

3.1.5.1 Nordportal Vigana

Beim Vortrieb im Portalbereich Vigana bestanden die ersten 18 Meter des Raccordo Caverna Est (Oströhre) bis km 227.536 aus Lockergestein. In der Weströhre lag die Grenze Lockergestein/Fels ab 4 m in der Bretella Lugano–Bellinzona (km 327.537). Die Beschreibung der Stratigraphie beschränkt sich auf makroskopische Beobachtungen aus dem Vortrieb.

Dabei werden drei Lithologien unterschieden: Autobahnaufschüttung, frischer Moräne, und solche mit alter Bodenbildungen.

Das aufgeschüttete Material der Autobahn A2 besteht aus einem Gemisch aus siltigem und sandigem mittel- bis grosskörnigem Kies, mit einzelnen bis 80 cm grossen Steinen. Die kiesigen Komponenten sind mässig gerundet bis eckig. Es gibt Lagen mit Gneisblöcken, die aus dem Ausbruchmaterial des Hangeinschnitts während des Baus der Autobahn stammen. Ausserdem sind siltiger Kies und Linsen aus umgearbeitetem Boden aufgeschlossen.

Der alte Boden enthält mittel- bis grosskörnigen siltigen Sand mit seltenen Blöcken, Wurzeln oder organischem Material.

Die Moräne besteht aus mittel- bis grosskörnigem siltigem Kies mit sandigen Horizonten. Die Komponenten variieren zwischen kantig bis gerundet.

3.1.5.2 Südportal Vezia

Während der Grabungsarbeiten der offenen Tagebaustrecke Vezia wurden im Lockergestein zwei unterschiedliche Lithologien angetroffen. Im südlichen Abschnitt liegen auf dem Festgestein aus Stabbiello-Gneis vorwiegend

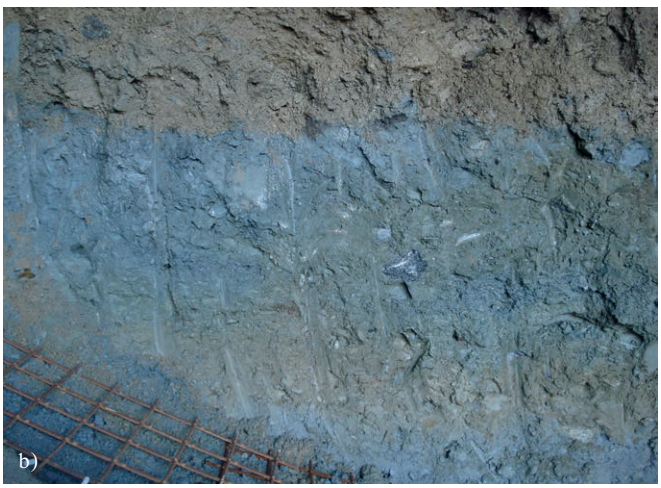


Fig. 3-49: a) Kalottenvortrieb im Raccordo Caverna Est km 227.520 (Oströhre) mit Aufschüttmaterial der Autobahn A2. b) Moränenablagerung mit siltigem Sand (grau) bei km 227.526 im Sohlgewölbestollen Ost und c) detaillierte Aufnahme eines Gesteinsblocks aus Gneis (Fotos IG ITC).

tonige Gletscherablagerungen während im nördlichen Abschnitt siltige Alluvionen abgelagert wurden. Die Mächtigkeit der Lockergesteinsbedeckung beträgt im Portalberreich rund 5–8 m. Das geologische Modell erklärt und interpretiert die glaziale und postglaziale Morphogenese anhand der angetroffenen Oberflächenablagerungen (Fig. 3-51). Diese Erkenntnisse waren Grundlage für das hydrogeologische Modell und halfen bei der Einstscheidung für die Drainagemassnahmen während den Grabungsarbeiten der offenen Tagebaustelle (Kap. 5.3.2).

Fig. 3-50: Grenze zwischen Lockergestein und Festgestein mit Abfolge von detritischem Material (oben), Moräne (in der Mitte) über dem Ceneri-Paragneis (unten) (Foto IG ITC).

Die glaziale Erosion formte im Westen der Villa Negroni eine Gletscherterrasse mit unregelmässiger Oberfläche und einem tiefen Einschnitt in Richtung Südwesten, welcher heute dem Rinnsal Casaccia entsprechen würde. Der Gletscher hinterliess in diesem Einschnitt eine stark verdichtete Ablagerung aus siltigem Ton.

In weiter stromaufwärts gelegenen Bereichen der Casaccia lagerten sich, besonders während Hochwasserereignissen, abgestufte fluviale Sedimente (hauptsächlich Sand) zu einem Bachkegel, welcher zwischen dem Felsen im Norden und den Gletscherablagerungen im Süden liegt. Gegeben durch die Morphologie der Felsoberfläche und der Flussablagerungen verlagerte sich die Casaccia mit der Zeit in ihren heutigen Verlauf weiter nördlich.

Flussablagerungen

Zu den Flussablagerugen (Fig. 3-52 a) zählt siltiger Sand mit Schichtmächtigkeiten bis zu 10 cm, welcher im Delta eine maximale Mächtigkeit bis zu 5 m erreicht. Die Schichten fallen im Abschnitt Süd rund 10° in Richtung Südsüdwesten ein, während sie im Abschnitt Nord in Richtung Westen gerichtet sind.

Toniger Silt ohne erkennbare Struktur, zusammen mit sandigen Ablagerungen, lassen sich als Extensions- und Erosionsphase während der Ablagerung von Alluvionen im Flussdelta interpretieren.

Die feinen Sande mit gleichmässiger Kornverteilung zeugen von einem mäandrierenden Fluss mit geringerer Strömungsenergie.

Gletscherablagerungen

Die Gletscherablagerungen sind weniger vielfältig gestaltet als die Flussablagerungen und bestehen aus siltigen Ton mit Steinen und Blöcken, der in Erosionsmulden liegt (Fig. 3-52 b). Die Mächtigkeit beträgt zwischen 1–5 m. Mit einer Länge von 50 m befindet sich die grösste Ablagerung im südlichen Abschnitt. Das Gefüge ist mehrheitlich chaotisch und beinhaltet Gesteinsblöcke, die vermutlich aus dem Gebiet des Val-Collas stammen.

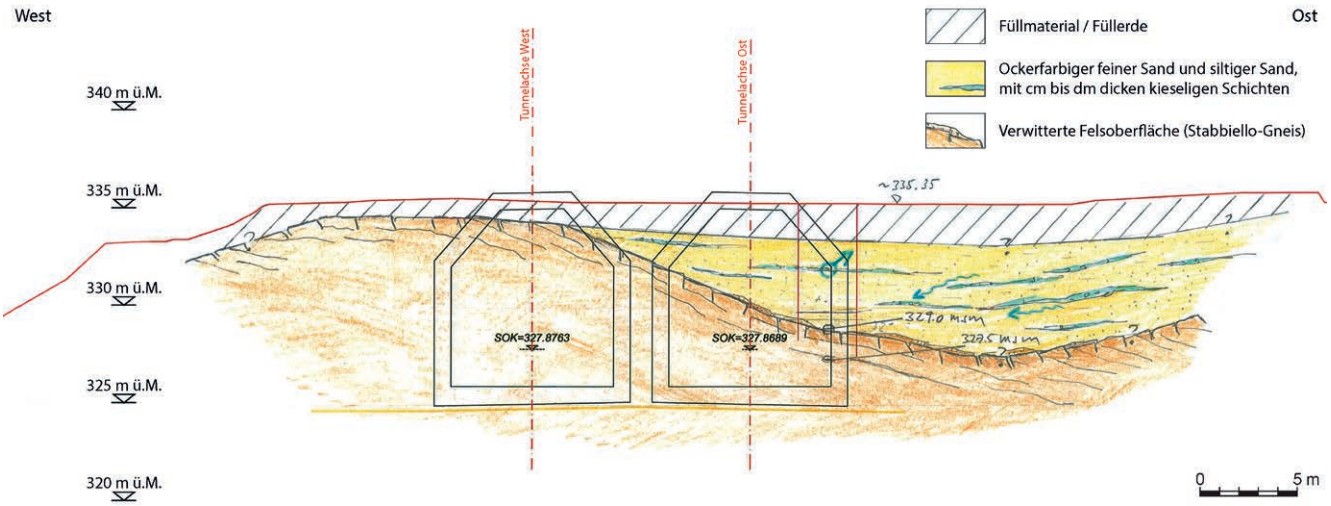


Fig. 3-51: Querprofil bei km 242.833 zeigt das geologische Modell der Tagebaustrecke mit dem Kontakt Festgestein-Lockergestein (Figur: D. Pozzorini, Dr. Baumer SA).

Fig. 3-52: a) Im Abschnitt Süd ist geschichteter siltiger Sand der Flussablagerung aufgeschlossen. b) Im gleichen Abschnitt weiter südlich haben die Grabungsarbeiten die obersten Schichten der Gletscherablagerungen bestehend aus siltigem Ton freigelegt (graue Farbe) (Fotos IG ITC).

Fig. 3-53: Freigelegte verwitterte Felsoberfläche im nördlichen Abschnitt der offenen Tagebaustrecke mit Blick auf die künftige Portalwand für den Vortrieb im Festgestein (Foto IG ITC).

Abgestufter siltiger Kies befindet sich an der Basis und in den obersten Schichten der Gletscherablagerungen.

Die verwitterte Schicht an der Felsoberfläche (Fig. 3-53) ist mit 1–2 m Mächtigkeit sehr dünn. Der Fels unterhalb des Lockergesteins besteht aus Zweiglimmergneis der Stabbiello-Gneis-Formation.

3.2 Vergleich zwischen Prognose und Befund

3.2.1 Homogenbereiche (HB)

Der geologische Befund basiert auf den petrographischen, strukturellen, tektonischen, geotechnischen und hydrogeologischen Untersuchungen und bestätigt das Prognosemodell der Homogenbereiche (HB). Zusammen mit den neuen oder geänderten Homogenbereichen ergeben sich insgesamt 51 Homogenbereiche; im Vergleich dazu enthielt die Prognose deren 49 (Anh. 13-1).

Neue oder geänderte Homogenbereiche, mit Ausnahme der Homogenbereiche 30A und 30B in der Val-Colla-Linie, erhielten die Endung «bis», z.B. Homogenbereich 26Bbis, damit ein Bezug zu den im Projekt definierten Homogenbereichen erhalten bleibt.

Die folgende Tabelle 3-3 fasst alle Homogenbereiche im Befund zusammen und vergleicht diese mit der Prognose.

Tab. 3-3: *Abfolgen und Längen der Homogenbereiche im Vergleich Prognose – Befund.* [1] *In dieser tektonischen Position nicht angetroffen.*

HB	Länge Prognose		Länge Befund		Formation
	Oströhre [m]	Weströhre [m]	Oströhre [m]	Weströhre [m]	
			Nördliche Ceneri-Zone		
0A	36	21	18	4	Lockergestein/Ceneri-Paragneis
0B	21	21	6	10	Ceneri-Paragneis
1A	195	195	37	40	Ceneri-Orthogneis
1Bbis	–	–	90	82	Ceneri-Paragneis
1Abis	–	–	24	41	Ceneri-Orthogneis
1B	305	245	401	362	Ceneri-Paragneis
1C	55	50	[1] (TO 1Cbis)		SZ km 228.100 Sasso
1Cbis	–	–	79	121	SZ km 228.130
1D	390	425	29	28	Ceneri-Paragneis
1Dbis	–	–	382	345	Ceneri-Orthogneis (+Paragneis)
2	25	25	nicht angetroffen		SZ km 228.530 Val Pagana
3	665	685	1039	1117	Ceneri-Paragneis
5	160	170	nicht angetroffen		Mischgneis
6A	1250	1230	997	917	Ceneri-Paragneis
6B	115	100	73	67	Ceneri-Paragneis
6C	–	–	73	81	SZ
7	35	35	in 10A angetroffen	in 6C angetroffen	SZ km 230.750 Pianturino-Albarina
10A	45	40	51	45	Ceneri-Paragneis
10B	105	100	156	155	SZ Pianascio
10C	800	835	549	554	Ceneri-Paragneis (Hornfels)
12Abis	–	–	144	145	SZ Val Mara
			Mittlere Ceneri-Zone		
10Cbis	–	–	124	145	Ceneri-Paragneis (-OGC)
11	55	35	13	31	Hornfels
12A	30	30	[1] TO 12Abis		SZ km 231.790 Val Mara
13A	465	575	924	967	Ceneri-Orthogneis
13B	45	40	nicht angetroffen		SZ km 232.290
13C	735	780	nicht angetroffen		Ceneri-Orthogneis
14	150	155	374	405	Ceneri-Paragneis (-OGC)
15A	20	15	nicht angetroffen		Hornfels
15B	105	110	[1] (TO 15Bbis)		SZ km 233.270 Subparallelismus
15Bbis	–	–	475	480	Intensiv tektonisierte Zone (ITZ)
15C	25	40	21	–	Hornfels
16A	330	305	221	186	Ceneri-Paragneis
16B	475	475	322	252	Ceneri-Orthogneis
20	–	–	–	15	B-UBC (-PGC)
17	70	50	18	110	SZ km 234.190 Alpe Zalto
20	535	510	765	870	B-UBC (-PGC)
21	220	220	nicht angetroffen		Mischgneis
21bis	–	–	253	151	Ceneri-Paragneis (-OGC)
22	100	100	67	89	Ceneri-Orthogneis
24+25	445	455	nicht angetroffen		Mischgneis
24+25bis	–	–	79	139	Ceneri-Paragneis (-OGC)

HB	Länge Prognose		Länge Befund		Formation
	Oströhre [m]	Weströhre [m]	Oströhre [m]	Weströhre [m]	
			Südliche Ceneri-Zone		
26A	35	35	32	39	SZ km 234.190 Alpe Zalto
26B	40	30	–	–	
26Bbis	–	–	241	132.8	Giumello-Gneis
27bis	–	–	15	34.9	SZ 27bis.1, roccia di faglia GGium
28A	423	341	431	335	Giumello-Gneis bisCAOP
27	45	45	27	24	SZ 27.1, roccia di faglia GGium
28B	397	398	397	398	Giumello-Gneis CAOP
28C	1085	1136	899	1041	Giumello-Gneis bis LVC
			Val-Colla-Linie		
30	620	590	In 30A und 30B		LVC
30A	–	–	166	120	SZ 30A.1, zerscherter Fels der LVC
30B	–	–	492	409	Gneis, Schiefer und Phyllonit der LVC
			Nördliche Val-Colla-Zone		
31	430	410	650	649	Stabbiello-Gneis
32	750	730	672	680	Stabbiello-Gneis
			Südliche Val-Colla-Zone		
33	90	105	146	103	Bernardo-Orthogneis
34	310	315	nicht angetroffen		Stabbiello-Gneis
35-38A	800	820	1220	1556	Stabbiello-Gneis
38C	560	600	310	81	Bernardo-Orthogneis
39-42	950	940	1030	970	Stabbiello-Gneis
43	140	209	200	150	Stabbiello-Gneis
44	183	–	134	99	Stabbiello-Gneis
45A	353	301	339	303	Stabbiello-Gneis
45B	224	191	237	189	Stabbiello-Gneis
Total	**15442**	**15268**	**15442**	**15268**	

3.2.2 Petrographie

3.2.2.1 Ceneri-Paragneis

Im Hinblick auf die petrographische Beschaffenheit der Ceneri-Paragneis-Formation, die in der Prognose als sehr variabel beschrieben wurde, ermöglicht der Befund eine lückenlose Beschreibung und Zuordnung des angetroffenen Ceneri-Paragneises in drei Lithotypen, nämlich Granat führender Biotitgneis, Granat-Kyanit-Staurolith führender Muskovitschiefer und Granat-Kyanit-Staurolith führender Zweiglimmergneis oder Schiefer.

In allen drei Ceneri-Paragneis-Lithotypen ist mikroskopisch eine mineralogische Variabilität zu beobachten, nämlich indem der Gehalt an Schicht- und Alumosilikaten, insbesondere Granat, gegenüber der Prognose überwiegt.

Dieses Ergebnis deutet auf eine metasedimentäre Herkunft des Ceneri-Paragneises hin und zeigt die Komplexität der tektonischen Stellung im sedimentären Becken und späteren Subduktionskeil zusammen mit dem Giumello-Gneis.

Der Befund bestätigt die prognostizierte Variabilität der Lithologien und ermöglichte die angetroffenen Lithologien ausführlich zu Beschreiben. Weil die Grenze «Mischgneis»–Ceneri-Paragneis nicht angetroffen wurde, trat der Ceneri-Paragneis auf einer längeren Strecke im Tunnel auf.

3.2.2.2 Aufhebung der Terminologie «Mischgneis»

Beim Nordvortrieb Baulos Sigirino konnte nach dem Durchörtern des Giumello-Gneises keine lithologische Grenze zwischen «Mischgneis» und Ceneri-Paragneis festgestellt werden, weil die Gesteinstextur und die petrographische Zusammensetzung beider Formationen identisch waren und in beiden Formationen Gesteine mit migmatischer Textur angetroffen wurden.

Die Bezeichnung «Mischgneis» hat eine historische Bedeutung, der zu Beginn des 20. Jahrhunderts zur Beschreibung so genannter «injektionsmetamorpher Prozesse» verwendet wurde. Während der geologischen Kartierung der Kartenblätter Bellinzona (Bächlin et al. 1974) und Tesserete

(Reinhard et al. 1962) waren die Begriffe «Migmatisierung» und «Anatexis» noch nicht im Gebrauch. Die geologische Prognose des CBT basierte auf der lithologischen Beschreibung der bestehenden geologischen Kartenblätter des Geologischen Atlas der Schweiz.

Nach der Prüfung mittels petrographischer Untersuchung von Dünnschliffen und neuen Feldbegehungen an der Oberfläche resultierte, dass anhand des Kriteriums «migmatische Texturen» im Paragneis kartographisch kein «Mischgneis» ausgeschieden werden können.

Der Begriff «Mischgneis» wurde danach nicht mehr verwendet, da er für eine objektive petrographische Beschreibung *sensu stricto* ungeeignet ist. Die Gesamtheit der Lithologien, die in der Prognose dem «Mischgneis» zugeordnet waren, wurde demnach zur Ceneri-Paragneis-Formation gezählt, welche aufgrund ihres Mineralgehalts gut in eine der drei Lithotypen des Ceneri-Paragneises hineinpassen.

3.2.2.3 Ceneri-Orthogneis

Der Befund bestätigt weitgehend die lithologischen Varietäten der Prognose. Der Ceneri-Orthogneis erstreckt sich wie an der Oberfläche hauptsächlich innerhalb der mittleren Ceneri-Zone zwischen Val Mara im Norden und Taverne im Süden.

Einige kleinere Vorkommen sind der Ceneri-Paragneis-Formation untergeordnet eingestreut; sie wurden beim Vortrieb in der nördlichen Ceneri-Zone verstreut angetroffen.

Zweiglimmergneis, Chlorit und Epidot führender Zweiglimmergneis, leukokrater, Muskovit führender Zweiglimmergneis und Biotit, Hornblende und Epidot führender Gneis sind die fünf Lithotypen, welche sich petrographisch anhand des variablen Mineralgehalts voneinander unterscheiden lassen. Für die beiden Hauptkomponenten Quarz und Feldspat lässt sich ein leicht höherer Quarzgehalt als in der Prognose beobachten, ansonsten entspricht die Mineralogie der Prognose.

3.2.2.4 Hornfels

Die Hornfels-Formation im Befund zeigt ähnliche petrographische Eigenschaften wie in der Prognose und ist analog zu den Proben aus dem CPS, FIS und Kernbohrung CB84. Der Quarzgehalt ist in den Gesteinsproben des CBT höher, handkehrum enthalten diese weniger Feldspat (ausschliesslich Plagioklas).

Der Quarzgehalt in den Gesteinsproben ist höher als prognostiziert. Auf der anderen Seite gibt es eine geringere Menge Feldspat und ausschliesslich Plagioklas. Diese Unterschiede könnten auf lokale petrographische Variationen zurückzuführen sein.

Aus den mikroskopischen Untersuchungen der Dünnschliffe ergaben sich keine weiteren eindeutigen Hinweise auf die Genese dieser Gesteine, denn Leitminerale wie Cordierit oder Sillimanit wurden nicht systematisch nachgewiesen. Es wird angenommen, dass sie mit den Ereignissen der Kontaktmetamorphose oder mit anatektischen Prozessen des Ceneri-Orthogneises assoziiert sind.

3.2.2.5 Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone

Gemäss Prognose enthielt die geologische Formation der Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone ein Gemisch aus basischen Lithotypen wie Amphibolit, Metagabbro, Amphibol und/oder Pyroxen führender Gneis und Schiefer aber auch ultrabasische Lithotypen mit Serpentinit und Olivin oder Pyroxen führenden Gesteinen. Dieser basische und ultrabasische Gesteinskomplex verläuft in der mittleren Ceneri-Zone zwischen Val Mara (Isone/Medeglia) und ausserhalb der beiden Tunnelröhren westlich durch den FIS und CPS weiter bis kurz vor die Val-Colla-Linie.

Die im CBT angetroffenen Lithotypen der Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone setzen sich zusammen aus einer Wechsellagerung von basischen Horizonten, Amphibol führendem Gneis und Glimmerschiefer der Ceneri-Paragneis-Formation, die dem Gestein oft eine Bänderung verleiht. Entgegen der Prognose fehlten im Befund Pyroxen führender Gneis und Metagabbro.

Ultrabasische Gesteine, wie Serpentinit oder Olivin führender Gneis, welche in der Prognose nach den Erkenntnissen der Kernborrung CB84, FIS und CPS nicht auf dem Tunnelniveau der Vortriebe Baulos Sirigino zu erwarten waren, wurden beim Vortrieb nicht angetroffen.

Der Gehalt an Schichtsilikaten ist deutlich niedriger als in der Prognose, während beim Befund ein höherer Hornblendegehalt festgestellt wurde. Die Gehalte an Plagioklas und Quarz entsprechen der Prognose, während der Karbonatgehalt (Kalzit und Dolomit) im Befund mit der grösseren Anzahl mineralisierter Klüfte korreliert.

3.2.2.6 Metabasische Ganggesteine

Einzelne basische Ganggesteine traten im CBT zwischen Val d'Isone und Gola di Lago in den Homogenbereichen 10B – 15Bbis auf. Es handelt sich dabei um Augit-Spessartit und Hornblende-Spessartit mit ähnlicher Mächtigkeit und petrographischen Eigenschaften wie die Ganggesteine aus den Kernbohrungen CB84, CB86 und CB86bis im Val d'Isone.

Die Ganggesteine im CBT zeigen im Gegensatz zu den Handstücken der Prognose keine Mineralisierung von Pyrrhotit, Chalkopyrit und vor allem Pyrit, welche als bekannte Mineralvorkommen in der Region Medeglia und im Autobahntunnel Monte Ceneri gelten.

3.2.2.7 Giumello-Gneis

In der Giumello-Gneis-Formation lassen sich zwei Lithotypen unterscheiden: Granat führender Zweiglimmergneis und Granat-Kyanit-Staurolith führender Glimmerschiefer; es sind die beiden Lithotyp-Endglieder, zwischen welchen die Mineralogie des Giumello-Gneis variieren kann.

Die petrographische Zusammensetzung des Granat führenden Zweiglimmergneises entspricht den in der Prognose beschriebenen Biotit- und Muskovit-Gneisen. Der Granat-Kyanit-Staurolith führende Glimmerschiefer hat ebenfalls eine ähnlich mineralogische Zusammensetzung wie der prognostizierte Muskovitschiefer.

Wie bereits angedeutet, weist der Giumello-Gneis einen beträchtlichen Streubereich des Gehalts an Quarz, Feldspat

und Glimmer auf, welcher deutlich den Prognosewert übersteigt. In Vergleich zur Prognose besteht eine Tendenz zu einem höheren Gehalt an Quarz und umgekehrt zu einem geringeren Gehalt an Feldspäten. Der glimmerreiche Lithotyp enthält mehr Alumosilikate als erwartet.

Nahe der Südgrenze zwischen Giumello Gneis und der Val-Colla-Linie (Übergang vom HB 28C zum HB 30A) ist der Vortrieb auf hellen Serizit führenden Glimmerschiefer gestossen, der zur Giumello-Gneis-Formation gehören. Dieser Lithotyp war nicht prognostiziert; dessen Verglimmerung ist wahrscheinlich mit der Zirkulation von Fluiden an der Nordgrenze der Val-Colla-Linie in Verbindung zu bringen.

3.2.2.8 Phyllonit, Mylonit, Schiefer und Gneis der Val-Colla-Linie

Die Verteilung der angetroffenen Lithotypen unterscheidet sich gegenüber dem Prognosemodell, was die Ausgangslage für die Unterteilung der Val-Colla-Linie in den Homogenbereichen 30A und 30B war. So sind im Homogenbereich 30A hauptsächlich Gesteine des Lithotyps 2 und 3 angetroffen worden, während der Homogenbereich 30B vorwiegend aus den Lithotypen la und lb besteht.

Sowohl hinsichtlich der LVC-FM als auch der LVC-GS unterscheiden sich die Mineralgehalte beim Befund nur geringfügig von denen der Prognose.

3.2.2.9 Stabbiello-Gneis

Im Vergleich zur Prognose (Serizitschiefer und Gneis mit Alumosilikaten mit phyllitähnlichen Lagen), liessen sich im Vortrieb beim Stabbiello-Gneis fünf Lithotypen unterscheiden.

Der Hauptanteil des Gebirges in der Val-Colla-Zone besteht aus den folgenden Lithologien:

- Muskovit-Granat-Kalifeldspat führender Gneis und Schiefer
- Granat führender Biotitgneis
- Granat und Serizit führender Muskovitschiefer
- Alumosililikat führender Zweiglimmergneise und Schiefer
- Muskovit-Granat-Kalifeldspat führender Gneis und Schiefer.

Es ist wahrscheinlich, dass der angetroffene Granat und Serizit führende Muskovitschiefer mit den auffälligen S-C'-Strukturen, zu den in der Prognose beschriebenen phyllitreichen Horizonte innerhalb der Stabbiello-Gneis-Formation gehört.

Die auffällig hohe mineralogische Variabilität in den fünf angetroffenen Lithotypen, und besonders der höhere Gehalt an Schichtsilikaten und Granat, zeigen eine Abweichung von der Prognose.

3.2.2.10 Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone

In der Prognose waren zwei Lithotypen für die Formation der Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone definiert. Demnach stellen die Basite Amphibolite dar und die semibasischen Gesteine Amphibol führende Gneise und Schiefer, welche im Stabbiello-Gneis isoliert und linsenförmig hauptsächlich in der nördlichen Val-Colla-Zone auftreten.

Der Befund bestätigt sich teilweise mit dem Auftreten des semibasischen Lithotyps in Form von Bänderamphibolit und Granat-Amphibol führendem Gneis. Weder beim Südvortrieb in Sigirino noch im Portalbereich Vezia wurde dieser prognostizierte Amphibolit-Lithotyp angetroffen.

Aufgrund der mikroskopischen Untersuchungen sind im Vergleich zur Prognose Unterschiede in der Verteilung des Mineralgehalts im Gestein zu erkennen. Besonders auffällig ist der geringere Quarzgehalt, während der Amphibolgehalt deutlich höher liegt. Der Karbonatgehalt variiert je nach der Anzahl Klüfte stark, liegt aber generell über dem Prognosewert.

3.2.2.11 Bernardo-Orthogneis

Der Bernardo-Orthogneis ist gemäss Projektbeschreibung homogen, beinhaltet mehrheitlich Muskovit und Feldspat und weist eine ausgeprägte Schieferung mit augiger Textur auf.

Er bildet an der Oberfläche eine markante Hügellandschaft, insbesondere im Gebiet des Lago d'Origlio. Untertage war er in Form von Horizonten oder grösseren Körpern im Stabbiello-Gneis eingebettet prognostiziert worden, welche die Homogenbereiche 33 und 38C definieren.

Die angetroffenen Aufschlüsse beim Vortrieb bestätigen weitgehend die petrographische Prognose. Der Bernardo-Orthogneis scheint jedoch, gegeben durch die lamellare Textur, bei duktiler Mylonitisierung und durch kataklastische Beanspruchung eine grössere Tendenz zu tektonischer Verformung zu zeigen. Diese Beobachtung könnte eine signifikante Bedeutung für die tektonische und metamorphe Evolution des Bernardo-Orthogneises haben, denn gemäss Literatur ist nicht eindeutig geklärt, ob der Bernardo-Orthogneis eine sedimentäre oder magmatische Herkunft hat (vgl. Kap. 3.1.4.3). Im Befund wird dieser als leukokrater, Muskovit führender Augengneis beschrieben.

Zu den Hauptmineralen des Bernardo-Orthogneises zählen Quarz, Phyllosilikate (überwiegend Muskovit und Serizit) und Feldspat. Im Vergleich zur Prognose besteht eine deutlich grössere Variabilität des Mineralgehalts. Der Bernardo-Orthogneis wird aber aufgrund der geringmächtigen Vorkommen untertage lithologisch nicht weiter unterteilt.

Bestätigt wurde beim Befund ebenfalls der höhere Anteil von Kalifeldspat und Karbonat (vorwiegend Kalzit und Dolomit, z.T. Ankerit) in den Kluftfüllungen.

4. Gesteinsgefüge und systematische Durchtrennung des Gebirges

Dieses Kapitel dokumentiert den Befund bezüglich des Gesteinsgefüges und der systematischen Durchtrennung des Gebirges. Die während der Ortsbrustaufnahmen gemessenen Orientierungen der Trennflächen wurden mittels statistischer Analyse in Familien gruppiert. Die Visualisierung der räumlichen Orientierung und geometrischen Verhältnisse geschieht mit Hilfe der stereographischen Projektion auf die untere Halbkugel. Für die statistische Analyse und Visualisierung wurde die Software Dips 6.0 (Rocscience) verwendet.

Der Streubereich der statistischen Auswertung entspricht einem Kleinkreis in der stereographischen Projektion, welcher gleichzeitig die Trennflächenfamilie (Kluftschar, Schieferung oder Störung) definiert. In der Software Dips wird die Grösse des Kleinkreises für die Statistik so gewählt, dass 95,44% der Zenitwinkel einer gemessenen Trennfläche innerhalb des Kleinkreises liegen (Hammah & Curran 1998). Werte mit geringer Repräsentativität sind nicht aufgeführt.

Die Schieferung ist eines der strukturgeologischen Hauptelemente, welches die Anisotropie des Gebirges und die damit verbundenen felsmechanischen «Schwächezonen» bestimmt. Diese treten hauptsächlich in einem Gebirge mit gneisiger bis schiefriger Textur auf. Als Grundlage diente die Einstufung der Schieferungsflächen gemäss Tabelle 4-1. Die Schieferungsflächen sind durch die eingeregelten blätterförmigen Schichtsilikate gegeben und führen zu Ausbruchsflächen, welche Ablösungen des Gebirges im Tunnelprofil begünstigen (Kap. 10.2.2). Diese Schieferungsebene kann eine variable Ebenheit und Rauhigkeit aufweisen und in tektonisierten Bereichen (z.B. Störungszonen) gefaltet oder krenuliert sein.

Die Auswertung der Schieferung führt zu einer Einteilung des Gebirges in vier grosstektonische Einheiten, welche bereits in der Prognose enthalten waren:

- Nördliche Ceneri-Zone, Homogenbereiche 0B–1B, generell steil nach Norden einfallend (350/65) und danach bis Homogenbereich 12Abis mit mittlerem Einfallen Richtung SSW (200/40).
- Mittlere und südliche Ceneri-Zone, Homogenbereiche 10Cbis–28C, ist gekennzeichnet durch den strukturgeologischen «Subparallelisimus» mit Einfallen der Strukturen nach SE (104–140/30–70).
- Val-Colla-Linie Homogenbereiche 30A und 30B, Rotation der Schieferung von 103/76 an der Nordgrenze nach 355/45 an der Südgrenze.
- Nördliche Val-Colla-Zone, gefaltet, steilstehend (003/78 und 188/86), danach in der südlichen Val-Colla-Zone vorwiegend wellig flach, z.T. gefaltet.
- Die Störungen lassen sich in neun Hauptfamilien mit je einem konjugierten System unterteilen. Die in der nördlichen Ceneri-Zone am häufigsten angetroffene Störungszonenfamilie (127/81) fällt steil in Richtung SW ein. Vier Störungszonenfamilien im interpretierten Riedel-Struktur-Modell mit Auf- und Abschiebung sind Teil des dextralen Transpressivsystems der Insubrischen Linie.

Die statistische Auswertung nach Mächtigkeit und Beschaffenheit zeigt, dass 80% der Harnischflächen oder Scherzonen kleiner als 5 cm (Stufe 1) sind, 8,3% kataklastische Störungen 5–20 cm (Stufe 2b) enthalten, während die einen bis mehrere Meter mächtigen kataklastischen-kakiritischen Störungen 11,4% ausmachen.

Die Kluftscharen verteilen sich über neun Hauptkluftscharen, drei davon sind charakterisiert durch flaches bis mittleres und fünf durch steiles Einfallen. In neun der insgesamt 22 Homogenbereiche bilden vier der angetroffenen Hauptkluftscharen zwei konjugierte Systeme. Alle Hauptkluftscharen sind kontinuierlich in allen tektonischen Einheiten anzutreffen, am häufigsten ist hingegen die Hauptkluftschar (087/77) in der nördlichen Ceneri-Zone.

4.1 Trennflächen

4.1.1 Schieferung

Die Tabelle im Anhang 13-e fasst alle beim Vortrieb der beiden Einspurtunnel angetroffenen Schieferungsfamilien zusammen. Einen Teil der angetroffenen Schieferungsfamilien zwischen den Homogenbereichen 0B (Insubrische Linie) und 31 (Tesserete-Grona-Linie) können mit der alpinen Metamorphose in Verbindung gebracht werden, wie beispielsweise die dextrale Blattverschiebung der Insubrischen Linie (Kap. 4.3). Die allgemeine Orientierung der gefalteten Schieferung der mittleren Ceneri-Zone bis zur Grenze der Giumello-Gneis-Formation, liegt senkrecht zur alpinen Hauptspannungsrichtung σ_1. Weiter südlich, in der Giumello-Gneis-Formation der südlichen Ceneri-Zone biegt die die Schieferung gegen Osten um und kann als Relikt der präalpinen Tektonik betrachtet werden. Südlich der Val-Colla-Linie sind die subhorizontalen Schieferungsflächen präalpin mit einer orobischen oder kaledonischen Tektonik zu verbinden.

Tab. 4-1: *Einstufung der Schieferungsflächen nach Trennflächenabständen (Bankung).*

Beschreibung	Abstand (cm)	Stufe
ungebankt	>1000	0
grob bis sehr grob gebankt	50–1000	1
dünn gebankt	15–50	2
gebankt	5–15	3
plattig	0,5–5	4
schiefrig bis phyllitisch	<0.5	5

4.1.1.1 Portalbereich Vigana, nördliche Ceneri-Zone

Die Analyse mittels stereographischer Projektion der Schieferungsorientierungen zeigt eine Unterteilung in zwei strukturelle Domänen: Steil nach Norden einfallende (347/66) Schieferungsflächen bis zu Beginn des Homogenbereichs 1B (gestrichelte Linie in Fig. 4-1), ein Umbiegen in den Homogenbereichen 1B und 1Cbis (schwarzer Pfeil in Fig. 4-1) mit z.T. flacher Schieferung (173/10) und eine anschliessende Einregelung der Schieferung mit Trend zu Südfallen (198/33) ab dem Nordvortrieb Sigirino (HB 1Dbis).

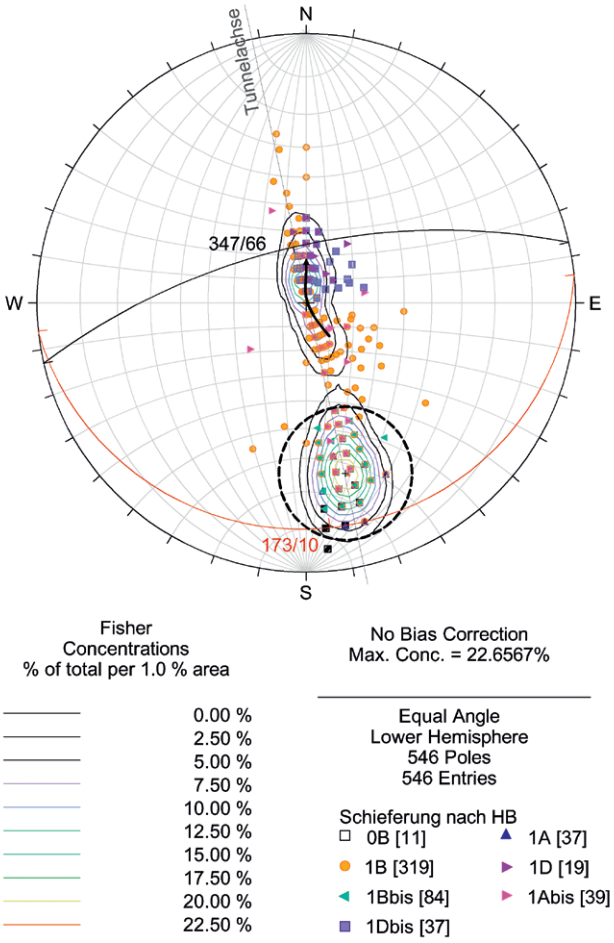


Fig. 4-1: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Schieferungsflächen im Portalbereich Vigana. Schwarzer Pfeil = Umbiegen der Schieferung, gestrichelte Linie = steilstehende Schieferung. Die Domäne mit steilstehender Schieferung in Richtung Norden ist als gestrichelter Kreis markiert.

Die steilstehende, bergwärts ausfallende Schieferung bewirkte im Vortrieb hauptsächlich Ortsbrustinstabilitäten durch herausgleitende Gesteinsplatten und -blöcken bei gebankten bis dünn gebankten Trennflächenabständen. Die subhorizontale Lage der Schieferung brachte im Firstgewölbe geologische Überprofile durch Ablösungen.

4.1.1.2 Nördliche und mittlere Ceneri-Zone

Die gesamte Strecke der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone ist geprägt von der Hauptschieferung, bezeichnet als S_2 (Oppizzi 1995) und bildet eine planare Gebirgsanisotropie durch die Ausrichtung der Glimmerminerale der Quarz- und Feldspat reichen Lagen (Kap. 3.1). Die planare Anisotropie bestimmte die geologischen Ereignisse beim Vortrieb massgebend.

Beim Vortrieb waren häufig isoklinale Falten mit variabler Richtung der Faltenachse erkennbar, dessen Achsenebenen subparallel zur Hauptschieferung verlaufen sowie zahlreiche duktile oder semiduktile Scherzonen (Taf. I, Oströhre km 230.750). Diese beiden Strukturen sind verantwortlich für die hohen Streubereiche der Orientierung innerhalb der Schieferungsfamilie (Fig. 4-3).

Die Beobachtungen an der Ortsbrust zeigen metergrosse isoklinale Falten (Fig. 4-2) mit z.T. flach bis steil einfallenden Faltenachsen (10–70°) in Richtung SE–SW in der nördlichen Ceneri-Zone und niedrigem Einfallswinkel (10–30°) und überwiegender NE Richtung in der mittleren Ceneri-Zone.

Die steil einfallenden Faltenachsen in der nördlichen Ceneri-Zone, welche näher an der dextralen Blattverschiebung der Insubrischen Linie liegen, lassen vermuten, dass sie mit der Bildung der «Schlingentektonik» im mittleren bis oberen Paläozoikum zusammenhängen, während die flachliegenden Faltenachsen weiter südlich älter sind (kaledonisches Alter). Anhand der geringen Anzahl von aufgenommenen Faltenachsen ist eine genaue Interpretation und Unterscheidung der tektonischen Ereignisse schwierig, weil zusätzlich die orobische Exhumierungsphase die Faltenachsen in der Ceneri-Zone gekippt und zurückgedreht hatte.

Fig. 4-2: Reliktische präalpine (kaledonische?) Falte. Diese unterscheiden sich im Vergleich zu den angetroffenen isoklinalen (alpinen) Falten durch ihre steil einfallenden Faltenachsen. Ceneri-Paragneis im Störungszonenbereich, Weströhre km 331.375 (Foto IG ITC).

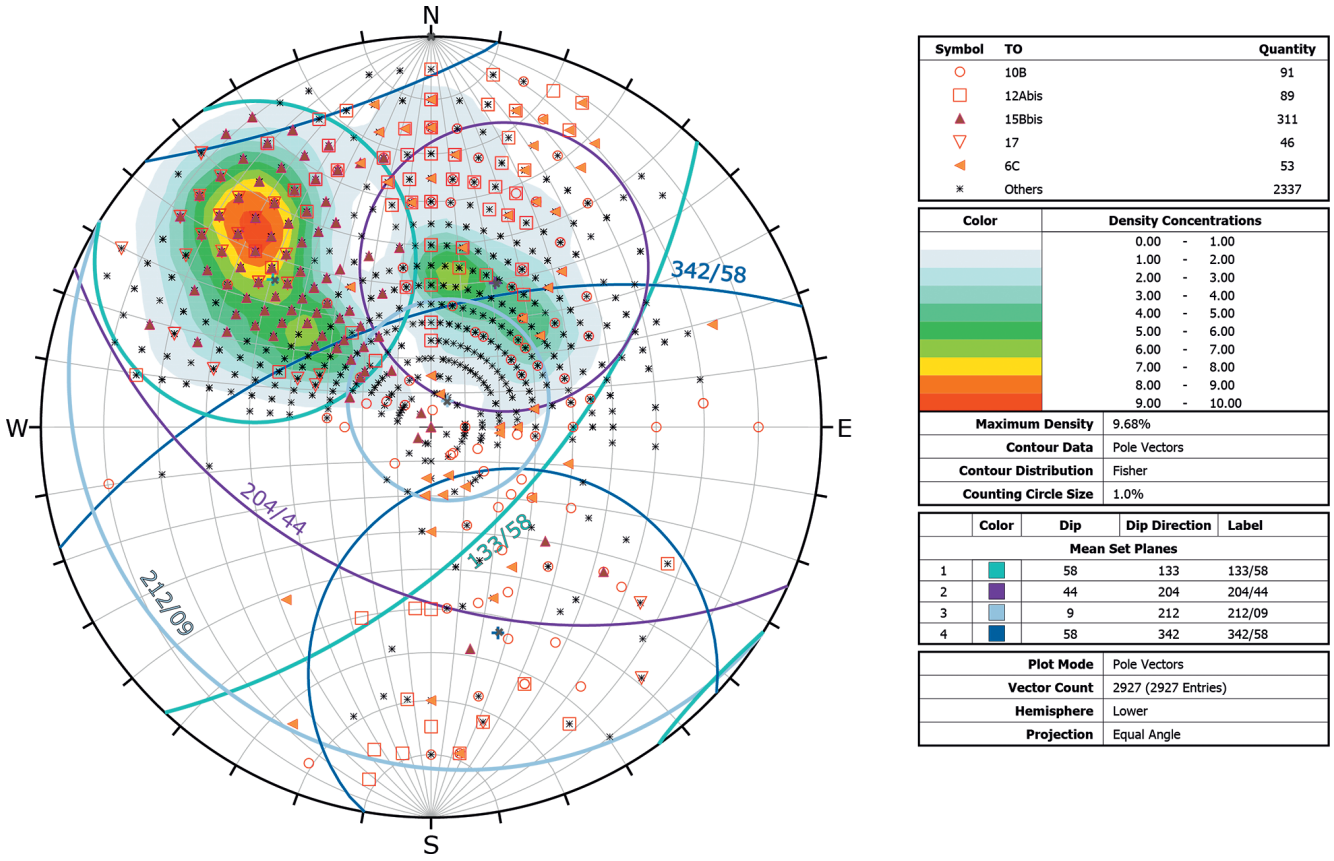


Fig. 4-3: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Schieferungsflächen in der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone. Die Kleinkreise umfassen den Streubereich innerhalb der Schieferungsfamilie. Variation der Tunnelachse: 350–035° Azimut.

Einer der wichtigsten tektonischen Übergänge der Ceneri-Zone bildet die Grenze zwischen nördlicher und mittlerer Ceneri-Zone, indem bei der Val-Mara-Störungszone im Homogenbereich 12Abis die Orientierung der Schieferung von SSW (204/44) nach SE (133/58) rotiert (Fig. 4-3).

In Anbetracht des leicht grösseren Verschnittwinkels zwischen der Streichrichtung und der Tunnelachse im Vergleich zur südlichen Ceneri-Zone wird der Streckenabschnitt der mittleren Ceneri-Zone dem «Subparallelismus» zugeordnet.

4.1.1.3 Südliche Ceneri-Zone (Giumello-Gneis) und Val-Colla-Linie

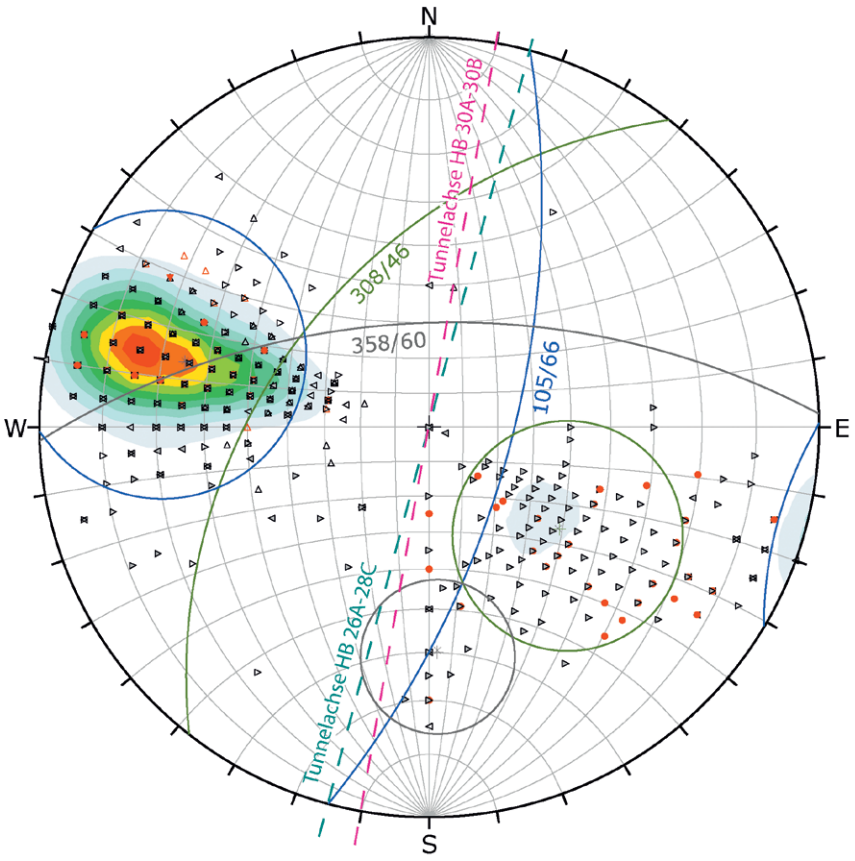
Die statistische Auswertung der Schieferungsmessungen in diesem Streckenabschnitt deutet auf strukturell unterschiedliche Domänen hin. Die Orientierung der Schieferungsflächen im Giumello-Gneis zwischen den Homogenbereichen 26A und 28C hat eine steil einfallende Orientierung von durchschnittlich 105/66, dessen Streichrichtung die Tunnelachse spitzwinklig schneidet, weshalb der Projektverfasser diesen Streckenabschnitt dem «Subparallelismus» zuordnete (s. Kap. 2.3.2, Fig. 4-4). Im Randbereich der Val-Colla-Linie, hauptsächlich im Störungszonenbereich des Homogenbereichs 30A, veranschaulicht eine abnehmende Häufigkeit der Schieferungsfamilie 105/66 den tektonischen Übergang zwischen Ceneri-Zone und Val-Colla-Zone. In den Homogenbereichen 30A und 30B ist die Schieferung stattdessen durch die Tektonik der Val-Colla-Linie gekennzeichnet und fällt hauptsächlich in Richtung NNE (308/46).

4.1.1.4 Val-Colla-Zone

Der Stabbiello-Gneis besitzt häufig eine wellige und gefaltete Schieferung, mit offenen Falten in der Grössenordnung von Metern. Die Mehrheit der Schieferungsflächen ist krenuliert. An Scher- und Störungszonen war eine Neuorientierung der Schieferungsflächen beobachtbar, insbesondere in der Nähe von semiduktilen Scherzonen oder an lithologischen Grenzen zu den Basiten oder zum Bernardo-Orthogneis. Die Schieferungsflächen zeigen innerhalb der Familien grosse Streubereiche ihrer Orientierung (Fig. 4-5).

Innerhalb der Bernardo-Orthogneiskörper sind die Schieferungsflächen viel weniger markant ausgeprägt und generell diskordant in Bezug zur Schieferung der Stabbiello-Gneis-Formation ausgerichtet. Ein besonderes Detail zeigt der Trend der Streichrichtung der Schieferung im Homogenbereich 38C, die innerhalb des Bernardo-Orthogneises eine ähnliche Streichrichtung zeigt wie die Hauptschieferung der Val-Colla-Linie. Diese Streichrichtung könnte daher ein Relikt der Blattverschiebung an der Val-Colla-Linie sein, die durch die Tesserete-Grona-Linie geschnitten wird.

Im Streckenabschnitt zwischen den Homogenbereichen 31 und 32 fällt die Schieferung überwiegend steil mit Nord-Süd-Richtung ein und deutet auf die Faltenzone zwischen Val-Colla-Linie und Tesserete-Grona-Linie. Ab dem Homogenbereich 33 beginnt der Trend zu subhorizontaler welliger



Symbol	TO	Quantity
△	26A	26
△	26B bis	119
▽	27	21
▼	27 bis	19
◁	28A	312
◀	28B	103
▷	28C	520
●	30A	39
▶	30B	201

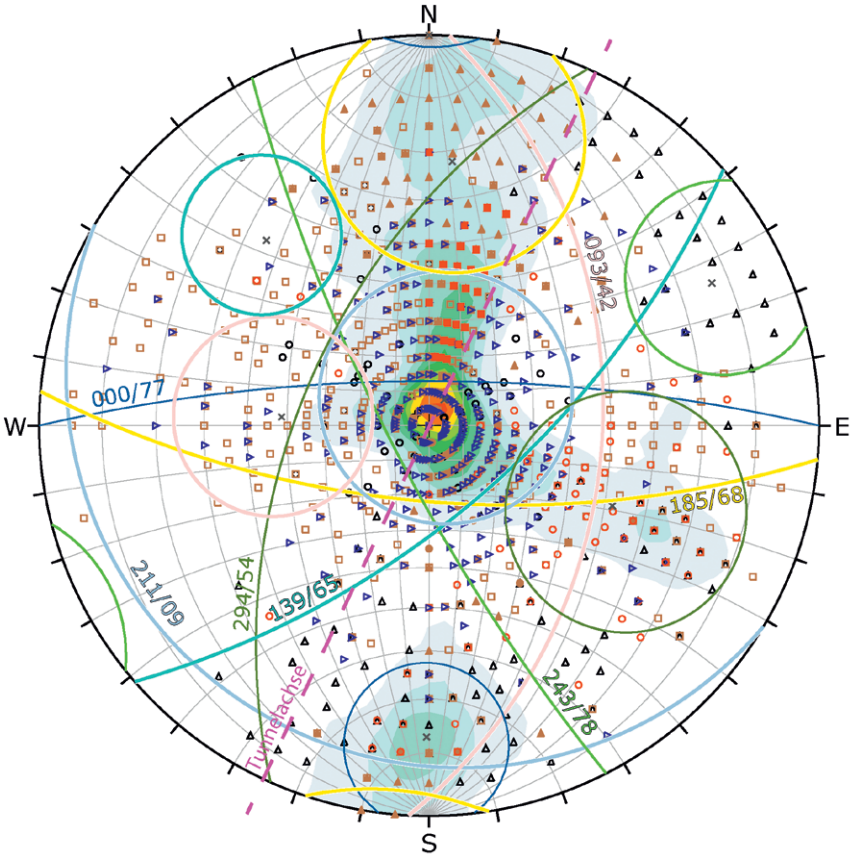
Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.40
	2.40 - 4.80
	4.80 - 7.20
	7.20 - 9.60
	9.60 - 12.00
	12.00 - 14.40
	14.40 - 16.80
	16.80 - 19.20
	19.20 - 21.60
	21.60 - 24.00

Maximum Density	23.55%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
2m		46	308	308/46
3m		66	105	105/66
4m		60	358	358/60

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	1360 (1360 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Fig. 4-4: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Schieferungsflächen in der südlichen Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie zwischen den Homogenbereichen 26A und 30B. Die Kleinkreise umfassen den Streubereich innerhalb der Schieferungsfamilie.



Symbol	TO_RISCONTRO	Quantity
△	31	267
▲	32	248
■	33	43
□	35-38A	701
○	38C	99
▶	39-42	461
○	43	102
●	44	44

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.90
	0.90 - 1.80
	1.80 - 2.70
	2.70 - 3.60
	3.60 - 4.50
	4.50 - 5.40
	5.40 - 6.30
	6.30 - 7.20
	7.20 - 8.10
	8.10 - 9.00

Maximum Density	8.42%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1m		9	211	211/09
2m		77	360	000/77
5m		68	185	185/68
6m		42	93	093/42
7m		78	243	243/78
8m		54	294	294/54
9m		65	139	139/65

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	1965 (1965 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Fig. 4-5: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Schieferungsflächen in der Val-Colla-Zone zwischen den Homogenbereichen 31 und 44. Die Kleinkreise entsprechen dem Streubereich innerhalb der Schieferungsfamilie.

Schieferung, welche wahrscheinlich reliktisch ist und durch die Val-Colla-Linie tektonisch nicht beeinflusst wurde.

4.1.1.5 Fensterstollen Sigirino

Die Orientierung der Schieferungsflächen im Fensterstollen Sigirino passt in das Muster der südlichen Ceneri-Zone. Die Hauptschieferung (105/66) fällt nach SE ein (Anh. 13-f) und hat in Bezug auf den TBM-Vortrieb eine günstige Orientierung.

4.1.2 Störungszonen

Die Einstufung der Störungszonen erfolgte nach der Mächtigkeit und Beschaffenheit des Gesteins gemäss Tabelle 4-2. Störungszonen mächtiger als ein Meter wurden als Gestein ausgeschieden. Sie fallen in der statistischen Analyse in die Stufe 4.

Der Störungszonenkataster im Anhang 13-g fasst alle durchörterten Störungszonen zusammen. Die statistische Auswertung der Orientierungen der Störungszonen befindet sich im Anhang 13-h und ist gegliedert nach Repräsentativität und Homogenbereich.

In der nördlichen Ceneri-Zone sind 70% der angetroffenen Störungszonenfamilien auf die dextrale Blattverschiebung der Insubrischen Linie zurückzuführen (s. Kap. 4.3). Ab der mittleren Ceneri-Zone bis zur Südgrenze der Val-Colla-Linie sind die dominierenden Störungszonenfamilien parallel zum Verlaufen der Val-Colla-Linie steil gegen WNW einfallend ausgerichtet mit einer leichten Rotation ab der Giumello-Gneis-Formation. Hingegen lassen die Störungszonen der Val-Colla-Zone Strukturen parallel zur Blattverschiebung der Tesserete-Grona-Linie erkennen. Im letzteren Fall handelt es sich vermutlich um präalpine Störungszonen, die mit der alpinen Phase reaktiviert wurden.

In den folgenden Abschnitten sind die relevantesten durchörterten Störungszonen zusammengefasst.

Tab. 4-2: *Einstufung der Störungszonen beim Vortrieb im CBT.*

[1)] Störungszonen mächtiger als 1 m werden als Gestein ausgeschieden.

Beschreibung	Mächtigkeit	Stufe
	[cm]	[-]
Harnischfläche, Scherzone	<5	1
Mylonite	>1	2a
Kataklastische Störungszone	5–20	2b
Kataklastische Störungszone	20–100[1)]	3a
Kataklastische-kakiritische Störungszone	5–20	
Kataklastische-kakiritische Störungszone	20–100[1)]	3b
Kakiritische Störungszone	5–20	
Kakiritische Störungszone	20–100[1)]	4

4.1.2.1 Portalbereich Vigana, nördliche Ceneri-Zone

Beim Vortrieb im Portalbereich Vigana können vier Störungszonenfamilien gezählt werden (Fig. 4-6), wobei zwei Familien mit der Schieferung übereinstimmen (s. Kap. 4.1.1.1). Dies sind die steil einfallende Störungszonenfamilie 348/65 und subhorizontale Störungszonenfamilie 132/10. Die Störungszonenfamilie 348/65 ist fast im ganzen Portalbereich anzutreffen, während die subhorizontalen Störungszonenfamilien nur im Homogenbereich 1Cbis auftreten, wo die Schieferung ebenfalls subhorizontal einfällt. Darüber hinaus gibt es zwei weitere Haupt-Störungszonenfamilien, die schräg bis subparallel zur Tunnelachse verlaufen und eine durchschnittliche Orientierung von 215/75 und 072/46 haben. Auch in diesem Fall sind die letzteren nicht in allen Homogenbereichen vorhanden. Die Störungszonenfamilie 215/75 tritt im ersten Strukturbereich der Homogenbereiche 0B–1Bbis auf, während die Störungszonenfamilie 072/46 nur in Verbindung mit dem Ceneri-Paragneis steht.

Die Störungszonenfamilien 348/67, 215/75 und 072/46 lassen sich auf die dextrale Transpression der Insubrischen Linie zurückführen und entsprechen jeweils den Strukturen des Typs P (synthetisch), Abschiebung (normal fault) und R' (Riedel fault); s. dazu Kap. 4.3. Die Störungszonen der Familie 199/03 könnten stattdessen als alpine Rücküberschiebungen betrachtet werden. Die grosse Anzahl der kakiritischen Störungszonen deutet auf ein sprödes Verformungsregime hin, das mit den letzten Phasen der alpinen Orogenese korreliert werden kann.

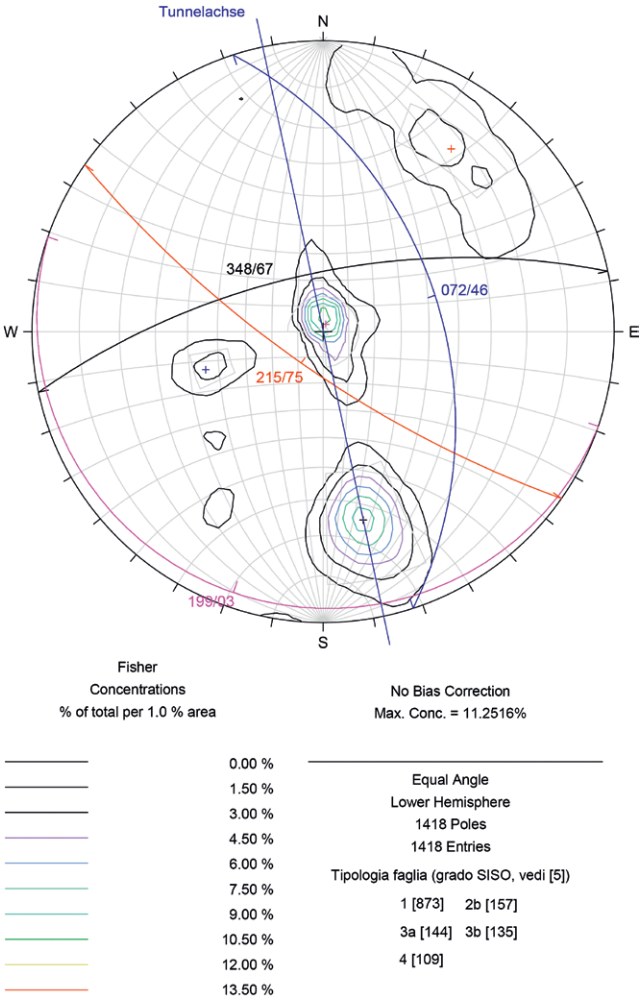


Fig. 4-6: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Störungszonen im Portalbereich Vigana.

4.1.2.2 *Nördliche und mittlere Ceneri-Zone*

Mittels statistischer Auswertung ergeben sich neun Haupt-Störungszonenfamilien, wobei eine hauptsächlich in der nördlichen Ceneri-Zone steil nach NW einfällt (127/81) und vermutlich von einer präalpinen Verformungsphase zeugt, welche eine Rotation während der Insubrischen Phase und eine spröden Reaktivierung während der Lombardischen Phase erfuhr.

Werden die Orientierungen der restlichen Störungszonenfamilien mit dem dextralen Transpressivsystem der Insubrischen Linie und der Tesserete-Grona-Linie korreliert, dann können vier der Störungszonenfamilien mit dem Riedel-Modell (Price & Cosgrove 1990) in Verbindung gebracht werden:

- Die Störungszonenfamilie des Riedel-Typs R wurde hauptsächlich in der nördlichen Ceneri-Zone angetroffen, in der Nähe der Insubrischen Linie. Bei der Gruppe der bautechnisch relevanten Störungszonen sind die Strukturen des Typs R häufig in der nördlichen Ceneri-Zone und selten in der mittleren Ceneri-Zone (HB 14 und 16A) zu finden.
- Die konjugierten Störungszonenfamilien (Aufschiebungen) 302/50 und 132/42 stehen senkrecht zu der alpinen Hauptspannungsrichtung σ_1 mit NW-SE Streichrichtung und befinden sich sowohl ganz im Norden der nördlichen Ceneri-Zone als auch in der mittleren Ceneri-Zone. Diese Störungszonen sind weniger häufig, bilden aber komplexe Systeme und sind in den Homogenbereichen 3, 10B, 11, 13A und 22 zu finden (Fig. 4-7).
- Die Tektonik, die auf eine Abschiebung in der nördlichen Ceneri-Zone in der Nähe der Insubrischen Linie hindeutet, wird durch die Störungszonenfamilie 223/51 repräsentiert und hatte beim Vortrieb oft bautechnische Relevanz. Sie ist gekennzeichnet durch die zwei konjugierten Strukturen 050/71 und 232/76 und führte zu lokalen Ortsbrustinstabilitäten.
- Die sekundären Störungszonen des Typs P sind in den stereographischen Auswertungen wenig vertreten und kommen nur in der nördlichen Ceneri-Zone vor.

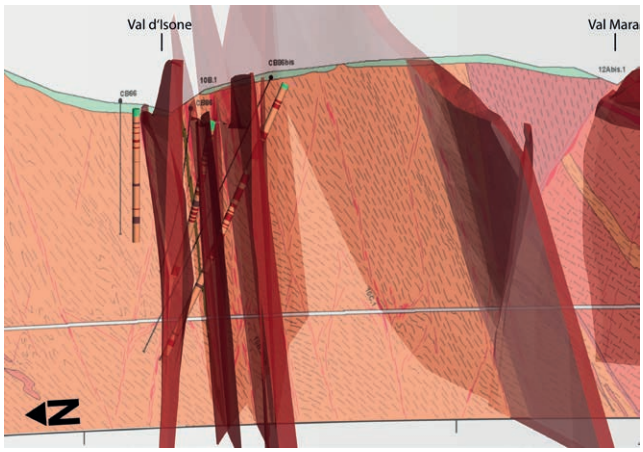
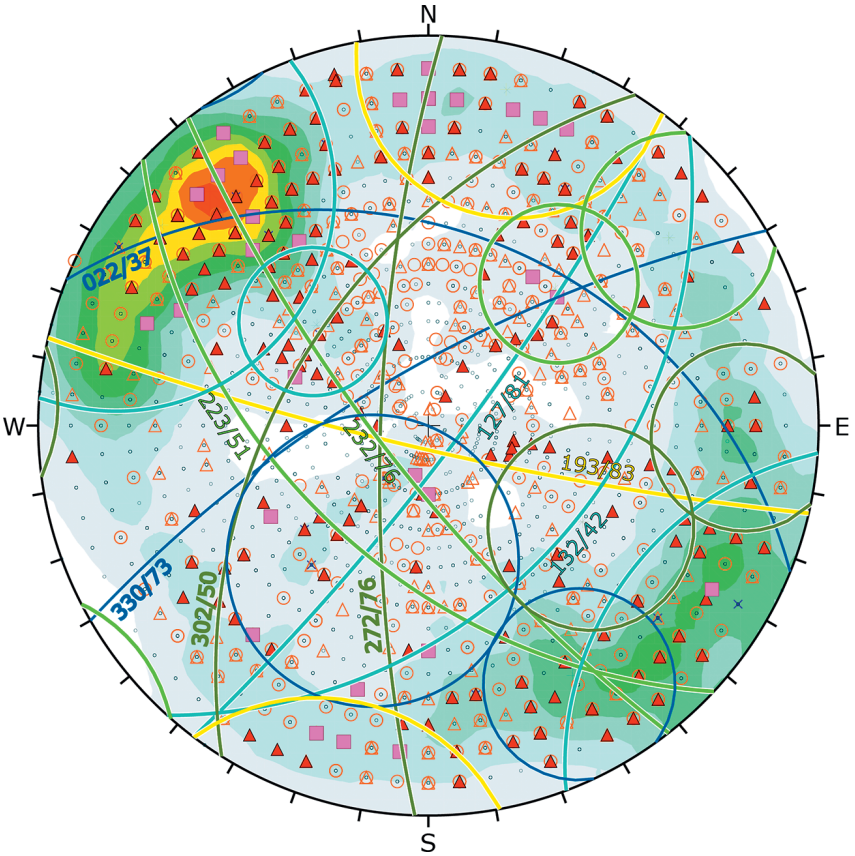


Fig. 4-7: Räumliche Visualisierung der Rückanalyse des komplexen Störungszonensystems Val d'Isone im Homogenbereich 10B mithilfe von Oberflächendaten, Erkundungsbohrungen CB 66, 86 und 86bis, und den Vortriebsdaten. (Erstellt in Leapfrog Works).



Symbol	CLASSE SISO	Quantity
○	1	6159
×	2a	19
○	2b	639
△	3a	550
▲	3b	287
□	4	36

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.45
	0.45 - 0.90
	0.90 - 1.35
	1.35 - 1.80
	1.80 - 2.25
	2.25 - 2.70
	2.70 - 3.15
	3.15 - 3.60
	3.60 - 4.05
	4.05 - 4.50

Maximum Density	4.27%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1		81	127	127/81
2		37	22	022/37
3		83	193	193/83
4		73	330	330/73
5		76	272	272/76
6		50	302	302/50
7		42	132	132/42
8		76	232	232/76
9		51	223	223/51

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	7690 (7690 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Fig. 4-8: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Störungszonen in der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone. Die Kleinkreise entsprechen dem Streubereich innerhalb der Störungszonenfamilie. Variation der Tunnelachse: 350–035° Azimut.

Mit Ausnahme der beiden am häufigsten vertretenen Störungszonenfamilien gibt es eine gute Korrelation zwischen der Kluftscharen und Störungszonenfamilien mit ähnlicher Lage. Die am häufigsten angetroffene Störungszonenfamilie (127/81) koexistiert nicht mit kongruenten Klüftung im nördlichen Abschnitt der mittleren Ceneri-Zone, und die Störungszonenfamilie 022/37 ist nicht mit einer statistisch relevanten Kluftschar in Verbindung zu bringen. Es wird vermutet, dass der Ursprung dieser Strukturen auf ein präalpines tektonisches Ereignis zurückzuführen ist.

4.1.2.3 Südliche Ceneri-Zone (Giumello-Gneis) und Val-Colla-Linie

Das Resultat der Analysen der Orientierungen der Störungszonen wird in der Figur 4-9 dargestellt. In der südlichen Ceneri-Zone und in der Val-Colla-Linie befinden sich sieben Hauptstörungszonenfamilien, vier sekundäre Störungszonenfamilien und drei konjugierte Systeme (angetroffen in den Homogenbereichen 26Bbis, 27bis und 30A).

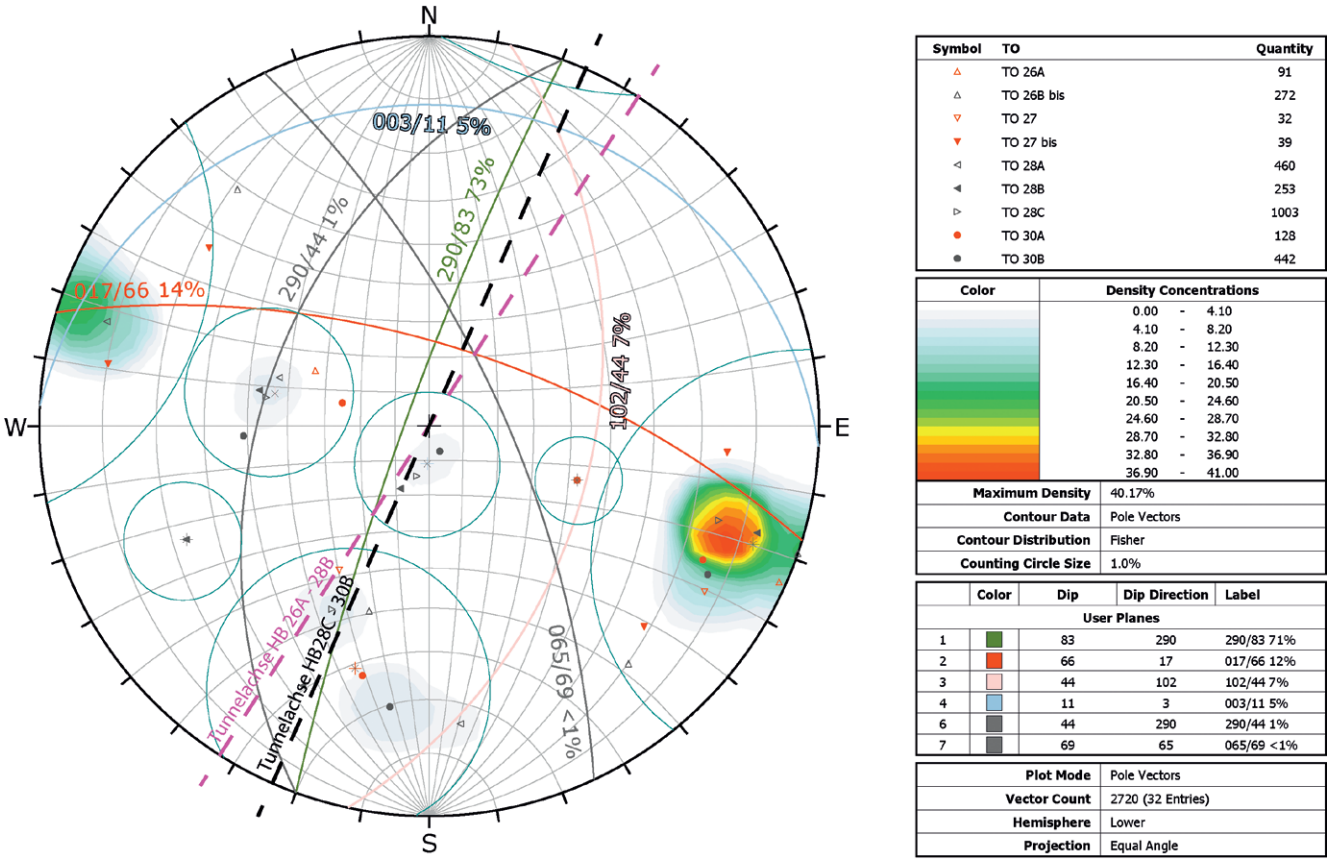
Die am häufigsten angetroffene Störungszonenfamilie fällt in Richtung WNW ein (294/84), hat eine parallele bis subparallele Streichrichtung zum Tunnel und lässt sich mit der Kluftschar 288/73 korrelieren, welche ebenfalls häufig auftritt. Sie bildet mit der Kluftschar 105/71 ein konjugiertes System. Die Störungszonenfamilien 017/66, 077/63, 102/44 sind auf das dextrale Transpressivsystem der Insubrischen Linie zurückführbar und entsprechen jeweils Strukturen vom Typ R, R' und X (Kap. 4.3).

Ansonsten gibt es keine direkten Korrelationen zwischen den Haupt-Störungszonenfamilien und denen der Schieferung, mit Ausnahme der Haupt-Störungszonenfamilien 290/44, die im Homogenbereich 30A der Val-Colla-Linie mit einer Häufigkeit von 12 % vorhanden ist und mit der Schieferung 308/46 in der Val-Colla-Linie korreliert.

Die mächtigeren Störungszonen 145/80 (HB 28A), 330/80 (HB 28C), 320/70 (HB 30A) und die des Homogenbereichs 30B (s. Störungszonenkataster Anh. 13-g) sind in der stereographischen Projektion statistisch nicht ersichtlich (Fig. 4-9). Sie waren in bautechnischer Hinsicht relevant und charakteristisch für die südliche Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie. Dabei handelt es sich hauptsächlich um 6 bis 52 m mächtige Störungszonen, die sowohl aus einzelnen Störungen oder gebündelt grössere Störungszonen bilden.

4.1.2.4 Val-Colla-Zone

Die am häufigsten angetroffene Störungszonenfamilie in der Val-Colla-Zone fällt steil, z.T. fast vertikal in Richtung Süden ein (177/84). Diese Störungszonenfamilie verläuft ungefähr parallel zur Tesserete-Grona-Linie. Es kann angenommen werden, dass diese älteren Strukturen spätalpin infolge des insubrischen Systems reaktiviert wurden. Die weniger relevante Störungszonenfamilie 294/84 wurde hauptsächlich ab Beginn der südlichen Ceneri-Zone angetroffen und hat wahrscheinlich einen variszischen Ursprung. Diese durchörterten Störungszonen zeigten ähnlich eingeregelte Strukturen wie in der Mylonitzone der Val-



Symbol	TO	Quantity
△	TO 26A	91
△	TO 26B bis	272
▽	TO 27	32
▼	TO 27 bis	39
◁	TO 28A	460
◀	TO 28B	253
▷	TO 28C	1003
●	TO 30A	128
●	TO 30B	442

Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.10
	4.10 - 8.20
	8.20 - 12.30
	12.30 - 16.40
	16.40 - 20.50
	20.50 - 24.60
	24.60 - 28.70
	28.70 - 32.80
	32.80 - 36.90
	36.90 - 41.00
Maximum Density	40.17%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		83	290	290/83 71%
2		66	17	017/66 12%
3		44	102	102/44 7%
4		11	3	003/11 5%
6		44	290	290/44 1%
7		69	65	065/69 <1%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	2720 (32 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Fig. 4-9: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Störungszonen in der südlichen Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie. Die Kleinkreise entsprechen dem Streubereich innerhalb der Störungszonenfamilie.

Colla-Linie. Die Störungszonenfamilie 132/10 ist gekennzeichnet durch ein flaches, welliges Einfallen und erscheint in allen Homogenbereichen. Sie zeugt vermutlich von reliktischen Strukturen kaledonischen Alters und wurde möglicherweise in der Insubrischen Phase reaktiviert, weil sie wegen der zur alpinen Hauptspannung σ_1 senkrecht stehenden Richtung zum insubrischen extenso-deformativen System gehören könnte. Innerhalb des Homogenbereichs 45A gibt es zusätzlich zur subhorizontalen Störungszonenfamilie 132/10 eine Störungszonenfamilie 144/53, die nur innerhalb der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone statistisch auftritt und die lokal mit der angetroffenen Hauptkluftschar korrelierbar ist.

Mylonitische Störungen (Stufe 2a) sind selten angetroffen worden, sie haben wegen ihrer rekristallisierten Beschaffenheit nur geringe oder gar keine bautechnische Relevanz. Es gibt innerhalb der Val-Colla-Zone mylonitische Störungen mit der Orientierung der Val-Colla-Linie oder der Tesserete-Grona-Linie.

4.1.2.5 Fensterstollen Sigirino

Die beim Vortrieb des Fensterstollens am häufigsten angetroffenen Störungszonen gehören zu den Familien 091/69 und 124/69, welche subparallel zur Schieferung 077/63 und 127/81 orientiert sind. Eine weitere Störungszonenfamilie entspricht der Orientierung 303/55 (Anh. 13-i).

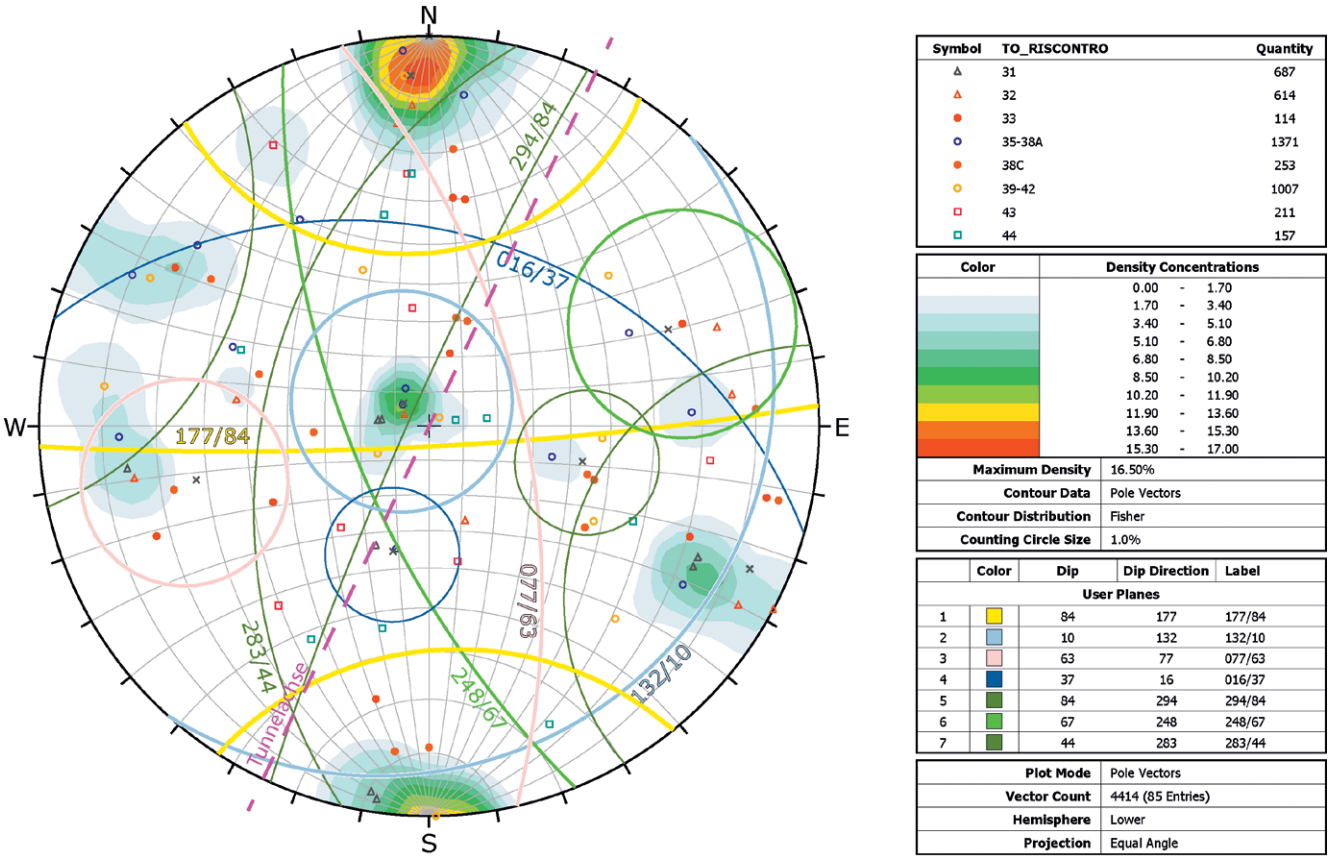
Im Gegensatz zur Schieferung lassen sich die beobachteten Störungszonenfamilien im Fensterstollen nicht mit denen der Einspurtunnel korrelieren. Diese Inkongruenz verdeutlicht eine komplexe, mehrphasige tektonische Überprägung der Störungszonen. Die angetroffenen Störungszonen im FIS sind daher überwiegend präalpin und damit präinsubrisch entstanden.

Im Ceneri-Paragneis gab es dreimal so viele Störungszonen wie im Ceneri-Orthogneis. Damit besteht eine Verbindung zwischen dem rheologischen Verhalten des Gesteins und der Anzahl angetroffener Störungszonen. Die glimmerreichen Paragneise und duktilen Lithologien entsprechen rheologisch den «Schwächestellen» im Gebirge und neigten dazu, während der regionaltektonischen Ereignisse im Vergleich zum Ceneri-Orthogneis mehr Verformung aufnehmen zu können.

4.1.3 Klüftung

Als Klüfte werden planare Trennflächen im Gestein bezeichnet, die, gemessen am übrigen Gesteinsverband, keine (z.B. offene Kluft) oder eine stark reduzierte echte Kohäsion (Zugfestigkeit quer zur Fläche) besitzen. Oft enthalten sie eine Füllung aus Quarz, Kalzit, Sulfiden oder Chlorit. Die Klüfte wurden für die statistische Auswertung nach dem Kluftabstand, Persistenz und Durchtrennung klassifiziert (Tab. 4-3, 4-4 und 4-5).

Die statistische Auswertung des Kluftabstandes und der Persistenz wurde für jede Kluftschar ausgeführt, um die Durchtrennung des Gebirges zu bestimmen. Klüfte mit Persistenzen grösser als die Abschlagslänge und Streichrich-



Symbol	TO_RISCONTRO	Quantity
	31	687
	32	614
	33	114
	35-38A	1371
	38C	253
	39-42	1007
	43	211
	44	157

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00
Maximum Density	16.50%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		84	177	177/84
2		10	132	132/10
3		63	77	077/63
4		37	16	016/37
5		84	294	294/84
6		67	248	248/67
7		44	283	283/44

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	4414 (85 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Fig. 4-10: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Störungszonen in der Val-Colla-Zone (HB 31–44). Die Kleinkreise entsprechen dem Streubereich innerhalb der Störungszonenfamilie.

tung spitzwinklig oder parallel zur Tunnelachse werden in der Regel statistisch überbewertet, weil die gleiche Kluft nicht immer identifizierbar war und dadurch in den folgenden Ortsbrustaufnahmen erneut erfasst wurde. Diese doppelt aufgenommenen Klüfte wurden in den statistischen Auswertungen herausgefiltert.

Die Tabellen in Anhang 13-j und 13-k fassen alle angetroffenen Kluftscharen in den Einspurtunnel und im FIS geordnet nach Homogenbereich zusammen.

Tab. 4-3: *Einstufung der Kluftflächenabstände.*

Abstand	**[m]**	**Stufe**
ungeklüftet	–	0
gross	>2	1
mittel	0,6–2	2
klein	0,15–0,6	3
sehr klein	<0,15	4

Tab. 4-4: *Einstufung der Klüfte aufgrund ihrer Ausbisslinie im Aufschluss (Persistenz).*

Persistenz	**Ausbisslinie [m]**	**Stufe**
klein	<1	1
mittel	1–3	2
gross	3–6	3
sehr gross	>6	4

Tab. 4-5: *Einstufung der Durchtrennung. [1] Massgebend für die Trennkörper ist die Kombination der Hauptkluftscharen mit den s-Flächen.*

Bezeichnung	**Beschreibung**	**Trennflächen-körper[1]**	**Stufe**
ungeklüftet	Fehlen von Klüften	massiv	0
gering	wenige unsystematische Klüfte, oder nur Kleinklüfte	Bestimmt durch die Schieferung, z.B. plattig	1
grob – sehr grob	grosser Durchtrennungs-grad, mittlerer bis grosser Abstand	grobe Blöcke >10 m³	2
mässig	oft unregelmässig, nicht systematisch, kleiner bis mittlere Durchtrennungs-grad	Blöcke 1–10 m³	3
intensiv	meist systematisch, kleiner Abstand 3–10 dm, mehrere Kluftsysteme	Quader 3 dm³ – 1 m³	4
sehr intensiv	kleiner bis sehr kleiner Abstand, oder Gestein zerbrochen, mehrere Kluftsysteme	Steingrösse <3 dm³	5

4.1.3.1 Portalbereich Vigana, nördliche Ceneri-Zone

Beim Vortrieb Vigana dominierten Klüfte mit lokaler kohäsiven Kluftfüllung aus Quarz, Sulfiden oder Chlorit. In Bergwasser führenden Streckenabschnitten mit einer Gebirgsüberlagerung kleiner als 80 m zeigten die Klüfte rostbraune Oxidationsspuren.

Im Portalbereich können vier Hauptkluftscharen, die sich in zwei konjugierte Kluftsysteme mit Orientierung 073/62 und 246/68 respektive 343/68 und 156/13 aufteilen, und zwei sekundären Kluftscharen identifiziert werden (Fig. 4-11). Die sekundären Kluftscharen sind haben eine Orientierung von 034/65, 169/75, 072/30 und 319/70. Die Kluftscharen fallen vorwiegend steil ein.

In der Regel zeigten die Kluftscharen im Ceneri-Paragneis kleinere Kluftabstände als im Ceneri-Orthogneis.

Innerhalb der Störungszonen und stellenweise im Ceneri-Paragneis, erreichte die Durchtrennung die Stufe «sehr intensiv» (Steingrösse bis 3 dm³). Die Kluftabstände im Ceneri-Orthogneis waren in den weniger gebankten Lithologien grösser und weisen deshalb eine mässige Durchtrennung auf (Blöcke 1–10 m³).

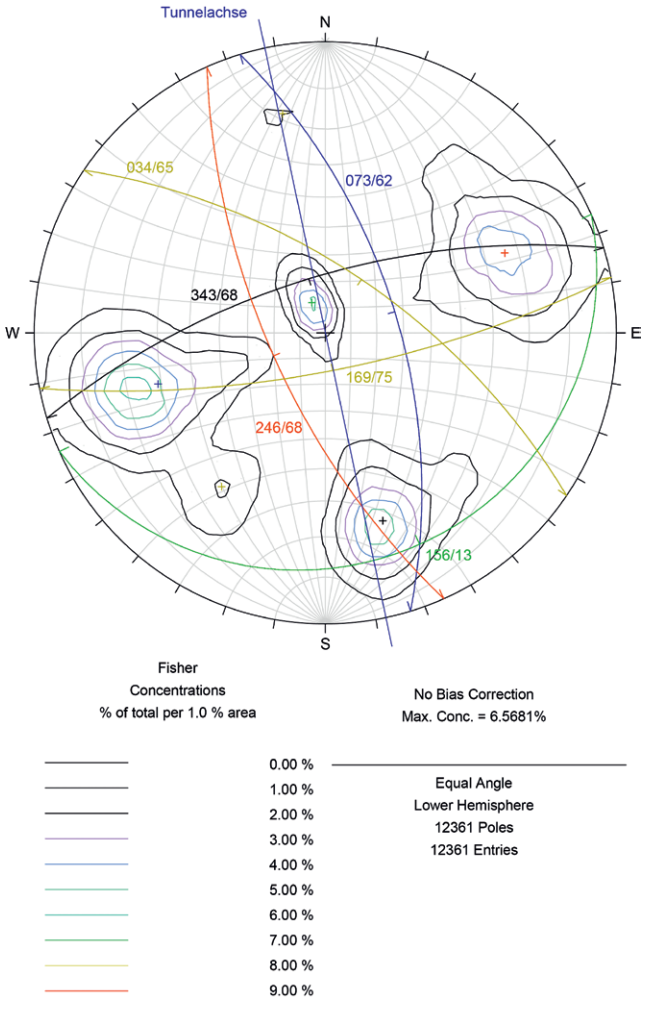


Fig. 4-11: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Kluftscharen im Portalbereich Vigana.

4.1.3.2 *Nördliche bis mittlere Ceneri-Zone*

Das Gebirge zwischen nördlicher und mittleren Ceneri-Zone wird von neun Hauptkluftscharen durchtrennt. Sechs davon bilden ein konjugiertes Kluftsystem mit einem steilen Fallwinkel und Fallrichtung E-W, NNE–SSW und SE-NW (Fig. 4-12).

Die schieferungsparallele Klüftung hat in der nördlichen Ceneri-Zone die Orientierung 202/36 und in der mittleren Ceneri-Zone 127/74, 120/34 und stellenweise 087/77.

Die Kluftabstände zeigen einen nicht ganz eindeutig abnehmenden Trend in Richtung Süden bis zum Homogenbereich 17, was sich aber nicht mit den Lithologien korrelieren lässt.

Die Durchtrennung war vorwiegend intensiv (Blöcke 1–10 m^3). Innerhalb von Störungszonen war die Durchtrennung überwiegend sehr intensiv (Steine $<1\,dm^3$).

4.1.3.3 *Südliche Ceneri-Zone (Giumello-Gneis) und Val-Colla-Linie*

Die südliche Ceneri-Zone und die Val-Colla-Linie sind geprägt durch acht Hauptkluftscharen mit den folgenden zwei konjugierten Kluftscharen (Fig. 4-13): eine flachere Kluftschar 282/37 – 104/28 und eine steil einfallende Kluftschar 105/71 – 288/73.

Die schieferungsparallele Kluftschar der südlichen Ceneri-Zone hat eine Orientierung 105/66–71 und ist konjugiert mit der Kluftschar 288/73. Die Kluftschar 290/83 verläuft parallel zu den Hauptstörungszonen. Die Kluftschar 014/89 könnte hingegen in Verbindung mit dem dextralen Transpressivsystem der Insubrischen Linie gebracht werden und mit der Struktur Typ R des Riedelbruch-Netzwerks korreliert sein. Schieferungsparallele Kluftscharen in der Val-Colla-Linie (308/46) konnten nicht korreliert werden.

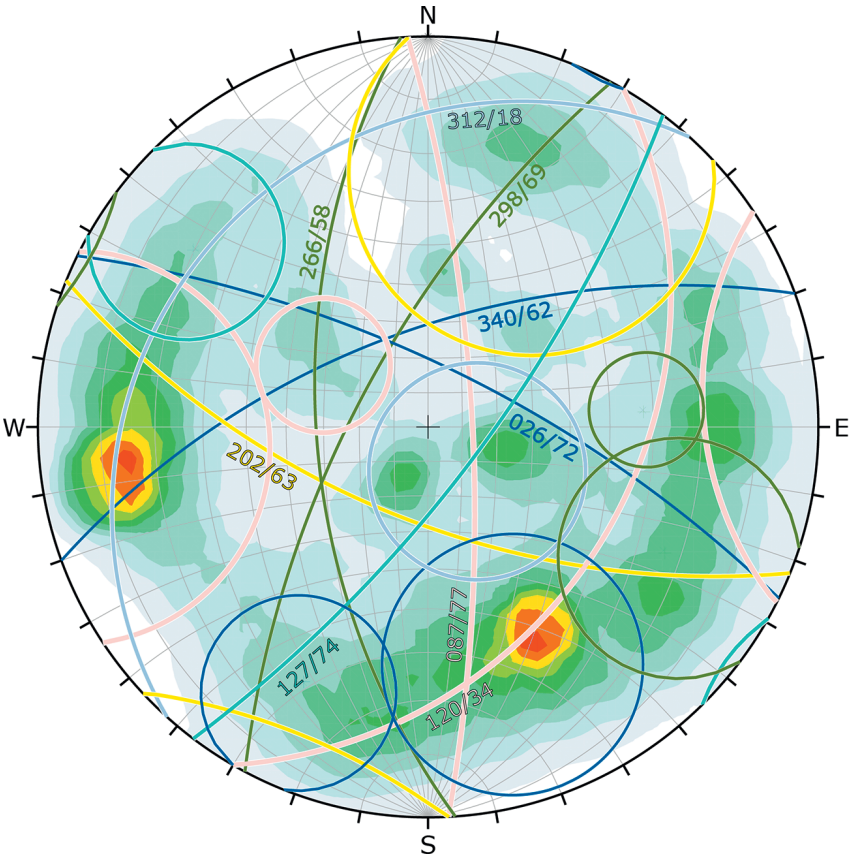
Ausserhalb der Kluftschar 105/71 in den Homogenbereichen 26Bbis, 28A und 28C und ausserhalb der Kluftschar 282/37 im Homogenbereich 30B, die besonders hohe Persistenzwerte aufwiesen, gibt es keine statistisch korrelierbaren Variationen mit lithologischen oder strukturellen Parametern.

4.1.3.4 *Val-Colla-Zone (nördliche und südliche Val-Colla-Zone)*

Aus der statistischen Auswertung der Kluftscharen ergeben sich für die Val-Colla-Zone sieben Hauptkluftscharen (Fig. 4-14), von denen sechs konjugierte Kluftsysteme bilden: ein konjugiertes mit flacherem Fallwinkel (285/23–090/27) und zwei Systeme mit steilem Fallwinkel (106/72–285/68 und 010/67–164/67). Die flachen Kluftscharen entsprechen der kompressiven und die steilen der extensiven Spannungsrichtung.

Die Kluftschar 010/67 verläuft subparallel zur Schieferungsfamilie 000/77 und liegt damit nahezu parallel zur Tesserete-Grona-Linie (Ost-West-Streichrichtung), welche die südlichste Grenze des dextralen Transpressivsystems der Insubrischen Linie darstellt.

Es konnte hingegen keine Hauptkluftschar parallel zur flachliegenden Schieferung der südlichen Val-Colla-Zone beobachtet werden.



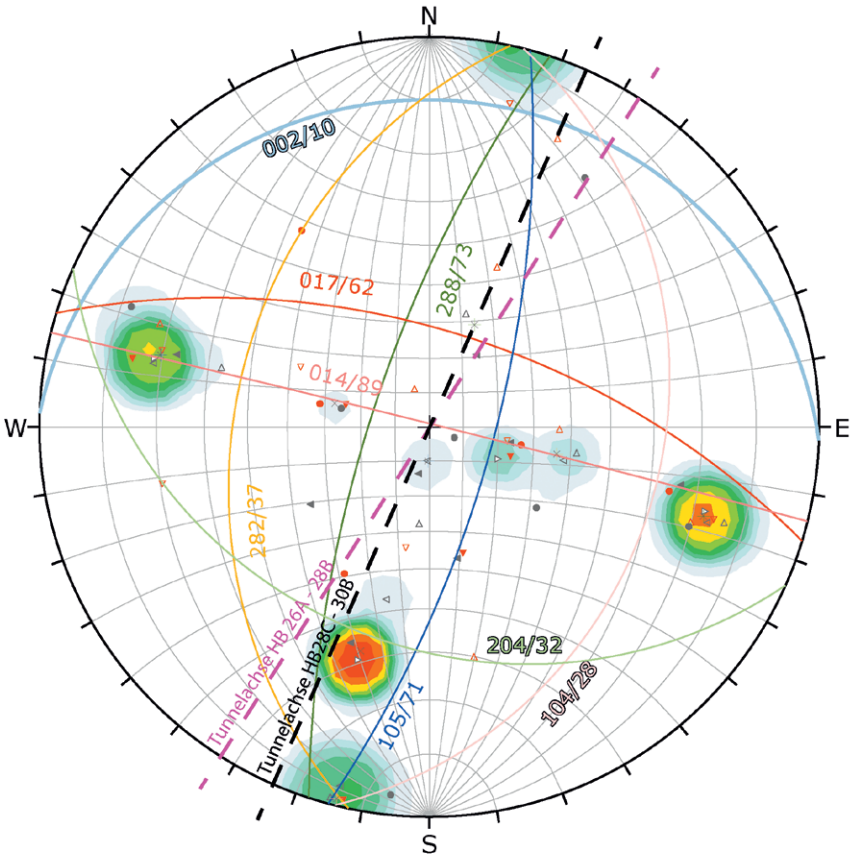
Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.36
	0.36 - 0.72
	0.72 - 1.08
	1.08 - 1.44
	1.44 - 1.80
	1.80 - 2.16
	2.16 - 2.52
	2.52 - 2.88
	2.88 - 3.24
	3.24 - 3.60

Maximum Density	3.51%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1		77	87	087/77
2		62	340	340/62
3		18	312	312/18
4		63	202	202/63
5		69	298	298/69
6		72	26	026/72
7		74	127	127/74
8		34	120	120/34
9		58	266	266/58

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	42377 (42377 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Fig. 4-12: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Kluftscharen in der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone. Die Kleinkreise entsprechen dem Streubereich innerhalb der Schieferungsfamilie. Variation der Tunnelachse: 350–035° Azimut.



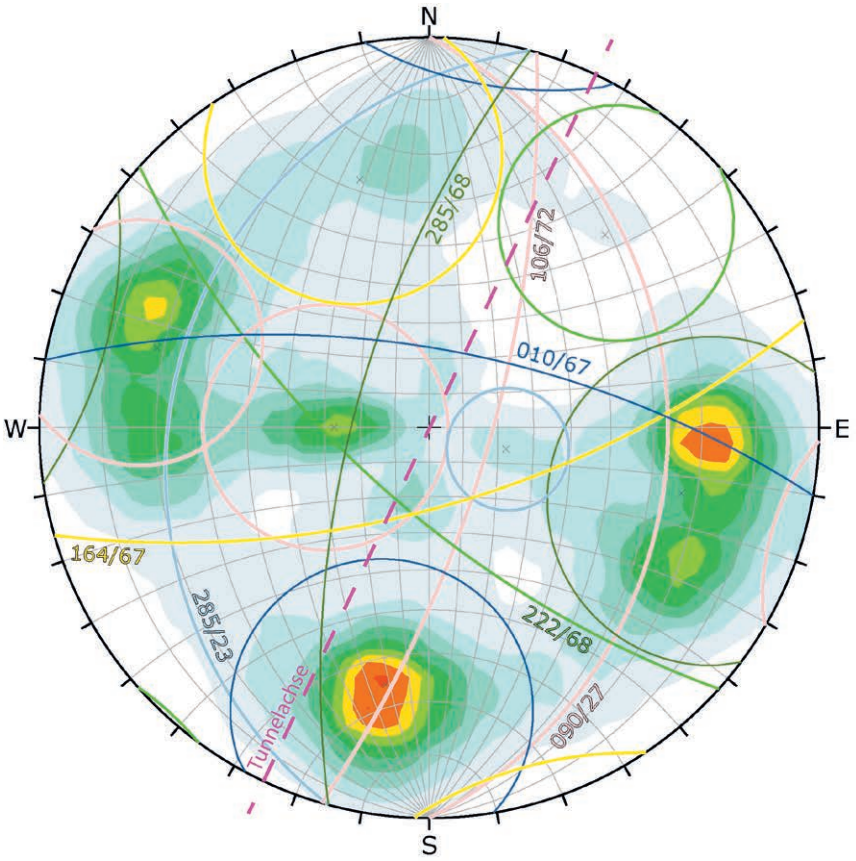
Symbol	TO	Quantity
△	26A	133
△	26B bis	729
▽	27	209
▼	27 bis	78
◁	28A	1694
◀	28B	299
▷	28C	2938
●	30A	126
●	30B	762

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.10
	2.10 - 4.20
	4.20 - 6.30
	6.30 - 8.40
	8.40 - 10.50
	10.50 - 12.60
	12.60 - 14.70
	14.70 - 16.80
	16.80 - 18.90
	18.90 - 21.00
Maximum Density	20.37%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
2m		10	2	002/10
3m		37	282	282/37
4m		73	288	288/73
5m		62	17	017/62
6m		71	105	105/71
7m		89	14	014/89
8m		28	104	104/28
9m		32	204	204/32

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	6968 (55 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Fig. 4-13: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Kluftscharen in der südlichen Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie. Die Kleinkreise entsprechen dem Streubereich innerhalb der Schieferungsfamilie.



Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.45
	0.45 - 0.90
	0.90 - 1.35
	1.35 - 1.80
	1.80 - 2.25
	2.25 - 2.70
	2.70 - 3.15
	3.15 - 3.60
	3.60 - 4.05
	4.05 - 4.50
Maximum Density	4.15%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1m		68	285	285/68
2m		27	90	090/27
3m		67	10	010/67
4m		67	164	164/67
5m		72	106	106/72
6m		68	222	222/68
7m		23	285	285/23

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	28891 (28891 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Fig. 4-14: Die stereographische Projektion zeigt die räumliche Orientierung der angetroffenen Kluftscharen in der Val-Colla-Zone (HB 31–44). Die Kleinkreise entsprechen dem Streubereich innerhalb der Schieferungsfamilie.

Generell gibt es einen Rückgang der Kluftabstände der südlichen Val-Colla-Zone im Vergleich zur nördlichen Val-Colla-Zone, genauso sind auch die höchsten Persistenzwerte in der zuletzt genannten Zone zu finden.

Die Blockmodelle in Figur 4-16 fassen die Beobachtungen beim Vortrieb und den stereographischen Auswertungen zusammen.

4.1.3.5 Fensterstollen Sigirino

Das Gebirge im FIS zeigt insgesamt neun Kluftscharen (Anh. 13-k). Die beiden Kluftscharen 094/70 und 350/68 fallen steil ein und liegen orthogonal zueinander. Die anderen Kluftscharen fallen flach Richtung W bis WSW und ESE ein. Die Kluftabstände, zwischen 0,5 und 1,5 m, bilden die lithologischen Variationen nicht ab. Hingegen sind die Persistenzwerte im Ceneri-Orthogneis mit 2–10 m etwas grösser als im Ceneri-Paragneis mit 2,5–5,5 m.

4.2 Gefügemodelle des Gebirges

Die Blockdiagramme (Fig. 4-15 und Fig. 4-16) synthetisieren schematisch die in den beiden tektonischen Domänen angetroffenen Raumlage und Frequenz der Trennflächen.

Die Hauptfamilien der Trennflächen (Schieferung, Klüftung und Störungszonen) sind im Anhang 13-e bis Anhang 13-k aufgelistet.

4.3 Regionales tektonisches Modell

Wie in Kapitel 2.1 dargestellt wird, enthält das regionale tektonische Modell des CBT einer Reihe von alpinen Strukturen mit sprödem Regime, die alte tektonometamorphe und teils ursprüngliche stratigraphische Einheiten wiedergeben. Alle beobachteten tektonischen Strukturen lassen sich

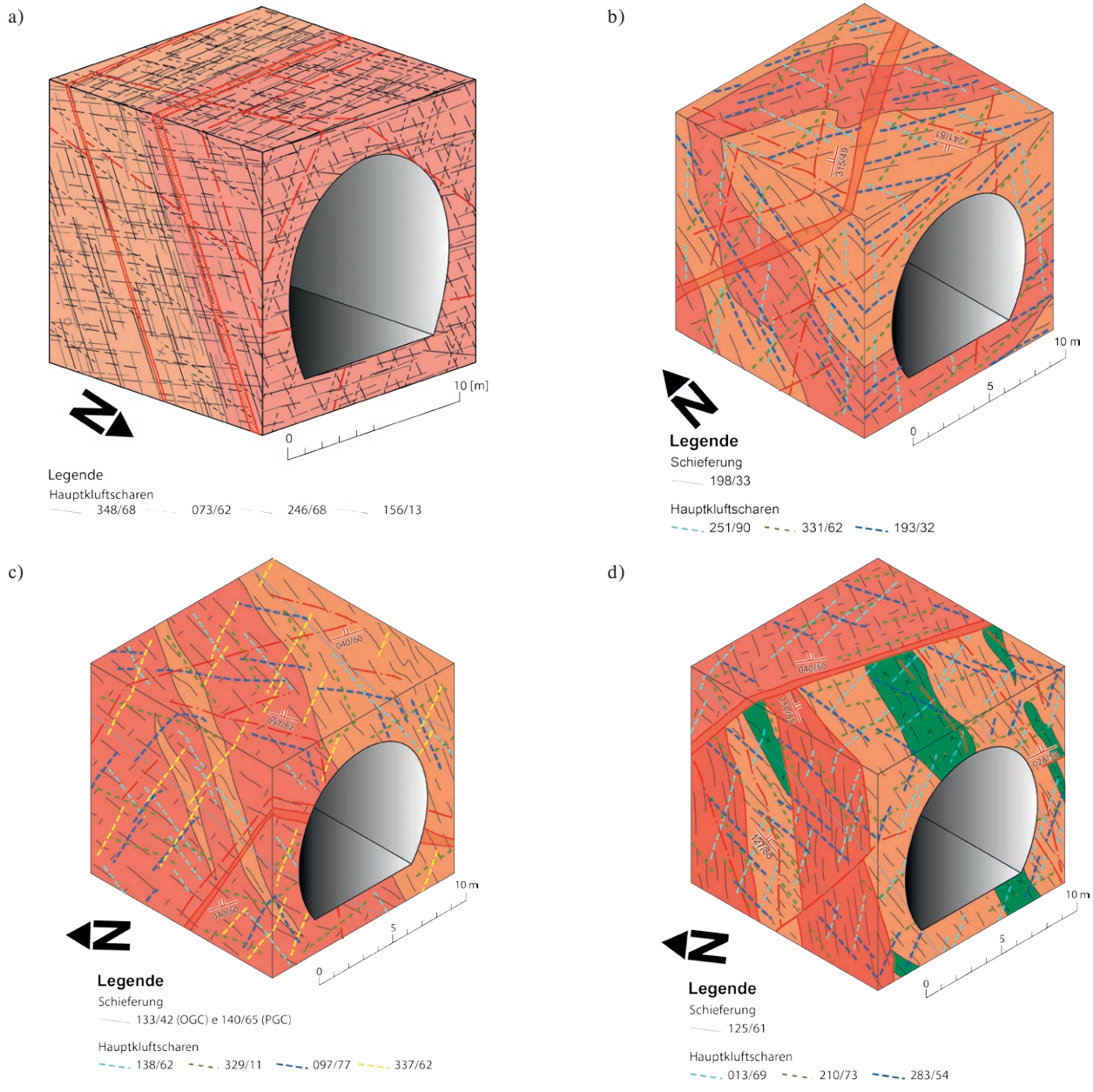


Fig. 4-15: Die Blockdiagramme stellen die Raumlage und die Frequenz der Trennflächen schematisch in der Oströhre dar. a) im Bereich des Nord Portals Vigana. b) nördliche Ceneri-Zone. c) mittlere Ceneri-Zone. d) südliche Ceneri-Zone (Giumello-Gneis-Formation).

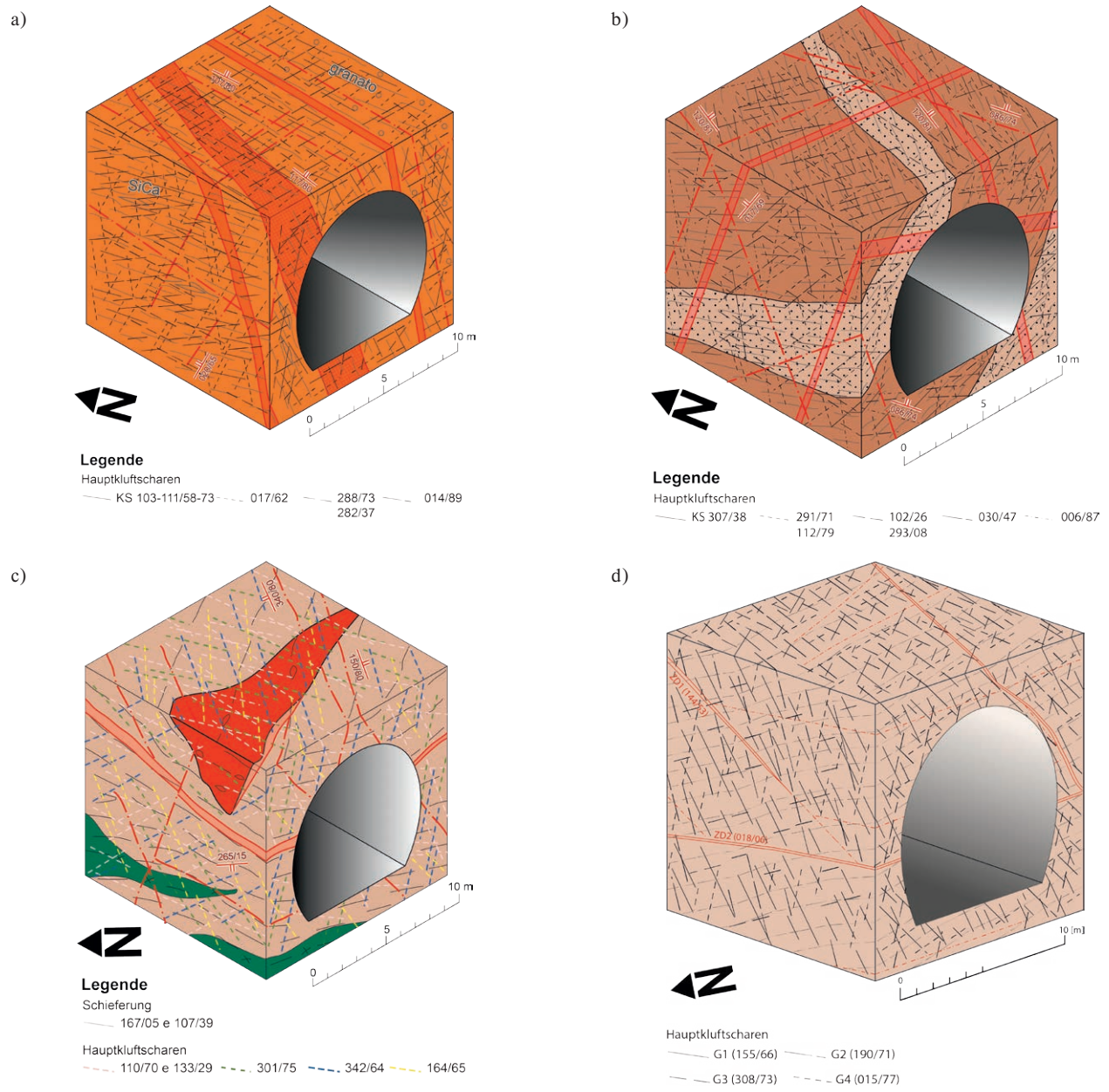


Fig. 4-16: Die Blockdiagramme stellen die Raumlage und die Frequenz der Trennflächen schematisch in der Oströhre dar. a) Südliche Ceneri-Zone im Streckenabschnitt Giumello-Gneis. b) Val-Colla-Linie. c) Val-Colla-Zone. d) Südportal Vezia (Val-Colla-Zone).

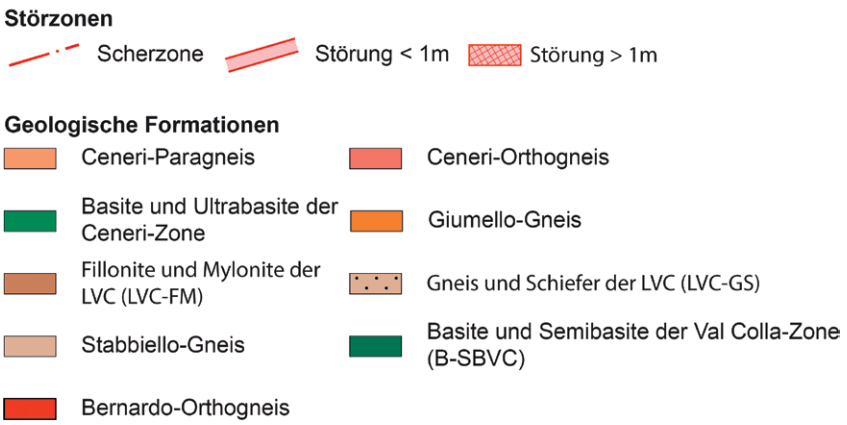


Fig. 4-17: Allgemeine Legende zu den Blockmodellen.

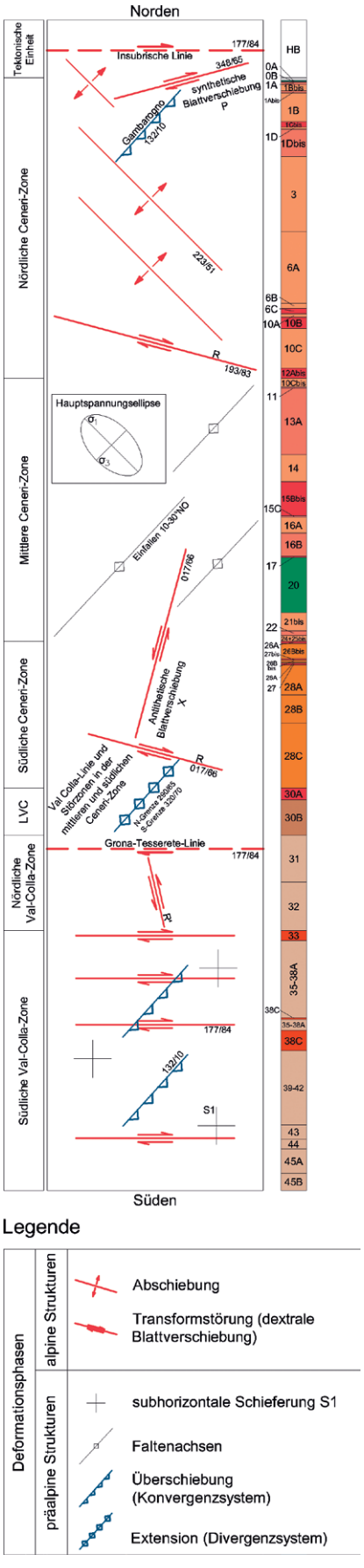
im Modell auf ein gross angelegtes Verformungssystem zurückführen, in welchem eine Reihe von Haupt- und Sekundärstrukturen entstanden, die ein einziges grossräumiges geodynamisches System verbindet (Kap. 2.1, 2.2 und 4.1).

In tektonischer Hinsicht kann der Monte Ceneri während der alpinen Gebirgsbildung als eine regional-, transpressive Scherzone betrachtet werden, die durch die dextrale Ost-West gerichtete Blattverschiebung an der Insubrischen Linie im Norden und der Tesserete-Grona-Linie im Süden entstand (Fig. 4-18). Innerhalb dieser Hauptscherzone sind zahlreiche sekundäre Strukturen entstanden, die von genauso grosser Bedeutung sind, wie die Hauptstrukturen. Die Streich- und Bewegungsrichtung dieser sekundären Strukturen lässt sich auf ein Netzwerk von Riedelbrüchen in einer dextralen Scherzone zurückführen. In allen tektonischen einheiten können synthetische Strukturen vom Typ «R-Riedelscherfläche» beobachtet werden. Die antithetischen Strukturen vom Typ «R'-Riedelscherfläche» haben eine variable Streichrichtung entlang der Nord-Süd-Achse und stehen im Zusammenhang mit den Über- oder Abschiebungen. Die Unterteilung der tektonischen Einheiten im Projekt des CBT erfolgte auf Basis dieser Haupt- und Sekundärstrukturen des regionalen tektonischen Modells. Alle statistisch ausgewerteten Befunddaten der Trennflächen wurden hinsichtlich ihrer kinematischen Entwicklung interpretiert und im schematischen Befund-Blattverschiebungsmodell in Figur 4-18 übersichtlich dargestellt.

Die durch die strukturellen Analysen verdeutlichten tektonischen Strukturen lassen sich im Wesentlichen in Bezug zur Orientierung und Bewegungssinn auf die oben beschriebenen Haupt- und Sekundärsysteme zurückführen.

4.4 Vergleich zwischen Prognose und Befund

Das Gebirge beim Nordportal Vigana ist gekennzeichnet durch eine Falte (Antiform) mit vermutlich steil nach Norden geneigter Achsenebene, deren Lage jedoch in der Prognose nicht genau festgelegt werden konnte. Der nördliche Faltenschenkel, welcher im Portalbereich Vigana in Richtung Insubrische Linie steil einfällt, entsprach bezüglich Lage und Orientierung ungefähr der Prognose. Die Falte wird im zentralen Bereich des Scharniers durch die nach Süden flach einfallende Störungszone 1Cbis.1 im Liegenden (foot wall) etwas stärker und abrupt versetzt, was zu einem unregelmässigen Schieferungsverlauf führt, und dadurch in der Oströhre die ganze Faltenachsenebene um rund 220 m nach Norden verschiebt. Bis an die Südgrenze der nördlichen Ceneri-Zone im Val Mara (HB 12Abis) ist eine tendenzielle Übereinstimmung mit der Prognose erkennbar, aber mit einer viel höheren Variabilität, die in dieser Grössenordnung in der Prognose wegen der geringen Auflösung nicht erkannt werden konnte. Diese Mikrozonierung der Schieferungs- und Trennflächen, dargestellt in Figur 4-19, ist an die einzelnen Störungszonen im transpressiven System gebunden und erstreckt sich über alle tektonischen Einheiten entlang des CBT. Diese Mikrozonierung bewirkt auch, dass in gewissen Homogenbereichen die Schieferung im Befund gut mit der Prognose übereinstimmt, sowohl bezüglich der



Legende

Fig. 4-18: Schematische Darstellung der wichtigsten Verformungsstrukturen im Blattverschiebungssystem des Monte Ceneri. Die Interpretation basiert auf den statistischen Auswertungen der Trennflächen im Befund.

Fallrichtung als auch des Fallazimuts, während sie in anderen Homogenbereichen einzelne grössere Abweichungen gegenüber der Prognose zeigt. Durch die Verschiebung der Val-Mara-Störungszone 12Abis.1 um 140 m nach Norden gehen die Homogenbereiche 10Cbis–11 in die mittlere Ceneri-Zone über und sind deshalb und aufgrund ihrer subparallelen Orientierung nicht mit der Prognose vergleichbar.

Auch in der mittleren Ceneri-Zone zeigt die Orientierung der Schieferung einen vergleichbaren Wert wie die Prognose, sie weist allerdings auch da eine unregelmässige Streuung von Fall- und Streichrichtung auf. Die kataklastisch-kakiritische Störungszone 15B.1 hatte in der Prognose eine wahre Mächtigkeit von 15 m und eine effektive Länge in der Oströhre von 105 m. Trotz dem kleinen Streubereich beider Grenzen von ± 35 m, welche sich auf die Prognosegenauigkeit der Kernbohrung CB 84 stützten, hatte die Störungszone 15B.1 eine effektive Länge im Vortrieb von 475 m. Diese deutliche Abweichung von der Prognose erklärt sich mit einem nicht planaren Verlauf der Störungszone in vertikaler und horizontaler Richtung. Während mit der Kernbohrung eine einzige Störungszone identifiziert werden konnte, zeigte sich beim Vortrieb, dass der gesamte Homogenbereich 15Bbis aus einer Serie von vier Störungszonen besteht.

An der Grenze zwischen der mittleren und südlichen Ceneri-Zone konnte kein scharfer und diskordanter Übergang der Schieferung festgestellt werden, da einerseits der Kontakt zwischen Ceneri-Paragneis und Giumello-Gneis eine ursprünglich petrographische und nicht tektonische Grenze war und anderseits, weil die prognostizierte Störungszone 27.1 das Gebirge nicht verwirft und die Störungszone 26A.1 weiter nördlich liegt, was dazu führt, dass die Schieferung in den Homogenbereichen 21bis–24+25bis um 5–15° weniger steil einfällt und kontinuierlich in eine zum Tunnel parallel streichende Schieferung umbiegt. In den Homogenbereichen der Giumello-Gneis-Formation (HB 28A – 28C) ist das Fallazimut der Schieferung leicht mehr SE orientiert.

An der Val-Colla-Linie werden die Schieferungsflächen zwischen südlicher Ceneri-Zone und Val-Colla-Zone umorientiert. Rund eine Häufigkeit von 15 % der Schieferungsflächen der LVC lassen sich statistisch zu den subparallelen Schieferungsflächen (103/76) zählen, während die Hauptorientierung in der Störungszone des Homogenbereichs 30A eine Orientierung von 302/62 aufweist und in der Oströhre 186 m weiter im Norden beginnt. Die vier definierbaren Schieferungsfamilien zusammen mit den Störungszonen zeigten, dass das geologisch-strukturgeologische Modell der Val-Colla-Linie komplexer war als prognostiziert. Anstelle einer sich wiederholenden Sequenz von kakiritischen oder kataklastischen Störungszonen, Glimmerschiefer und Gneis durch die gesamte Val-Colla-Linie hinweg ist die Val-Colla-Linie petrographisch und strukturgeologisch zweigeteilt. Sie besteht auf der Nordseite aus einer Hauptstörungszone (HB 30A) und im südlichen Streckenabschnitt aus vorwiegend intaktem Gneis und Schiefer.

Die nördliche Val-Colla-Zone zeigt im Vergleich zur Prognose ähnlich orientierte Schieferungsflächen, sie sind wegen des verfalteten Gebirges in dieser tektonischen Einheit unregelmässiger orientiert. Der Vergleich Befund- und Prognosemodell zeigt, dass sich das Umkippen des Fallazimuts von Norden nach Süden im Tunnel rund 500 m weiter nördlich befindet als prognostiziert. Der Grund ist eine Verschiebung der Faltenstrukturen nach Norden mit gleichzeitigem

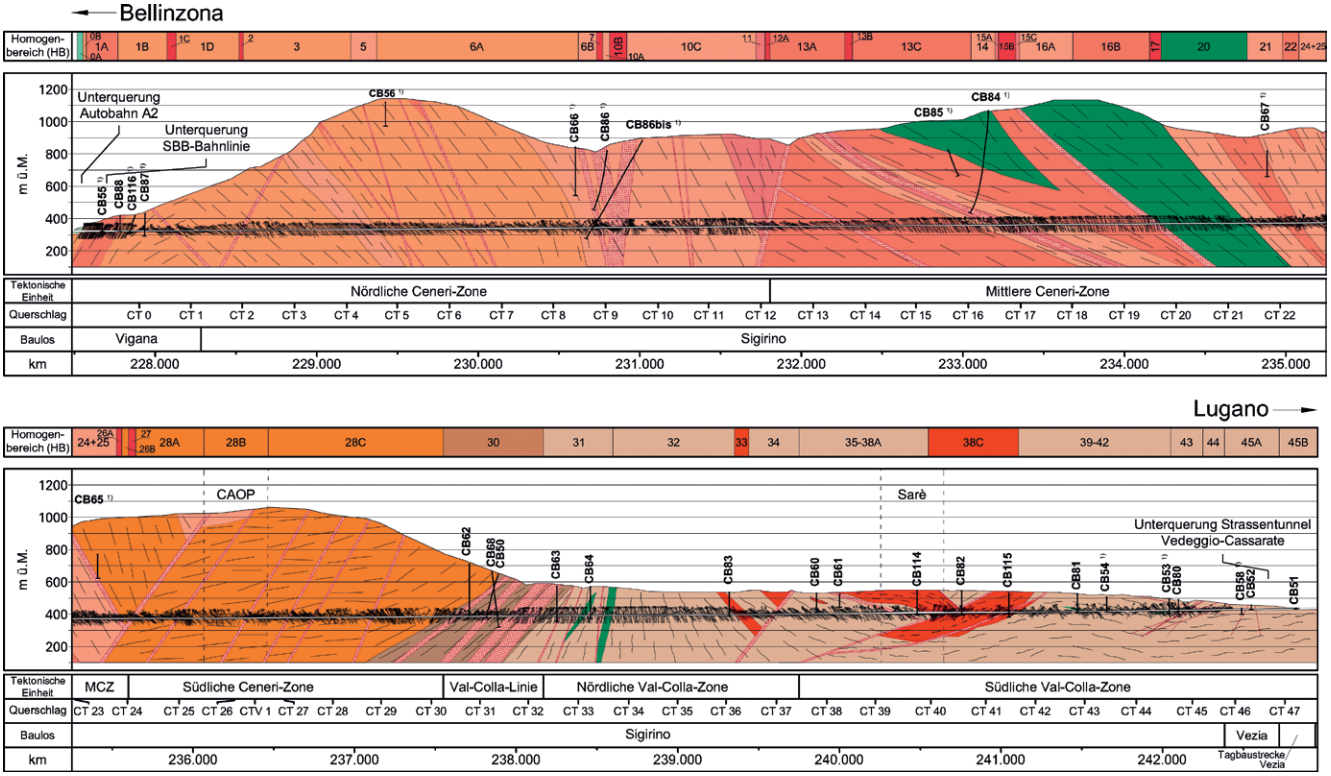


Fig. 4-19: Gegenüberstellung der prognostizierten Schieferung im geologischen Längenprofil der Oströhre und der Schieferung im Befund (schwarze dicke Linien). Die im Tunnelvortrieb aufgenommenen Schieferungsorientierungen zeigen Mikrozonen entlang der Tunnelachse.

früherem Abflachen des Fallwinkels ab dem Homogenbereich 33. In der südlichen Val-Colla-Zone sind Abweichungen des Fallwinkels und -azimuts von der Prognose zu verzeichnen, wie z.B. im Streckenabschnitt bei der Durchörterung des Val Ponteggia oder in den Homogenbereichen des Bernardo-Orthogneises Das unterschiedlich flachere Einfallen führt dazu, dass in einer flachen und welligen Schieferung der Streubereich bei einer kleinen Orientierungsänderung grösser wird.

Die Störungszonen im Bereich des Verzweigungsbauwerks Sarè sind eng mit der Ausdehnung des Bernardo-Orthogneises verknüpft und bilden nahe der lithologischen Grenzen im Stabbiello-Gneis nicht prognostizierte, unregelmässig verlaufende geotechnische «Schwächezonen», in denen die Störungszonen in Form von breit gefächerten Bündeln mit Schmierlassen oder kleinen Scherzonen auftraten und im Störungszonen-System des Homogenbereichs 35–38A zu bautechnischen Problemen, insbesondere während des Ausbruchs des Verzweigungsbauwerkes Sarè West, führten.

Die Anzahl der Kluftscharen, die angetroffen wurden, übersteigt in jedem Homogenbereich diejenigen der in der Prognose aufgeführten Familien. Anderseits wurden die Trennflächen während der Erarbeitung der Prognose aufgrund der unregelmässigen Orientierungen und den grösseren Unsicherheiten unterschätzt. Die Abweichung von der Prognose, insbesondere in der mittleren Ceneri-Zone hatte keinen bautechnischen Einfluss beim Vortrieb. Das gemittelte geologische Überprofil im Baulos Sigirino betrug 1,2 m^3/' in der Oströhre und 1,5 m^3/' in der Weströhre und entsprach im Endeffekt ungefähr der im Leistungsverzeichnis angenommene Grösse von 1,0 m^3/'.

5. Hydrogeologie

Der Monte-Ceneri-Pass und die beiderseits anschliessenden Talhänge bilden die oberirdische Wasserscheide zwischen den Einzugsgebieten des Lago Maggiore und des Lago di Lugano, wobei der bedeutendere Teil im Sottoceneri liegt, welches durch die Hauptfliessgewässer Vedeggio und Cassarate entwässert wird. Der Vedeggio entspringt im Val d'Isone und quert den CBT in der Ceneri-Zone, während der Cassarate in der Region Monti di Gola di Lago und im Val Colla beginnt.

Neben dem einzigen natürlichen See, dem Lago d'Origlio, welcher im Becken einer Endmoräne liegt, existieren zahlreiche muldenartige Feucht- und Sumpfgebiete, deren Stauhorizonte von siltig-toniger Grundmoräne gebildet werden.

Die Grundwassermächtigkeit in den quartären Lockergesteinen hängt u.a. von deren variablen Mächtigkeit ab, welche sich zwischen wenigen Metern und mehreren Dekametern bewegt. Der Grundwasserspiegel seinerseits wird von den lokalen hydrogeologischen Verhältnissen, wie etwa dem Vorflutniveau, reguliert. Mit Ausnahme der Portaleinschnitte, dem Lockergesteinsvortrieb unter der Autobahn A2 in Vigana und der offenen Tagbaustrecke Vezia gibt es keine Schnittstellen mit dem Grundwasser in den Lockergesteinen.

Das kristalline Grundgebirge besteht aus den oben geschilderten unterschiedlichen Gesteinen (Gneis, Schiefer, Phyllit, Amphibolit), welche unterschiedlich intensiv durchtrennt sind.

Da eine primäre Permeabilität (Porosität in der Gesteinsmatrix) fehlt, hängen die Wasserfliesswege nur von der sekundären Permeabilität, also dem Durchtrennungs- und Zerscherungsgrad und der Konnektivität der Klüfte ab. Die Permeabilität erreicht in kataklastischen Störungszonen lokal höhere Werte als im intakten Gebirge. Zudem nimmt die Wasserwegsamkeit im oberflächennahen, aufgelockerten und verwitterten Gebirge zu.

Während der Ortsbrustaufnahme erfasste der Geologe soweit wie möglich die initiale Schüttungsmenge von allen Quellen beim Eintritt in das Tunnelprofil des CBT und bestimmte *in situ* die Feldparameter wie Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert. Das Analytiklabor Acradis Schweiz AG in Schlieren bestimmte den Wasserchemismus. (Anh. 13-m, 13-o).

5.1 Bergwasserführung

5.1.1 Grundlagen und Prognose

Zur Risikoverminderung im Vortrieb wie auch im Betriebszustand des Tunnels kommt bereits der Prognose der Bergwasserverhältnisse eine hohe Bedeutung zu, sei es für die Bemessung der Wasserableitungen (Abschätzung der initialen, temporären sowie der längerfristigen, stationären Zuflussmengen) und deren Funktionstüchtigkeit (Einfluss der Wasserchemie auf das Bauwerk), wie auch schliesslich aufgrund einer durch die Bergwasserdrainage im Tunnel erzeugten, potenziellen Beeinträchtigung der Schüttungen der Oberflächenquellen, sowie potenzielle Oberflächensetzungen durch Absenkung des Grundwasserspiegels.

Der für den CBT zu erwartende stationäre Bergwasseranfall wurde zwischen 49 l/s (wahrscheinlicher Fall) und 84 l/s (konservativer Fall) geschätzt. Zusammen mit den damit verbundenen Nebenbauwerken (FIS, CPS, Fortsetzung des CBT nach Süden) wurde mit 56–96 l/s Wasseranfall gerechnet. Für die initialen, temporären Wasserzuflüsse, deren Dauer auf einige Stunden bis wenige Tage geschätzt wurde, wurden relativ geringe Schüttungsmengen von 5–20 l/s angenommen. Grössere temporäre Schüttungsmengen von mehr als 20 l/s wurden für unwahrscheinlich gehalten.

Bei der Prognose der Schüttungsmengen ging man von dem aus den Bohrloch-Durchlässigkeitstests hergeleiteten Durchlässigkeitsbeiwert aus. Für die Störungszonen betrugen die Durchlässigkeitsbeiwerte je nach Kataklasit- und Kakiritanteil 1.E-07 und 8.E-10 m/s (wahrscheinlicher Fall) bzw. 1-5.E-07 m/s (konservativer Fall). Für das intakte Gebirge lagen die Werte zwischen 1.E-07 und 7.E-10 m/s (wahrscheinlich) und 2.E-07 und 5.E-09 m/s (konservativ).

Die höchsten Schüttungsmengen wurden entlang der Tunnelstrecke zwischen Nordportal Vigana bis etwa 4 km südlich davon, im Zusammenhang mit den Störungszonen des Val d'Isone, sowie im gering überlagerten, stark durchtrennten und aufgelockerten südlichen Abschnitt (nördliche und südliche Val-Colla-Zone bis Südportal Vezia) erwartet. Im mittleren Tunnelbereich hingegen (mittlere und südliche Ceneri-Zone inkl. Val-Colla-Linie) waren geringe bis sehr geringe Bergwasserzutritte prognostiziert.

Der Untergrund des Lago d'Origlio wurde hinsichtlich einer möglichen Beeinträchtigung des Seewasserstandes durch den Tunnelvortrieb speziell erkundet. Die Erkundungsbohrungen konnten die als günstig bis sehr günstig prognostizierten Eigenschaften des Seeuntergrundes (mächtige und sehr gering durchlässige Grundmoräne) bestätigen, weshalb dieses Risiko zu einem frühen Zeitpunkt während der Projektierung als tief eingestuft werden konnte.

5.1.2 Initiale Zuflussmengen und Standorte der Wassereintritte beim Vortrieb

Im Allgemeinen erreichten die initialen Schüttungsmengen aller 536 erfassten Quellen beim Vortrieb Werte von weniger als 0,1 l/s. Ausnahmen bildeten die Höchstwerte im Baulos Vigana in einem wasserführenden Abschnitt 140–170 m ab dem Portal, die lokal 20,5 l/s erreichten. Summiert über den ganzen CBT stammen rund 86% der initialen Schüttungsmenge aus der Weströhre beim Vortrieb Vigana. Ausserhalb dem Baulos Vigana zeigt die Oströhre tendenziell höhere Zuflüsse (Fig. 5-4). Dieser Umstand ist auf den jeweiligen Vortriebstand zurückzuführen, weil der vorauseilende Vortrieb dazu neigt, das Gebirge so zu drainieren, dass auch der Bereich der nacheilenden Röhre betroffen wird. Dieses Phänomen ist aber nicht auf allen Streckenabschnitten aufgetreten, da die Wasserwege ausserhalb der Portalzonen lokal begrenzten, kluftreicheren Zonen folgen.

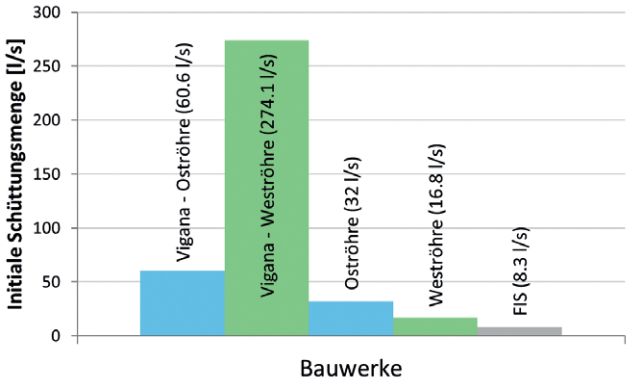


Fig. 5-1: Verteilung der gesamten initialen Schüttungsmenge beim Vortrieb des CBT nach Bauwerksabschnitt. Das Baulos Vigana ist von den restlichen Tunnelröhren getrennt aufgeführt.

Es liessen sich weitere 437 Abschnitte mit Tropfstellen pro 10 m in beiden Tunnelröhren beobachten. Die totale Schüttungsmenge aller Tropfstellen lässt sich in beiden Tunnelröhren auf 3,2 l/s schätzen. Im FIS summieren sich die Tropfstellen auf eine Schüttungsmenge von 0,8 l/s.

Tab. 5-1: *Klassifizierung der Tropfstellen nach dessen Intensität für Abschnitte pro 10 m.*

Beschreibung Tropfstellen pro 10 m	Grad
Keine Tropfstellen	0
1–3 Tropfstellen	1
>3 Tropfstellen	2
Starke Tropfstellen	3

Fig. 5-3 fasst die Schüttungsmengen aus den Quellen und Tropfstellen nach Bauwerk zusammen, unterteilt in den Vortrieb Vigana, FIS und die restlichen Abschnitten beider Tunnelröhren des CBT. Die gesamte initiale Schüttungsmenge aller Quellen und Tropfstellen war in Vigana sechs Mal höher als im restlichen Abschnitt des CBT. Ein erkennbares Muster ergibt sich aus dem Verhältnis der Schüttungsmengen zwischen Quellen und Tropfstellen. In Vigana betrug die Schüttungsmenge aus den Tropfstellen rund ein

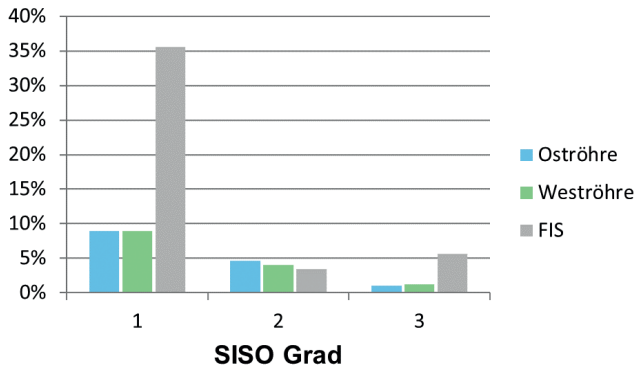


Fig. 5-2: Verteilung der Abschnitte mit Tropfstellen entlang beider Tunnelröhren und im FIS. Die geschätzte gesamte Schüttungsmenge aller Tropfstellen ergibt 3,2 l/s bzw. 0,8 l/s im FIS.

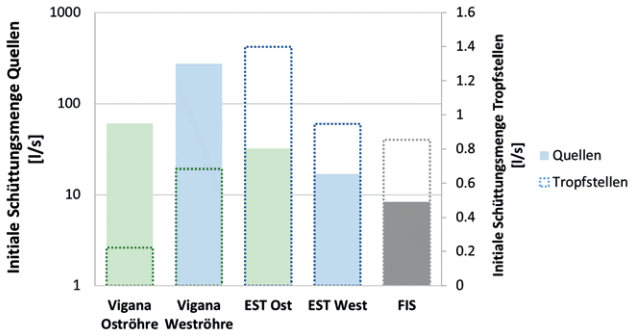


Fig. 5-3: Vergleich der Schüttungsmengen aus Quellen und Tropfstellen, geordnet nach Bauwerksabschnitt.

Drittel der Summe aller Quellen, während in den übrigen Bauwerken in der Regel die Schüttungsmenge umgekehrt ein Drittel höher ist als die der Quellen.

Im hydrogeologischen Modell des CBT lassen sich zwei Arten von Aquiferen unterscheiden. Einerseits ein typischer Hangaquifer, der am nördlichen Ende des Tunnels auf den ersten 400 m zwischen dem Portal Vigana bei km 227.518 und km 227.920 liegt. Dieses hydrogeologische System mit hydraulischer Verbindung zur Oberfläche liegt im zerklüfteten und aufgelockerten Felsen und wird durch den Zerscherungsgrad gesteuert. Der Hangwasserspiegel befand sich vor Baubeginn rund 10 m unter der Oberfläche und sank beim Vortrieb bis auf die Kote des Tunnels ab.

Die Ergebnisse der chemischen Wasseranalysen (s. Kap. 5.2), die entsprechende kumulative Kurve der gesamten Schüttungsmengen (Fig. 5-4) sowie die stationären Restwassermengen deuten auf eine enge Verbindung mit der Oberfläche hin. In den übrigen Abschnitten beider Einspurtunnel, einschliesslich der Südportale, hatten die Aquifere einen anderen Charakter. Nur aufgrund der geringen Gebirgsüberlagerung lässt sich die eine Infiltration von Oberflächenwasser nicht erklären, denn die letzten 1500 m des Südvortriebes sind durch eine vergleichbare Gebirgsüberlagerung, wie bei den Nordportalen gekennzeichnet, ohne einen Hinweis auf oberflächennahes Grundwasser zu finden. Während in der Störungszone 1Cbis beim Vortrieb Vigana zahlreiche Quellen und Tropfstellen auftraten, führen alle übrigen Störungszonen des CBT selten Quellen.

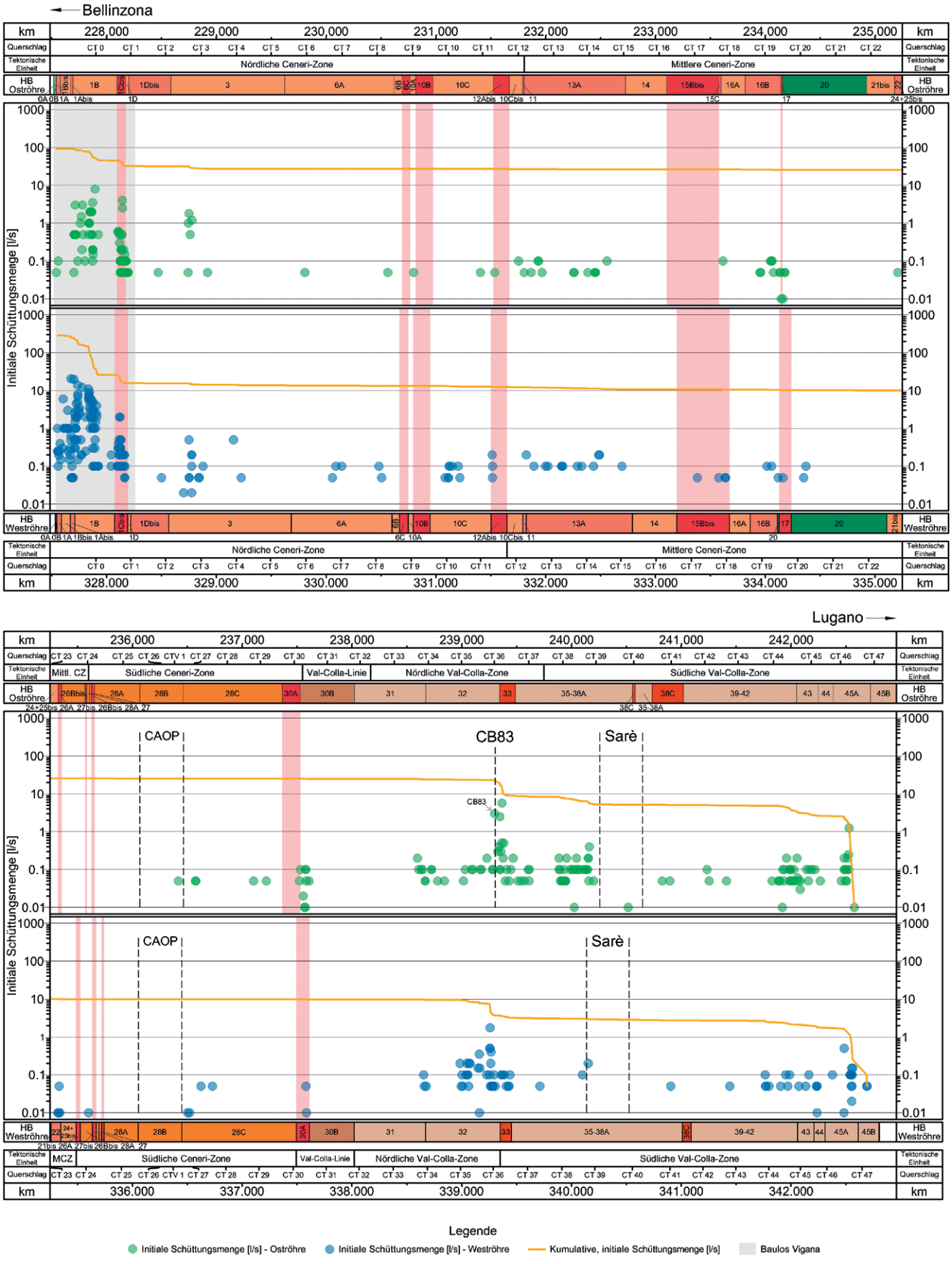


Fig. 5-4: Verteilung der Quellen mit initialen Schüttungsmengen beim Vortrieb entlang der Tunnelachse Ost. Die Daten der Weströhre sind auf die Oströhre projiziert.

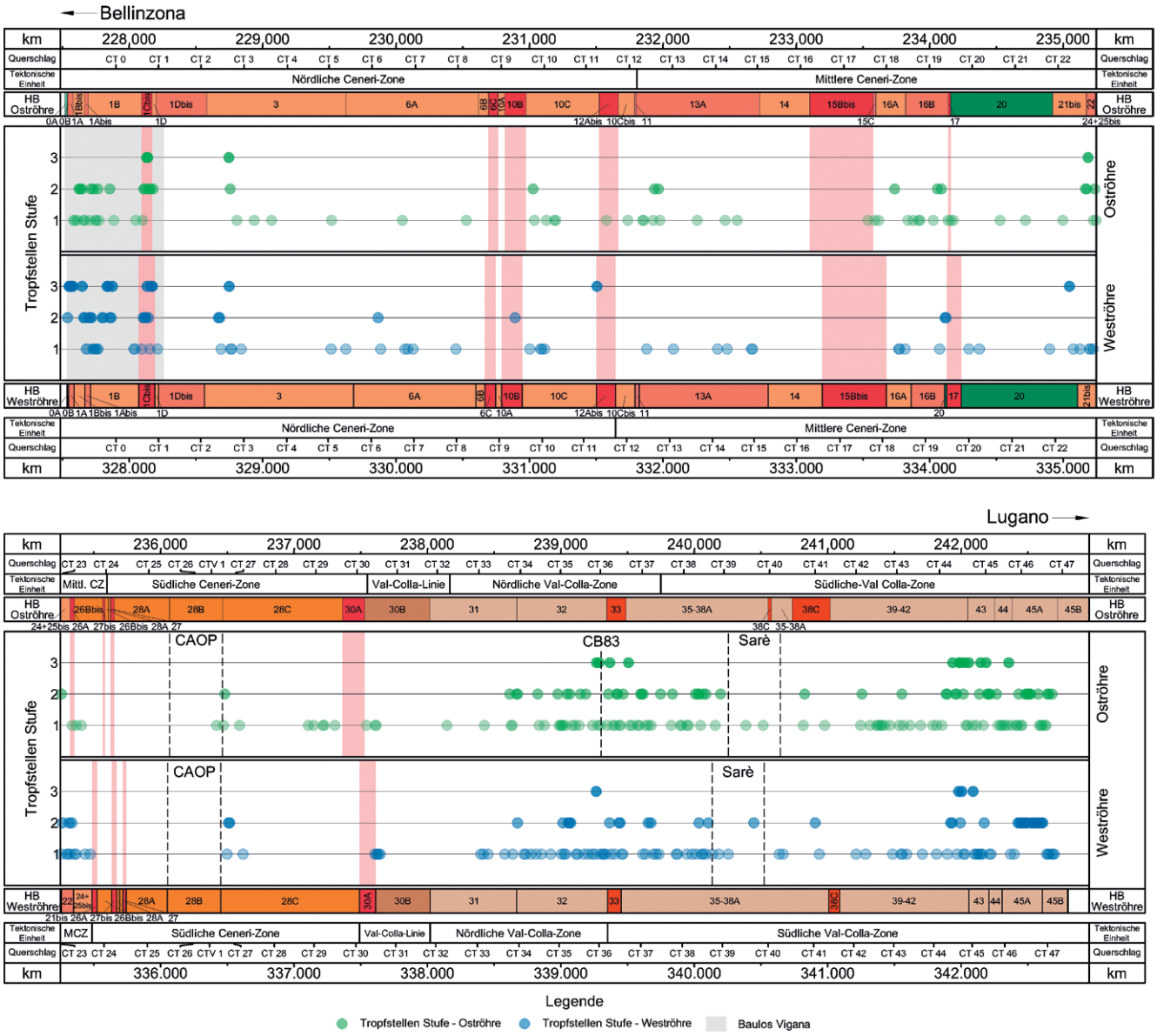


Fig. 5-5: Verteilung der Abschnitte mit Tropfstellen pro 10 m nach Grad beim Vortrieb der Tunnelachse Ost. Die Daten der Weströhre sind auf die Oströhre projiziert.

Der zweite Aquifertyp kommt auf rund 97 % der Strecke beider Einspurtunnel vor und besteht weitgehend aus isolierten, lokal beschränkten Bergwasservorkommen, welche wegen der sehr geringen Gesteinsdurchlässigkeiten nicht untereinander und nicht mit oberflächennahen Systemen verbunden sind. Diese Wässer sind oft sehr stark ionengetauscht, was auf die langsame Zirkulation, verbunden mit langer Aufenthaltszeit im Gestein, zurückzuführen ist.

Die Figuren 5-4 und 5-5 zeigen die Verteilung aller angetroffenen Quellen beim Vortrieb und Abschnitte mit der Anzahl Tropfstellen pro 10 m entlang der Tunnelachsen des CBT, wobei die jeweiligen kumulierten Schüttungskurven wegen des steigenden Vortriebs Richtung Lugano umgekehrt nach Norden zunehmen.

Der erste grosse Anstieg der kumulierten Schüttungskurve befindet sich im Gegenvortrieb Vigana und erreichte lokal in der Kaverne West km 227.675 (auf die Tunnelachse Ost projiziert) initiale Schüttungen bis 20,5 l/s.

Ausserhalb des Vortriebes Vigana, auf der Strecke zwischen Ceneri-Zone und Südgrenze der Val-Colla-Linie beträgt die durchschnittliche initiale Schüttungszunahme 0,7 l/s/km.

Die Zunahme der initialen Schüttungsmenge der Quellenzutritte in der Val-Colla-Zone ist mit 5,1 l/s/km um den Faktor 7 höher als im Norden des CBT. Dabei traten die relevantesten Wasserzutritte in der Umgebung der Kernbohrung CB 83 in der Oströhre bei km 239.299 sowie im Bernardo-Orthogneis des Homogenbereichs 33 auf. Das Bohrloch der Kernbohrung CB 83, welches bis in das Tunnelprofil hineinreicht, führte eine initiale Schüttungsmenge von 3,0 l/s mit einem Oberflächenwasserchemismus. Die systematische Schlagbohrung in der Oströhre bei km 239.366, welche nur 95 m von der Kernbohrung CB 83 entfernt liegt, führte eine Quelle mit 5,7 l/s mit einem Chemismus, der auf Tiefenwasser deutet. Der hydraulische Einflussbereich ist durch die geringere Durchlässigkeit auf einen kleinen Radius lokal um das Bohrloch der Kernbohrung begrenzt.

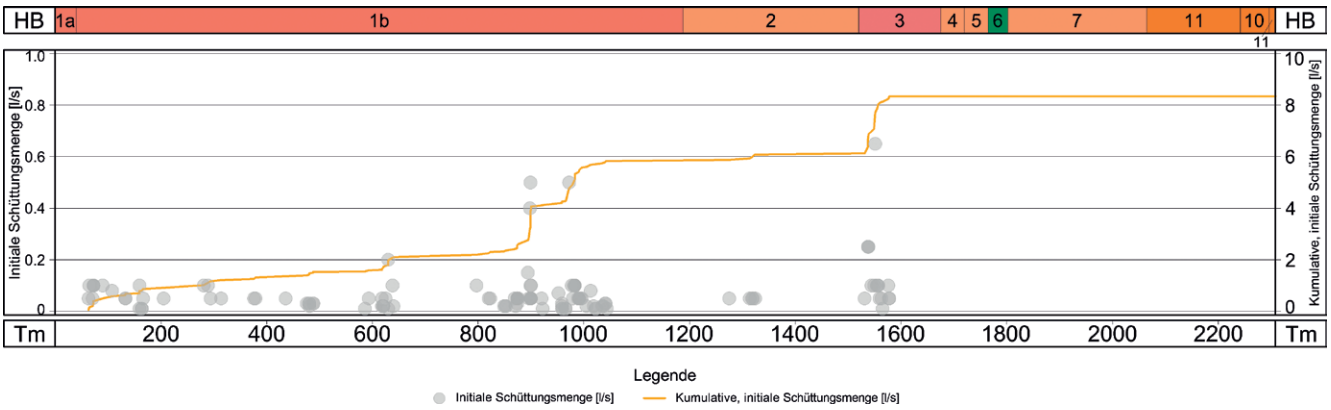


Fig. 5-6: Initiale Schüttungen mit kumulierter Schüttungskurve für alle angetroffenen Quellen beim Vortrieb im FIS.

Im FIS, welcher ein Gefälle von 4,9% aufweist, liessen sich zwischen dem Portal und Tm 1578 häufig Quellen und Tropfstellen beobachten, deren initiale Schüttungsmenge zu 96% aus dem Ceneri-Orthogneis und aus Hornfels stammte (Fig. 5-6). Die Wasserproben aus den ersten 400 m, wo die Gebirgsüberlagerung weniger als 150 beträgt, zeigen – ähnlich wie in Vigana – chemische Eigenschaften eines Hangaquifers mit Verbindungen zur Oberfläche.

5.1.3 Stationäre Zuflussmengen und Gesamtabfluss

Eine besondere Herausforderung war die Einschätzung und Erfassung von sehr kleinen stationären Wasserzutritten im rückwärtigen Bereich des Tunnelvortriebes besonders im Hinblick auf die Auswertung für die Härtestabilisierung im Sickerkies. Zudem verunmöglichte das Versickern des Quellwassers in die Sohle eine direkte Schüttungsmengenmessung. Mittels optischer Kontrollen im Tunnelparament erfasste der Geologe alle Nässe- und Tropfstellen und ermittelte auf empirische Weise die residuale Schüttungsmenge (Tab. 5-2).

Tab. 5-2: *Koeffizient zur Ermittlung von stationären Schüttungsmengen basierend auf die Erfahrungen beim Vortrieb des CBT.*

Koeffizient zur Abschätzung der Schüttungsmengen			
	Grad	**Beschreibung**	**l/min**
Tropfstellen pro 10 m	1	1–3 Tropfstellen	0.1
	2	>Tropfstellen	0.5
	3	Starker Tropf	3
Nässestellen pro 10 m	1	Einzelne nasse stellen	0.01
	2	Vorwiegend nass	0.2
	3	Durchgehend nass	1

Alle Quellen zeigten in kurzer Zeit stark rückläufige Schüttungsmengen und liessen sich im rückwärtigen Bereich bereits nach wenigen Tagen nicht mehr überwachen, da sie nur noch lokal in Form von Tropf- oder Nässestellen im Tunnelprofil erschienen. Insgesamt 16 Quellen mit initialen Schüttungsmengen zwischen 0,1 und 1,8 l/s, welche sich während einer durchschnittlichen Messdauer von 18 Tagen beobachten liessen, zeigten eine Abnahme der Schüttungsmenge von 4% pro Tag in der Ceneri-Zone und 25% in der Val-Colla-Zone. Figur 5-7 illustriert die Abnahmen der initialen Schüttungsmengen, geordnet nach relevanten Bauwerksabschnitten. Die Quellenmessungen und Aufnahmen von Tropf- und Nässestellen dauerten in Abhängigkeit des Innenausbaus mit Ausnahme des Portalbereichs Vigana bis anderthalb Jahre nach Vortriebsende. Je nach Möglichkeit nahm der Geologe die wasserführenden Abschnitte mehrere Male auf. Die Beobachtung der stationären Schüttungsmengen in Vigana erfolgte durch automatische Überwachung der Gesamtschüttungsmenge im Sammelbecken. Im FIS stand eine automatische Durchflussmessstelle in einem Drainageschacht zur Verfügung, welche die stationäre Wasserführung registrierte. Die Ergebnisse aus der Langzeitüberwachung für die stationäre Wasserführung im ganzen CBT sind in Figur 5-8 zusammengefasst.

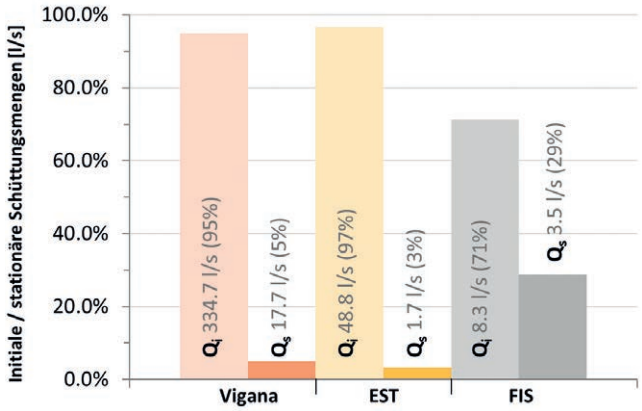


Fig. 5-7: Vergleich zwischen initialen (Q_i) und stationären Schüttungsmengen (Q_s) unterteilt nach relevanten Bauwerksabschnitten. In der Auswertung der kumulierten Schüttungsmengen sind die Tropfstellen mitgezählt.

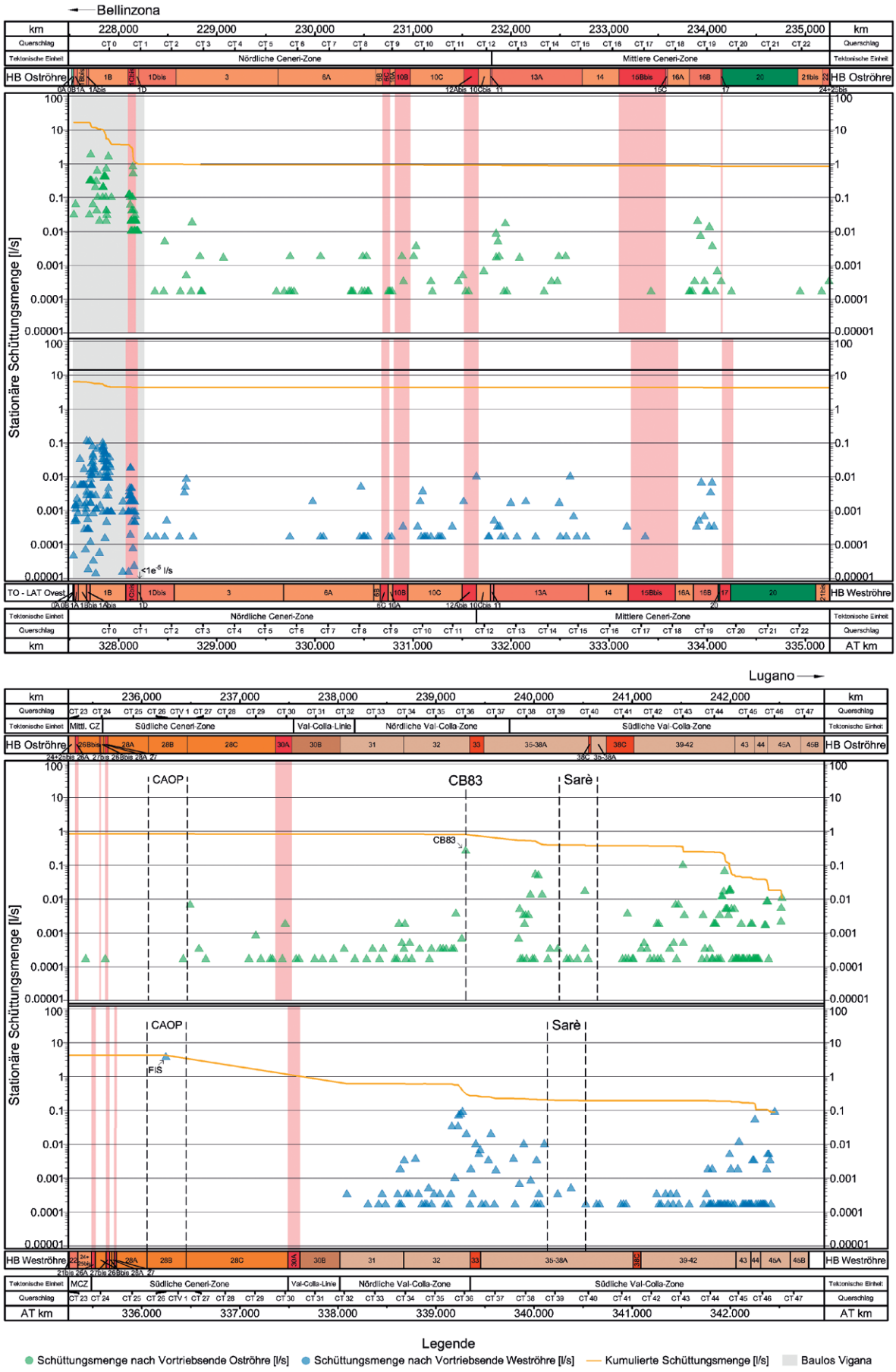


Fig. 5-8: Bergwasserzuflüsse nach Vortriebsende entlang beider Einspurtunnel am Ende der Vortriebsarbeiten im CBT. Angesichts den niedrigen Schüttungsmengen wurden die aufgezeichneten Tropf- und Nässestellen gemäss Erfahrungswerten in Fig. 5-2 in Schüttungsmengen umgewandelt. Die logarithmische Skala ermöglicht die Visualisierung von kleinen Schüttungsmengen $< 10^{-5}$ l/s.

5.2 Bergwasserbeschaffenheit

5.2.1 Hydrochemische Parameter

Von den insgesamt 536 in beiden Einspurtunnel und 113 im FIS angetroffenen Quellen entsprachen nur 38 Proben (drei im FIS) hinsichtlich Schüttungsmenge den Anforderungen für eine repräsentative Laboruntersuchung (Anh. 13-m bis Anh. 13-o). Häufig waren die Quellen durch Spritzbeton kontaminiert oder führten zu kleine Schüttungsmengen. Neben den *in situ* gemessenen Standardparametern, wie Temperatur, pH und elektrische Leitfähigkeit, analysierte das Labor den pH-Wert bei 25 °C, Kationen (NH_4^+, Ca^{2+}, K^+, Mg^+, Na^+), Anionen (SO_4^{2-}, Cl^-, F^-), den Stabilitätsindex nach Ryznar, SiO_2, freies CO_2 und die Karbonathärte, die allerdings wegen des hohen pH-Wertes im Tunnel oft nicht messbar war. Das Ziel der Analysen war die Prüfung der Betonaggressivität des Bergwassers (Kap. 5.2.2).

Darüber hinaus wurden 70 weitere Bergwasseranalysen (54 im FIS und 16 im Portalbereich Vigana) im Rahmen einer Dissertation durchgeführt (Marzocchi 2012).

Die Bergwasserbeprobung erfolgte über einen Zeitraum von 3 bis 15 Monaten nach dem Ende des Vortriebs. Aus diesem Grund werden die hydrogeochemischen Diagramme für den FIS getrennt dargestellt. Die Graphik in Figur 5-9 enthält nur zertifizierte Analysenergebnisse von Proben, die vom Baustellengeologen in den Einspurtunnel entnommen wurden.

Das im CBT angetroffene Bergwasser hat einen durchschnittlichen pH-Wert von 9,25, während er im FIS etwas höher bei 9,8 liegt.

Die Beschaffenheit der Bergwässer ist typisch für kristalline Gesteine. Die Analysen zeigen grosse Schwankungen der Gesamtmineralisation. Viele Bergwässer (FIS, Portalbereiche) sind gering mineralisiert. Zum Teil hohe Mineralisation zeigen die Wässer den portalfernen, tieferen, isolierten Bereichen. Die meisten Wässer sind stark basisch, was typisch ist bei Fehlen von karbonatischen Gesteinen. Die aus den tieferen, zentralen Bereichen stammenden Wässer zeigen oft sehr starken Ionentausch, was auf lange Aufenthaltszeiten in langsam zirkulierenden Systemen hinweist.

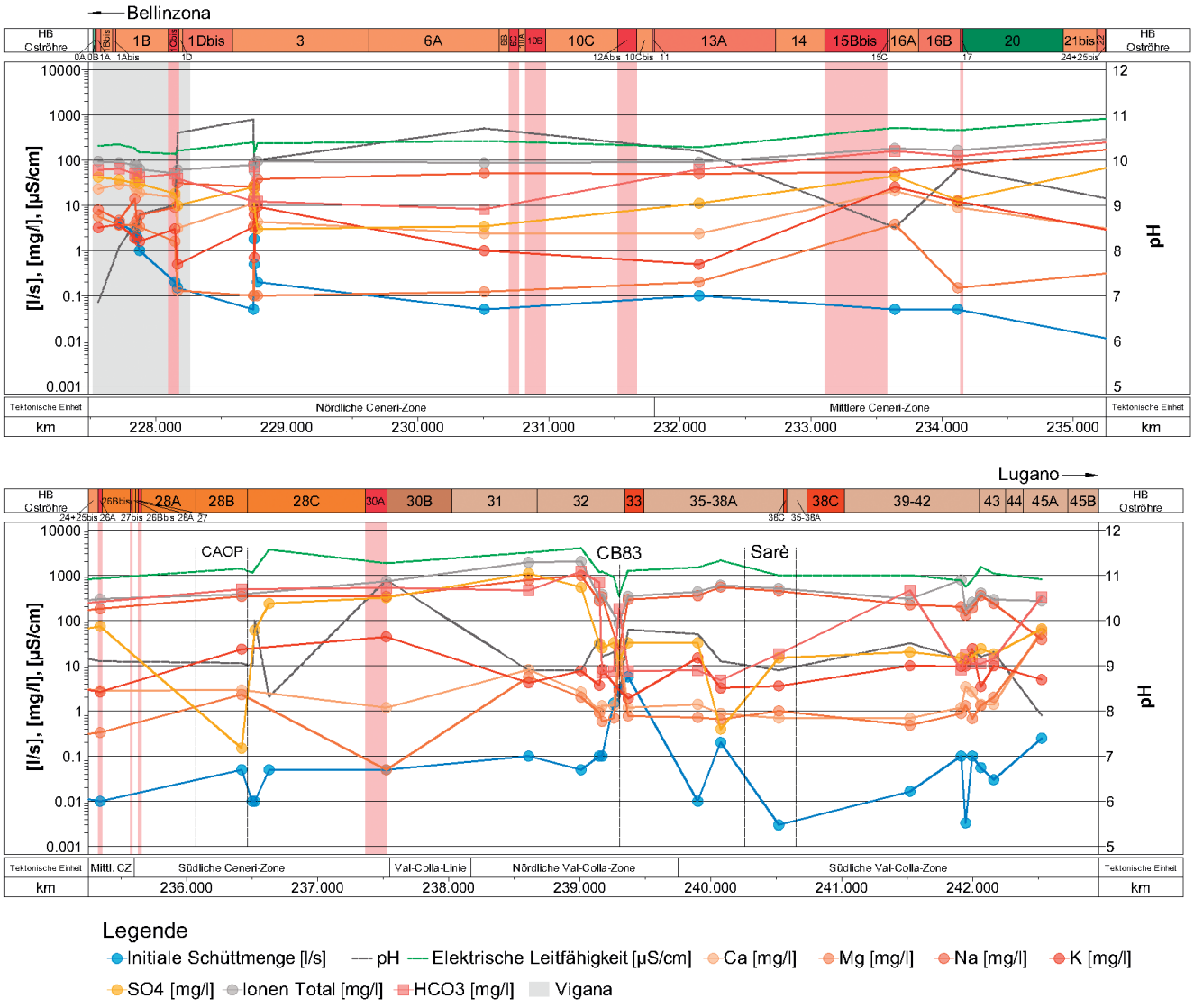


Fig. 5-9: Graphische Darstellung der Bergwassermineralisation im CBT. Alle Werte der Weströhre sind auf die Achse der Oströhre projiziert.

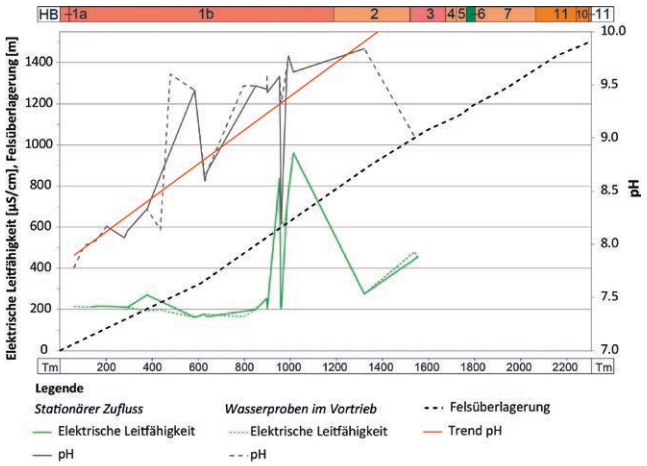


Fig. 5-10: Vergleich zwischen pH-Wert der initialen und stationären Quellen im Fensterstollen und der Felsüberlagerung.

Um den Einfluss oberflächennaher Wässer zu untersuchen, wurden als Referenz die chemischen Hauptbestandteile der Oberflächengewässer im Val Grande, Pianturino, Vedeggio, Cassarate und dem Capriasca sowie dem Wasser des Lago d'Origlio ermittelt und mit dem Bergwasser verglichen. Dabei lässt sich schliessen, dass sich die Oberflächeneinflüsse im FIS gut, innerhalb des CBT nur teilweise beobachten lassen (lokale Schwankungen sind auf oberflächennahen Aquiferen im Portalbereich der FIS sowie im Einflussbereich der Erkundungsbohrung CB 83 im CBT zurückzuführen).

5.2.2 Aggressivität des Bergwassers

Die wichtigsten Elemente im Bergwasser, die die Beständigkeit des Betons beeinflussen, nach Norm UNI EN 206-1: 2006 und Wegmüller (Wegmüller 2001) sind zusammen mit ihren Grenzwerten in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

Alle Quellenmessungen lagen unter dem Grenzwert und zeigten keinen betonagressiven Chemismus (Tab. 5-3).

Tab. 5-3: *Hauptparameter mit Einfluss auf die Beständigkeit des Betons. Elektrische Leitfähigkeit [µS/cm] gemessen bei 25°C.* [1] *Die Karbonatisierung von Beton für Bergwasser mit el. Leitfähigkeit <2500 µS/cm wird mit pH <6,5 reaktiv.* [2] *punktuelles Maximum, aufgebrauchte Quelle.*

Schädlichkeits-faktor	Analyse-ergebnis (max. Wert)	Schädlichkeits-grenzwert für Beton Typ SB2/SB4 (XA2)	Schädlichkeits-grenze für Stahleinbau
Sulfate (SO_4^{2-}) [mg/l]	1100	>3000	300
pH (Säuregrad)	6.9	5,5–4.5	
Magnesium (Mg^{2+}) [mg/l]	52	>3000	
Ammonium (NH_4) [mg/l]	11,5	>60	
Chlor (Cl^-) [mg/l]	560 [2] (median 9,05)		<500 (schwach schädlich)
Kohlendioxyd (CO_2) [mg/l]	Nicht bestimmbar [1]	>100	
El. Leitfähigkeit [µS/m]	4000 [1]		

5.2.3 Bergwassertemperaturen

Es ist davon auszugehen, dass die Wassertemperaturen in einem schlecht durchlässigen, von Oberflächeneinflüssen weitgehend isolierten Aquifer im Gleichgewicht mit den Felstemperaturen sind. Figur 5-11 zeigt den Vergleich der Bergwassertemperaturen mit der Felstemperatur. Die Differenz der beiden Messgrössen ΔT Wasser/Fels liegt im Bereich von –0,3 und 1,1°C. Mehr als die Hälfte der Messergebnisse (55%) entspricht dem thermischen Gleichgewicht im Streubereich ΔT Wasser/Fels <10%. In Anbetracht der einzelnen lokalen Messwerte lässt sich ein Nord-Süd-Gefälle feststellen, bei dem sich die grössten Temperaturdifferenzen ab der südlichen Ceneri-Zone bis zu Portal Vezia lokalisieren. Insgesamt 35% aller gemessenen Quellen, die eine inverse ΔT Wasser/Fels haben, weisen sehr geringe Schüt-

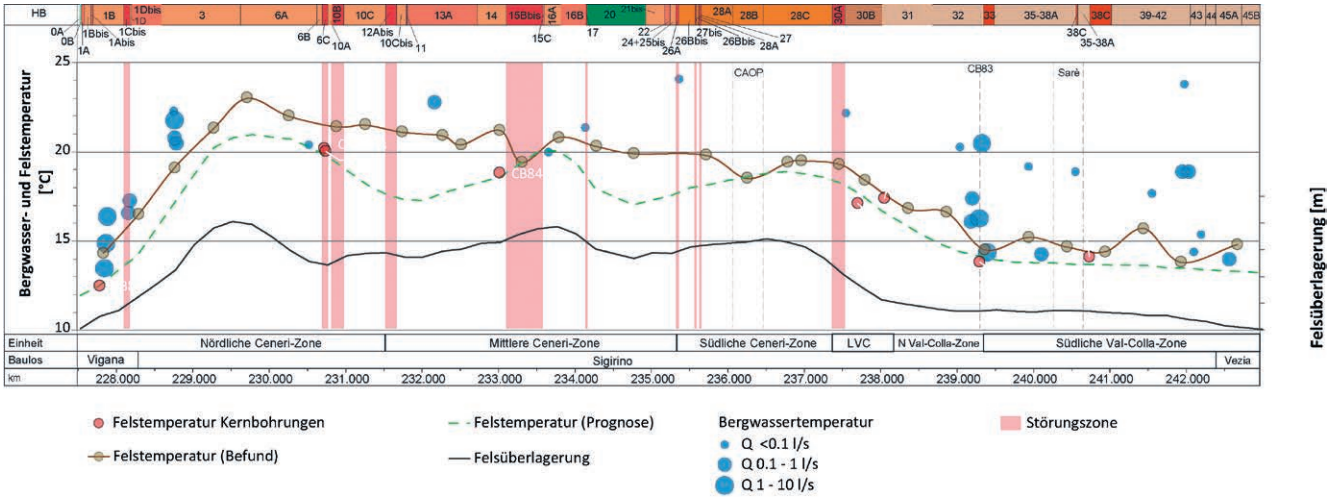


Fig. 5-11: Bergwassertemperaturen in Gegenüberstellung mit den Felstemperaturen, Felsüberlagerung und Prognose Felstemperatur und Schüttungsmenge (Q). Alle Werte der Weströhre sind in die Oströhre projiziert.

tungen im Bereich zwischen 0,003 und 0,1 l/s auf. In Anbetracht der einzelnen lokalen Messwerte lässt sich ein Nord-Süd-Gefälle feststellen, bei dem sich die grössten Temperaturdifferenzen ab der südlichen Ceneri-Zone bis zum Portal Vezia ergibt. Insgesamt 35% aller gemessenen Quellen, die eine negative Differenz ΔT Wasser/Fels haben, weisen sehr geringe Schüttungen im Bereich zwischen 0,003 und 0,1 l/s auf. Bei diesen kleinen Schüttungen, die ursprünglich tiefere Temperaturen als die Umgebungsluft im Tunnel hatten, wurden bereits beim Austritt im Tunnelrandbereich erwärmt, was das Messergebnis verfälschte.

5.3 Bergwasserfassung und Bergwasserentwässerung

5.3.1 Bergwasserentwässerung im CBT

Während des Betriebs des CBT wird sämtliches Bergwasser aus den beiden Einspurtunnel, dem Fenster- und dem Erkundungsstollen mit einem Gefälle zwischen 3‰ und 9,96‰ (Tab. 5-4) in Richtung Nordportal Vigana entwässert (Fig. 5-12).

In die Dimensionierung des Ableitungssystems sind ebenfalls die Prognosewerte der zukünftigen Fortsetzung Süd eingeflossen. Unter Berücksichtigung der Sicherheit im Ereignisfall ist in beiden Portalbereichen ein Trennwassersystem eingebaut, während in den restlichen Streckenabschnitten des CBT ein Mischwassersystem zur Entwässerung (300 m ab Nordportal Vigana) eingebaut wird.

Tab. 5-4: *Übersicht des Nordgefälles im CBT, eingeteilt nach Streckenabschnitten.*

Streckenabschnitt	Gefälle entlang der Tunnelachse
Gegenvortrieb Vigana	3‰
CBT Nord und Süd ab und inklusiv dem Verzweigungsbauwerk Sarè	6,3‰
CBT Süd bis Verzweigungsbauwerk Sarè und Gegenvortrieb Vezia	9,96‰

Für die Gewährleistung der geforderten Dauerhaftigkeit der Tunnelbauwerke und der bahntechnischen Anlagen im CBT ist ein trockenes Raumklima untertage unabdingbar. Dies gewährleistet eine Teilabdichtung der beiden Einspurtunnel und eine Vollabdichtung im Einmündungsbereich der Querschläge bis zur Querschlagstür. Als Einbaukriterium für die Vollabdichtung gilt ein Sulfatgehalt (SO_4^{2-}) >2000 mg/l (s. Kap. 5.2.2) und Schüttungsmengen >0,5 l/s/m in der Sohle. Einzelne Wassereintritte mit grösseren Schüttungsmengen sind mittels flexibler Halbschalen und PE-Rohren gefasst und direkt in die Gewölbedrainage geleitet. Das übrige austretende Bergwasser fliesst durch die Aussenschale in die Gewölbedrainageleitung (Fig. 5-16) und alle 100 m über eingebaute Inspektionsschächte in die Mischwasserleitung (Fig. 5-13).

Eine Entwässerungsanlage beim Norportal Vigana sammelt das gesamte Berg- und Schmutzwasser des CBT.

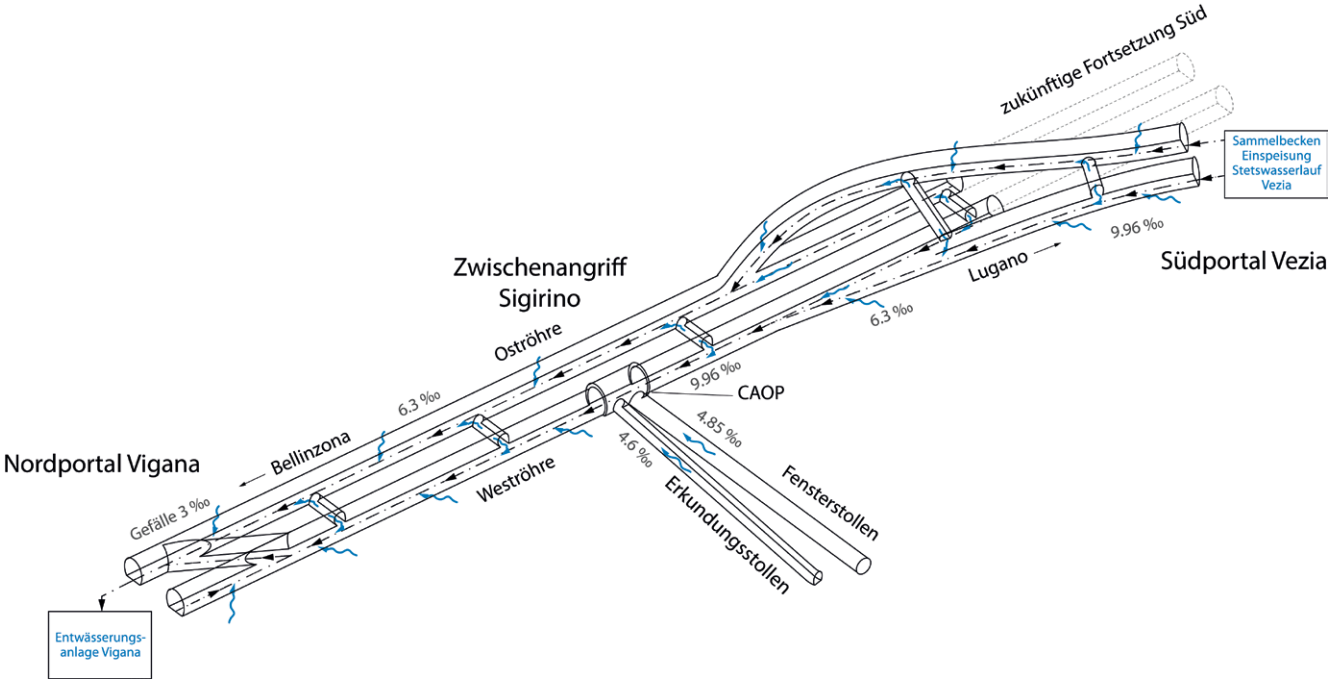


Fig. 5-12: Schematische Darstellung der gesamten Bergwasserableitung im CBT während des Betriebs.

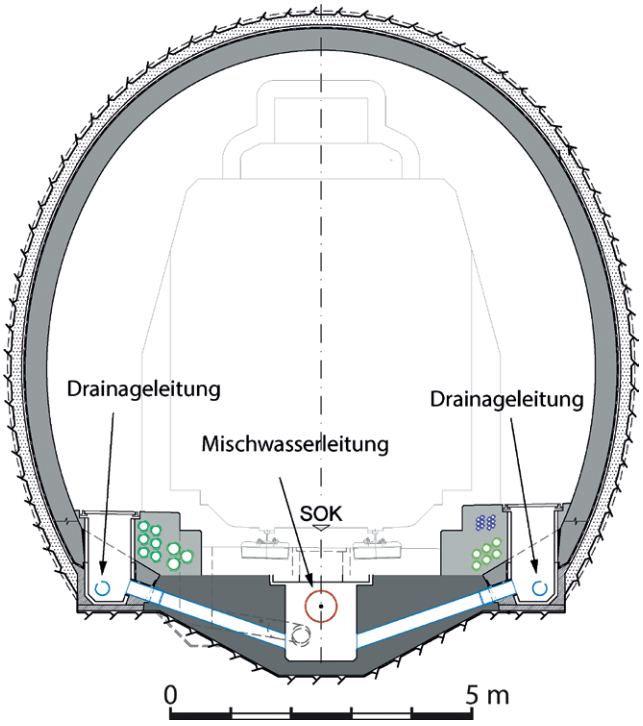


Fig. 5-13: Entwässerungssystem des CBT, dargestellt im Normalprofil SPV 1-4 beim Vortrieb Baulos Sigirino mit Inspektionsschächten der Mischwasser- und Drainageleitungen.

5.3.2 Drainagemassnahmen in der offenen Tagbaustelle Vezia

Die einzige relevante hydrogeologische Struktur der Tagbaustrecke Vezia befindet sich in der Lockergesteinsschicht und enthält durchlässige Sande in Wechsellagerung mit siltigen Schichten eines ehemaligen Flussdeltas, welche besonders bei Niederschlag Wasser führen (Fig. 5-14). Aus dem geologischen Modell des Lockergesteins (vgl. auch Kap. 3.2.1) kann gefolgert werden, dass das Hangwasser entlang der Schichtgrenzen des Flussdeltas mit 10° Einfallen in Richtung SSW fliesst und in den Erkundungsschlitzen und Entwässerungsgräben der Tagbaustrecke mündet.

Das Festgestein erwies sich während des Abteufens der Tagbaustrecke als undurchlässig. Um eine Mobilisierung der siltigen Sedimente während des Abteufens des Portaleinschnitts zu vermeiden, wurde ein auf weniger durchlässigen Sedimenten aufliegender Entwässerungsgraben gebildet, der das zirkulierende Hangwasser abfängt und in Richtung Süden in die Casaccia ableitet. Im November 2008 betrug die Schüttungsmenge aus der Entwässerung zu Beginn 1–2 l/s und sank im Verlaufe der Bauarbeiten, abhängig von der Niederschlagsmenge, auf einen Wert von 0,1–1 l/s.

Der Entwässerungsgraben besteht aus Y-förmigen Schlitzen mit einem Querschnitt von 1,5 m² (Fig. 9-23), die sich bis zur Felsoberfläche erstrecken. Gegeben durch die

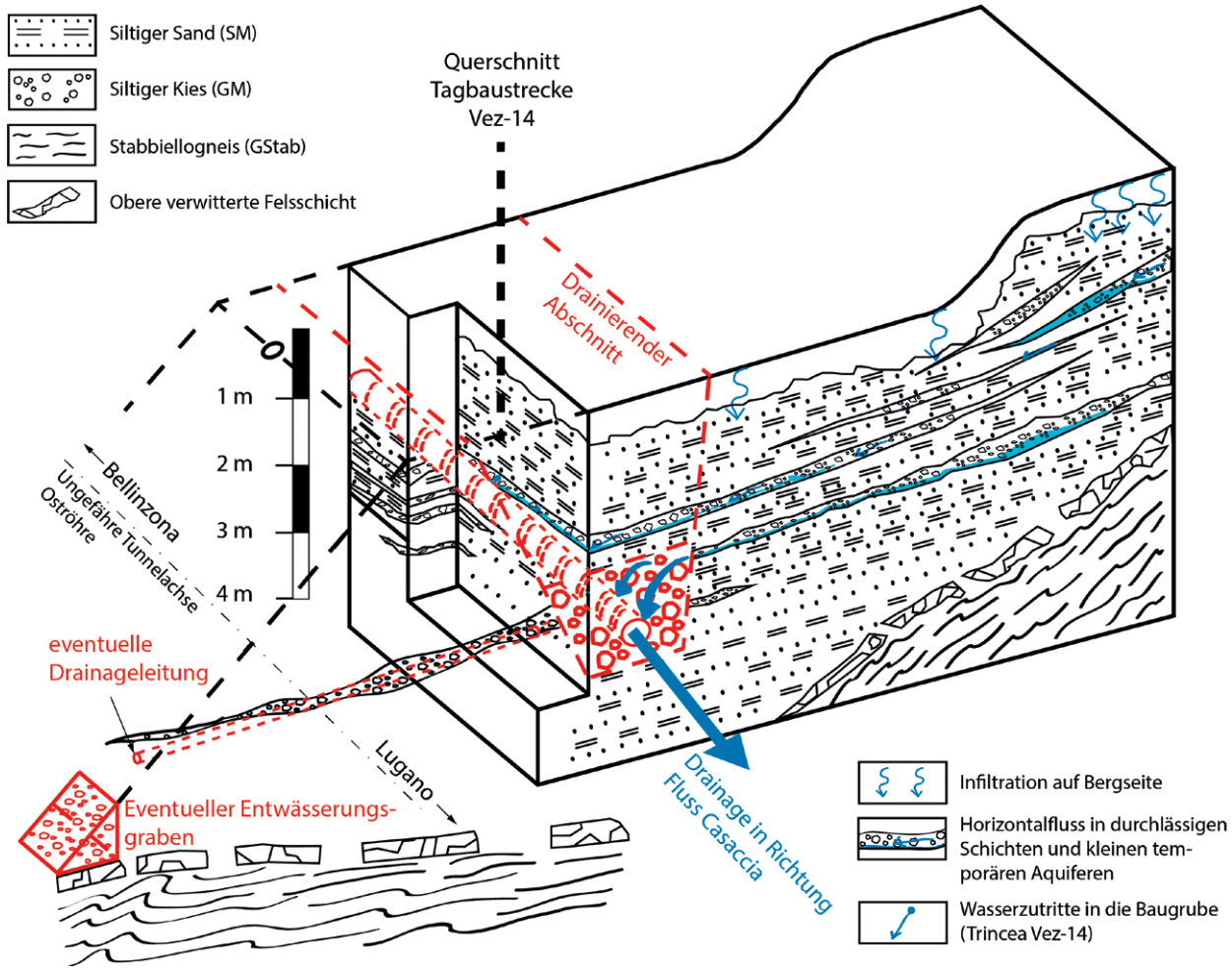


Fig. 5-14: Das hydrogeologische Modell der Tagbaustrecke Vezia erläutert das Drainagekonzept des Hangwassers.

geringe Neigung der Felsoberfläche, die nach SW einfällt, war es möglich, die erforderliche Böschungsneigung im südlichen Abschnitt der Tagbaustrecke beizubehalten. Die günstigen undurchlässigen siltigen Schichten an der Basis des Lockergesteins und die dünne Verwitterungszone der Felsoberfläche erleichterten den Bau des Entwässerungssystems. Zudem kamen die tonigen Gletscherablagerungen im südlichen Abschnitt der gewählten Lösung zusätzlich entgegen.

Der grosse Entwässerungsgrabenquerschnitt und die steile Böschungsneigung garantieren eine effiziente Entwässerung der Tagbaustrecke.

5.3.3 Härtestabilisierung von Bergwasser im Sickerkies

Im Auflageprojekt war für den CBT eine Entwässerung mit Trennsystem und Gewölbedrainage geplant, damit Bergwasser und Schmutzwasser in separaten Leitungen abgeführt werden. Die Aufgabe der Gewölbedrainage besteht einerseits darin, Bergwasser, welches sich hinter der Abdichtung ansammelt, abzuleiten, und anderseits reduziert sie in der Drainageschicht den Gebirgswasserdruck hinter der Abdichtung und verhindert somit, dass das Tunnelgewölbe durch hohe Wasserdrücke belastet wird.

Die Qualitätsvorschriften an das Entwässerungssystem des CBT sind so ausgelegt, dass eine Nutzungsdauer der Drainageleitung und Mischwasserleitung von mindestens 50 Jahren gewährleistet ist, bevor erste Instandsetzungsarbeiten durchzuführen sind.

Im Rahmen der Bearbeitung des Bauprojektes und anhand des hydrogeologischen Modells, welches in den beiden Einspurtunnel wegen der niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerte Bergwasserschüttungsmengen von 3 l/s/km prognostizierte (vorsichtige Prognose), wurde das Entwässerungssystem optimiert, indem im Sinne einer Kostenersparnis das Entwässerungssystem ausser in den beiden Portalabschnitten auf ein Mischwasser-Trennsystem umgestaltet wurde (Fig. 5-13).

Das Entwässerungssystem ist bezüglich Betriebsphase und Bauwerkserhaltung eines der bedeutendsten Bauelemente im Tunnel, insbesondere, weil es im Bereich der Bergwasserzutritte wegen Versinterung zu Bauschäden kommen kann, die häufig beachtliche Sanierungs- und Unterhaltskosten verursachen (Girmscheid et al. 2003). Die Versinterung betrifft die Gewölbedrainage und die Mischwasserleitung. Durch die Änderung des CO_2-Partialdrucks im Bergwasser entweicht am Übergang Fels/Gewölbedrainage gelöstes CO_2 in die Atmosphäre und verschiebt dabei das Kohlensäure/Kalk-Gleichgewicht im Bergwasser, so dass ein Teil des Kalzits ($CaCO_3$) in Form von Sinter und harten Ablagerungen ausfällt (Gamisch & Girmscheid 2007). Das gelöste CO_2 im Bergwasser hängt von den Wasserparametern (Temperatur, pH) sowie der Mineralisierung ab. Bergwasser kann beim Zirkulieren durch die äussere Schale des Tunnels ebenfalls leicht lösliches Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) aus dem portlandzementhaltigen Spritzbeton aufnehmen (Gautschi et al. 1996) was wiederum zur Ausfällung von Kalzit führt. Zusätzlich enthalten Mischwasserleitungen

Fig. 5-15: Eingebaute Depotsteine zwischen der Gewölbedrainage- und Verteilungsleitung zur temporären Härtestabilisierung von Bergwasser im Sickerkies (Fotos IG ITC).

ein zusätzliches Potenzial der Versinterung durch die Mischung von Schmutzwasser und Bergwasser, weil sich das Kohlesäure-Kalzit-Gleichgewicht durch die pH-Veränderung nochmals verschiebt.

Die Erfahrungen aus der Versuchsstrecke des GBT im Teilabschnitt Bodio zeigen technische Lösungen, mit denen sich eine Versinterung in der Gewölbedrainage kontrolliert vermindern lässt. Die Methode nach Wegmüller (2001) sieht vor, dem Bergwasser, welches in der Gewölbedrainage unmittelbar aus dem Felsen in die Atmosphäre fliesst, Härtestabilisatoren beizumischen, so dass die Kalklöslichkeit künstlich verändert wird, damit der Kalk erst dort ausfällt, wo er mit geringerem Aufwand durch Leitungsspülungen entfernt werden kann.

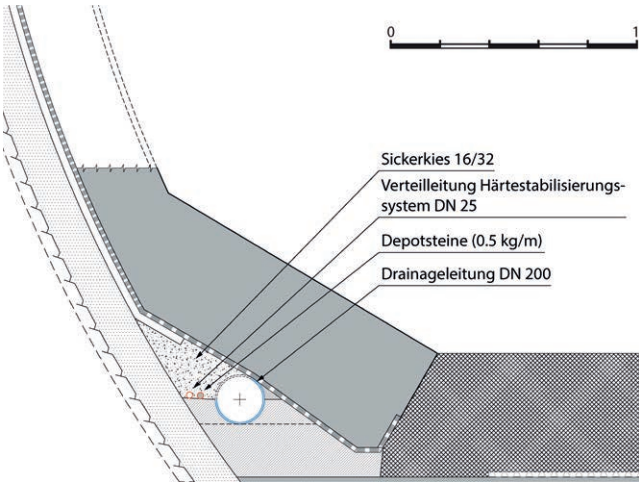


Fig. 5-16: Detaillierte Ansicht der Gewölbedrainage mit eingebauten Depotsteinen zwischen der Gewölbedrainage und der Verteilungsleitung für die Härtestabilisierung.

Die Beimischung von Polyasparginsäuren geschieht entweder in flüssiger oder fester Form. Als temporäre Härtestabilisierung in fester Form während der Bauausführung des Tunnels eignen sich Depotsteine, abgelegt an der Basis des Sickerkieses (Fig. 5-15, 5-16). Diese werden mit der Zeit aufgelöst und sind nicht mehr ersetzbar. Als technische Lösung

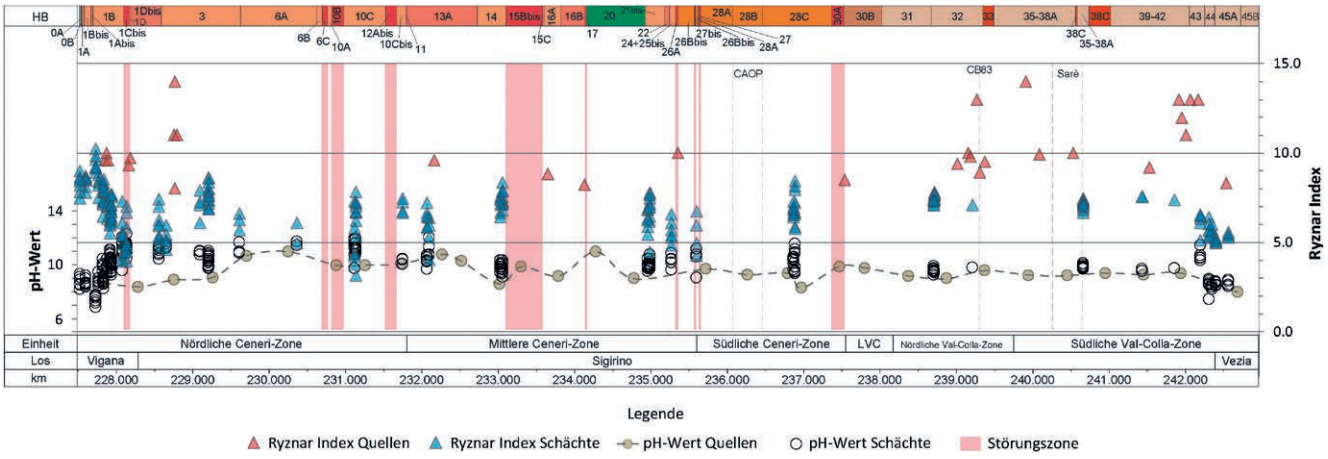


Fig. 5-17: Gegenüberstellung Ryznar-Stabilitätsindex und pH-Wert vor (Probenentnahme von Quellen beim Vortrieb) und nach dem Innenausbau (Probeentnahme im Schacht).

während des Betriebs des Tunnels ist der Einbau eines Dosiersystems, welches automatisch flüssige Polyasparginsäuren in das Drainagesystem einspeist, vorgesehen. So sind in den wasserführenden Abschnitten des CBT während des Rohbaus Verteilungsleitungen in die Gewölbedrainage verlegt worden (Fig. 5-15, 5-16). Mit systematischen Wassermessungen anhand von Probenentnahmen in den Schächten und gleichzeitiger Begutachtung der Versinterung wurde ab Ende Vortrieb 2016 geprüft, ob und an welchen Standorten ein Härtestabilisierungssystem notwendig wäre. Der Einbau eines Härtestabilisierungssystems hängt von der Versinterungsraten sowie dem Kosten/Nutzen-Verhältnis ab, das sich aus dem künftigen Reinigungsaufwand des Entwässerungssystems, sowie den Einbau- und Unterhaltskosten des Härtestabilisierungsdosiersystems ergibt. Figur 5-17 zeigt die Parameter pH und den Ryznar-Stabilitätsindex für Wasserproben beim Vortrieb und ab Vortriebsende. Der Vergleich zeigt eine systematische Abhängigkeit bei Wasserproben aus den Schächten mit einer leichten pH-Erhöhung um 0,6 und eine Verschiebung des Ryznar-Stabilitätsindexes im Mittelwert um 3,3 nach unten. Es wird angenommen, dass diese Zunahme auf den Ionentausch von Ca aus dem Spritzbeton der Aussenschale stammt. Der Effekt der Depotsteine auf das Kalziumgleichgewicht im Bergwasser lässt sich mit Hilfe von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC), welcher als Markierstoff in den Depotsteinen enthalten ist, in den Wasserprobeanalysen nachweisen.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass keine Gefährdung durch Versinterung des Entwässerungssystems besteht und somit auf ein Härtestabilisierungsdosiersystem verzichtet werden kann. Das Entwässerungssystem wird im Rahmen der regulären Wartungsarbeiten gereinigt.

5.4 Auswirkungen auf Dritte

5.4.1 Genutzte Oberflächenquellen

In den Jahren 1993–1997 wurden sämtliche im möglichen Einflussbereich der Vortriebsarbeiten liegenden Oberflächenquellen (ca. 73 km²) in einem Quellenkataster erfasst. Dabei wurden die mehr als 1000 erfassten Quellen klassifiziert und hinsichtlich möglicher Beeinträchtigung durch die Bergwasserdrainage im Tunnel hydrogeologisch beurteilt. Basierend auf den Auswertungen wurde ein entsprechendes Überwachungsprogramm erstellt, das sowohl während der weiteren Projektphasen, des Baus und nach Bauende des CBT von einem durch die Eidgenössischen Schätzungskommission beauftragten, neutralen Sachverständigen ausgeführt wurde.

Basierend auf den Grunddaten des Quellenkatasters konnte bereits vor Beginn des Überwachungsprogramms folgendes festgehalten werden:

- Im Projektgebiet liegen keine Oberflächenquellen vor, bei denen eine Herkunft aus Tiefenwässern hydrochemisch nachgewiesen werden konnte.
- Fast die Gesamtheit der im Projektgebiet untersuchten Oberflächenquellen liegen im Bereich der Ca-SO_4-HCO_3-haltigen Wässer.
- Die physikalisch-chemischen Parameter der im Projektgebiet untersuchten Oberflächenquellen sind grösstenteils mit denjenigen aus Oberflächengewässern vergleichbar.

Allerdings war in der Prognose eine mögliche Beeinträchtigung der Oberflächenquellen und Oberflächenwässer entlang von Tunnelstrecken mit folgenden Gebirgseigenschaften nicht auszuschliessen:

- Mehrheitlich aufgelockertes und stark durchtrenntes Gebirge bei Gebirgsüberlagerung von weniger als 150–200 m, d.h. beide Portalbereiche und die Südstrecke Origlio–Cureglia–Vezia.
- Störungszonenbereiche, welche über eine potenzielle hydraulische Verbindung zwischen Tunnelniveau und Geländeoberfläche verfügen könnten, was für das Isone-Störungszonensystem nicht ausgeschlossen werden konnte.

Obschon im Nordportalbereich Vigana der Bergwasserspiegel aufgrund der Drainagewirkung des Tunnels stark sank, konnte keine Beeinträchtigung der beobachteten Quellen nachweisen werden. Im gesamten Einflussbereich des Basistunnels wurden keinerlei Quellenbeeinträchtigungen festgestellt oder gemeldet.

5.4.2 Geothermiebohrungen

In Hinsicht auf eine mögliche Beeinflussung bestehender Erdwärmesonden wurde auf Stufe Ausführungsprojekt ein Kataster der Geothermiebohrungen erstellt (2010). Im Portalbereich Nord bestanden keine potenziellen Beeinträchtigungen, während im Portalbereich Süd und auf der Strecke Cureglia–Vezia einige Anlagen in der Umgebung bei Cureglia mit möglicher Beeinträchtigung vorhanden sind (Kap. 10.3.12).

Während und nach dem Vortrieb wurden keinerlei Beeinträchtigungen an bestehenden geothermischen Anlagen gemeldet.

5.5 Zusammenfassender hydrogeologischer Befund und Vergleich mit der Prognose

Nachfolgend wird der hydrogeologische Befund abschnittsweise der Prognose gegenübergestellt und durch eine Schlussfolgerung ergänzt.

5.5.1 Allgemeine Betrachtungen

Der hydrogeologische Befund der Wasserführung in beiden Einspurtunnel und im FIS, dargestellt in Kapitel 4.2, dokumentiert Wasserzutritte von insgesamt 536 Quellen und 437 Tropfstellen in Abschnitten von 10 m. Der Vergleich zu den Prognosewerten fasst sich wie folgt zusammen:

- 59% der Wasserzuflüsse haben Initialschüttungen von ≤ 0,1 l/s.
- Die höchsten gemessenen initialen Schüttungsmengen bei Quelleneintritten erreichten beim Vortrieb des Nordportals Vigana 20,5 l/s.
- Die summierte initiale Schüttungsmenge beträgt ca. 384 l/s, davon stammen 86% aus dem nördlichen Portalbereich Vigana.
- Ausserhalb des Nordportals brachten die Quellen nur geringe initiale Schüttungsmengen, die in vielen Fällen innerhalb weniger Tage rasch abnahmen oder versiegten.

5.5.2 Nordportal Vigana

Beim Vortrieb der Weströhre traten erste Quellen bereits in der Bretella Lugano–Bellinzona (km 327.600) auf. Die Quellenaustritte verlagerten sich bei zunehmendem Vortrieb in die Oströhre, so dass die wichtigsten Quellenzutritte der Oströhre in einem Abschnitt von 200 m bei km 227.700–227.900 zu verzeichnen waren.

Die Prognosewerte für stationäre Bergwasserzutritte lagen im Bereich von 7,4 l/s (geschätzter Erwartungswert) bis 10,5 l/s (vorsichtiger Erwartungswert).

Für die gesamte Entwässerung im Portalbereich, die nach Vortriebsende ein stationäres Regime zeigt, sind zukünftig höchstens jährliche Durchschnittswerte (Stand Februar 2017) von 15 bis 28 l/s zu erwarten. Die Schätzung basiert auf den Durchflussmessungen in der Wasseraufbereitungsanlage in Vigana, welche während der Bauphase betrieben wurde. Die Unterschätzung in der Prognose gegenüber dem Befund entspricht etwa einem Faktor von 2 gegenüber dem vorsichtigen Erwartungswert.

In der Prognose wurde mit vorübergehenden Bergwassermengen von 5-10 l/s im Homogenbereich 1A und entsprechend 10 l/s in der Störungszone SZ 1C.1 gerechnet. Diese Wasserzuflüsse waren deutlich höher, bis zu 20 l/s im Bereich Bretella Lugano-Bellinzona und betrafen den Homogenbereichen 1B-bis, 1A-bis, 1B und 1C-bis. Die vorübergehenden Schüttungsmengen fielen in der SZ 1C-bis.1 mit 5 l/s niedriger aus als erwartet, hingegen in der Störungszone des Homogenbereichs 1B erreichten die vorübergehenden Schüttungsmengen 12 l/s. Die Dauer der vorübergehenden Schüttungsmengen lag in der Grössenordnung von wenigen Tagen (2–7 Tage) bis zu mehreren Wochen (6–8 Wochen).

In Anbetracht der chemisch-physikalischen Bergwasserparameter ergeben sich zusammenfassend folgende Aussagen:

- Der mittlere pH-Wert von 7,9 ± 0,8 steigt in Vortriebsrichtung nach Süden mit zunehmender Felsüberlagerung von pH 7,0 bis 8,5.
- Umgekehrt ist eine Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit von 220–250 auf 130–170 µS/cm zu erkennen. Der Mittelwert beträgt 190 ± 64 µS/cm.
- Für die Sulfate ist eine leicht ansteigende Tendenz in Vortriebsrichtung zu erkennen. Der Mittelwert beträgt im Fels 29 ± 12 mg/l und im Lockergestein 76,8 ± 0,6 mg/l.
- Die Bergwassertemperatur verzeichnet einen Anstieg mit zunehmender Felsüberlagerung von 10–12 °C im Portalbereich bis 16–18 °C an der Baulosgrenze Sigirino. Der mittlere Wert beträgt 14 ± 1,6 °C. Es lassen sich jahreszeitliche Schwankungen in der Nähe des Portals beobachten. Indes stehen die Bergwassertemperaturen in diesem Abschnitt nicht im Gleichgewicht mit den Felstemperaturen, sie passen sich aber mit zunehmender Felsüberlagerung an.

Es handelt sich dabei um wenig mineralisierte und nicht aggressive Bergwasserquellen und entsprechen den chemisch-physikalischen Parametern der Wasserproben aus den Erkundungsbohrungen der Projektphase und den Oberflächenquellen, welche während der Beweissicherung vor Vortriebsbeginn einen pH-Wert zwischen 6,2 und 6,7, eine elektrische Leitfähigkeit von 70–120 µS/cm sowie Wassertemperaturen um die 9,3–10,6 °C ergaben. Das hydrogeologische Modell entspricht einem Hangaquifer mit jahreszeitlichem Einfluss.

5.5.3 Ceneri-Zone bis Val-Colla-Linie, FIS und CPS

Für die Ceneri-Zone zusammen mit der Val-Colla-Linie, was einer Tunnellänge von 10 km entspricht, betrug der geschätzte stationäre Prognosewert für beide Einspurtunnel zusammen 33 l/s und der vorsichtige Erwartungswert bis 61 l/s. Schüttungsmengen in der Grössenordnung von 6,5 l/s/km (vorsichtiger Erwartungswert 9,6 l/s/km) waren insbesondere in der nördlichen Ceneri-Zone zu erwarten. Die Vorhersage für die Schüttungsmengen in der mittleren Ceneri-Zone im «Subparallelismus» entsprach der Grössenordnung von 1 l/s/km (vorsichtiger Erwartungswert 2,6 l/s/km), während sie für die südliche Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie zusammen 1 l/s/km (vorsichtiger Erwartungswert 4 l/s/km) betrug. Dazu kommen noch die Schüttungsmengen des FIS von 1,8 l/s (vorsichtiger Erwartungswert

5,1 l/s/km) und CPS mit 2,0 l/s/km. Die Messungen nach Vortriebsende ab Februar 2017 zeigen im FIS und CPS leichte jahreszeitliche Schwankungen mit Schüttungsmengen im FIS von 0,25–2,75 l/s und CPS 0,5–2,75 l/s.

In der Messperiode 2009–2010 ergaben sich mit manuellen Messungen stationäre Schüttungsmengen im FIS zwischen 2,5–3,7 l/s. Ab 2012 erfolgte der Einbau eines kontinuierlichen Messsystems mit Ultraschallsensor im letzten Schacht am Fusse des FIS (Tm 2300) zur Überwachung der jahreszeitlichen Schwankungen. Aus den Ganglinien liessen sich im Zeitraum 2012–2017 mittlere Schüttungsmengen von weniger als 3 l/s ermitteln.

Der markante Unterschied zwischen Prognose und Befund deutet darauf hin, dass die erwartenden Prognosewerte für die Schüttungsmengen überschätzt wurden. Die Rückanalyse zeigt, dass die aus den Erkundungsbohrungen abgeleiteten Durchlässigkeitsbeiwerte zur Abschätzung der Schüttungsmengen im Tunnel lediglich zu einem geringen Masse repräsentativ waren. Eine plausible Erklärung in dieser Hinsicht liegt darin, dass aus den hydraulischen Bohrlochversuchen eine anisotrope Permeabilität nicht erkannt werden konnte und dass dadurch nur eine horizontale anstatt auch einer geringeren vertikalen Permeabilität erfasst wurde.

Die physikalisch-chemischen Bergwasserparameter und die charakteristische Abnahme der Schüttungsmengen deuten auf alte Grundwasservorkommen hin, welche, mit Ausnahme des Portalbereichs FIS, keine direkten Verbindungen zu oberflächennahen Grundwassersystem haben. Die geringfügige Variabilität der analysierten hydrochemischen Parameter ist ein weiterer Hinweis für Aquifere mit begrenzter Konnektivität.

5.5.4 Val-Colla-Zone und Südportal Vezia

Die stationäre Schüttungsmenge aller Bergwasserzutritte berechnete sich für den Stabbiello-Gneis in der Val-Colla-Zone (HB 31–45b) auf einer Tunnellänge von 4,8 km für beide Einspurtunnel auf einen Erwartungswert von 12,6 l/s und einem vorsichtigen Erwartungswert von 19,2 l/s.

Insbesondere in der nördlichen Val-Colla-Zone lag der prognostizierte Erwartungswert relativ tief bei 2 l/s/km (vorsichtiger Erwartungswert 5,5 l/s/km), während dieser sich für die südliche Val-Colla-Zone in den Homogenbereichen 34 und 35-38A mit 6 l/s/km (vorsichtiger Erwartungswert 7 l/s/km) etwas höher lag. Bei der Unterquerung des Val Ponteggia im Homogenbereich 43 wiesen die Prognosen auf einen zu erwartenden Wert von 3 l/s/km bzw. 5,7 l/s/km für den vorsichtigen Erfahrungswert hin.

Die stationäre Schüttungsmenge über ein Jahr hinweg gemessen ergab im Befund (Stand im Februar 2017) zusammengezählt für beide Tunnelröhren 0,5–1,3 l/s.

Ähnlich wie in der Ceneri-Zone liegt der Befund der Bergwassermengen deutlich unter der Prognose und ist vermutlich ebenfalls auf die Anisotropie der Permeabilität des Gebirges und der dadurch resultierten Überschätzung der vertikalen Durchlässigkeitsbeiwerte aus den Erkundungen in der Prognose zurückzuführen. Der niedrige vertikale Durchlässigkeitsbeiwert ermöglicht bei langsamem und langem Fliessen den Ionenaustausch zwischen infiltriertem Wasser und dem Gestein. Das hydrogeologische Modell deutet auf einen Aquifer mit tiefem und isoliertem Grundwasser hin.

6. Radioaktivität und Asbest

6.1 Radioaktivität

Natürliche Radioaktivität wird durch das Vorhandensein von Mineralen erzeugt, die radioaktive Elemente wie Uran ($^{234}U - ^{238}U$), Torium (^{232}Th), Strontium (Sr), Rubidium (Rb), Blei ($^{204}Pb - ^{208}Pb$) und radioaktive Gase wie Radon (Rn) enthalten.

Am ehesten enthalten die quarz und feldspathaltigen Gesteine magmatischer Abstammung (Orthogneis, Augengneis usw.) Minerale mit radioaktiven Elementen. Es sind vorwiegend eisenhaltige Minerale wie Pyrrhotin, Pyrit, seltener Chalkopyrit. In den Gesteinen des CBT wurden in den Erkundungsbohrungen sowie beim Vortrieb keine Minerale mit radioaktiven Elementen in signifikanten Mengen identifiziert, und folglich war die messbare natürliche Radioaktivität sehr niedrig. In den geophysikalischen Messungen in den Erkundungsbohrungen wurden keine Werte über 250 Bq gemessen. Die Messungen beim Vortrieb des FIS ergaben Werte von weniger als 0,4 μSv/h.

6.1.1 Radon

Vorkommen von Radon (^{222}Rn) war beim Vortrieb des CBT nicht vollständig auszuschliessen, denn das Edelgas, das durch den Zerfall von Radium entsteht, das wiederum ein Zerfallsprodukt von Uran ist, tritt fast überall in der Kruste der Erde in verschiedenen Konzentrationen auf. Radon erreicht die Umgebungsluft des Tunnels, indem es aus neu geschaffenen Hohlräumen, aus dem Ausbruchmaterial, aus Störungen oder Scherzonen entweicht. Gewöhnlich ist es im Bergwasser gelöst und entweicht während des Wasserzutritts in den Tunnel. Es ist unsichtbar, geruchlos, ungiftig, inert, weder brennbar noch explosiv. Doch Radon zersetzt sich mit einer Halbwertszeit von etwa vier Tagen in radioaktive und gesundheitsschädliche Produkte wie Bleiisotope, Wismut und Polonium. Das Messkonzept beim Vortrieb des CBT bestand darin, die Sicherheit der Arbeiter während der Bauausführung zu gewährleisten.

6.1.2 Messkonzept

Auf Empfehlung des zuständigen Experten der Subunternehmung (ECONS SA, Bioggio) wurde vereinbart, die im Projekt vorgesehenen Messkampagnen durch eine permanente Messung mit geeigneten Apparaturen (Fig. 6-1) an insgesamt zwei Standorten im Untertage bei Sigirino zu ersetzen. Die Überwachung fand zwischen dem 01.09.2011 und dem 08.02.2016 statt und umfasste die Anforderungen an die geltenden Gesetze und Verordnungen. Gemäss Konzept überwachte eine Messstation, die im FIS auf Höhe des Kämpferbereichs montiert wurde, die Abluft der gesamten Untertagebaustelle, während die andere mobile Messstation auf einer der Hängebühnen (Installation des Sprengvortriebs) in einem Abstand von hundert Metern von der Ortsbrust die Luft überwachte. Das zweite Instrument wurde entsprechend dem geologischen Befund gemäss lithologischen Kriterien in den verschiedenen Vortrieben versetzt. Figur 6-1 schematisiert das kontinuierliche Messkonzept im CBT. Die beiden Messstationen wurden nach Vortriebsende am 08.02.2016 entfernt.

6.1.3 Messergebnisse und Interpretation

Die Messstationen, welche über das Mobilfunknetz verbunden waren, überwachten den Radongehalt rund um die Uhr, dessen Wert von 100 Bq/m³ nie überschritten wurde, was nach der Strahlenschutzverordnung vom 22.06. 1994 nur einem Bruchteil des Grenzwertes von monatlich 3000 Bq/m³ entspricht.

Die Langzeitmessgenauigkeit der verwendeten Instrumente lag bei 1000 Bq/m³ unterhalb von 8 % mit einer Nachweisgrenze von 18 Bq/m³ über 24 Stunden.

Die durchgehenden Messungen, auch während der Betriebsferien, während derer die Tunnellüftung stark reduziert oder abgeschaltet war, bestätigten, dass im CBT keine signifikante Radonkonzentrationen vorkamen.

6.1.4 Massnahmenplan

Hinsichtlich der niedrigen Radonkonzentration im CBT wurde kein spezieller Interventionsplan erstellt. Die Sofortmassnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit der Belegschaft im Falle eines erhöhten Messergebnisses bestanden darin, die Frischluftzufuhr zu erhöhen, das Messkonzept anzupassen und bei Antreffen von Bergwasserquellen zusätzlich Laboranalysen und Messungen durchzuführen.

6.2 Asbestrisiko in der Ceneri- und Val-Colla-Zone

Der Begriff Asbest umfasst eine Reihe von Silikatmineralen, die einen faserförmigen Habitus besitzen oder die aus inhalierbaren Kristallen gebildet sind, dessen einzelne Fasern meist in Bündeln strukturiert sind und einen Durchmesser in der Grössenordnung von weniger als 20 μm besitzen. Asbestfasern, die sich über die Atemwege in die Lunge einfangen, können als Spätfolge Krankheiten wie Asbestose, Mesotheliom und Lungenkrebs verursachen. Die Asbest-

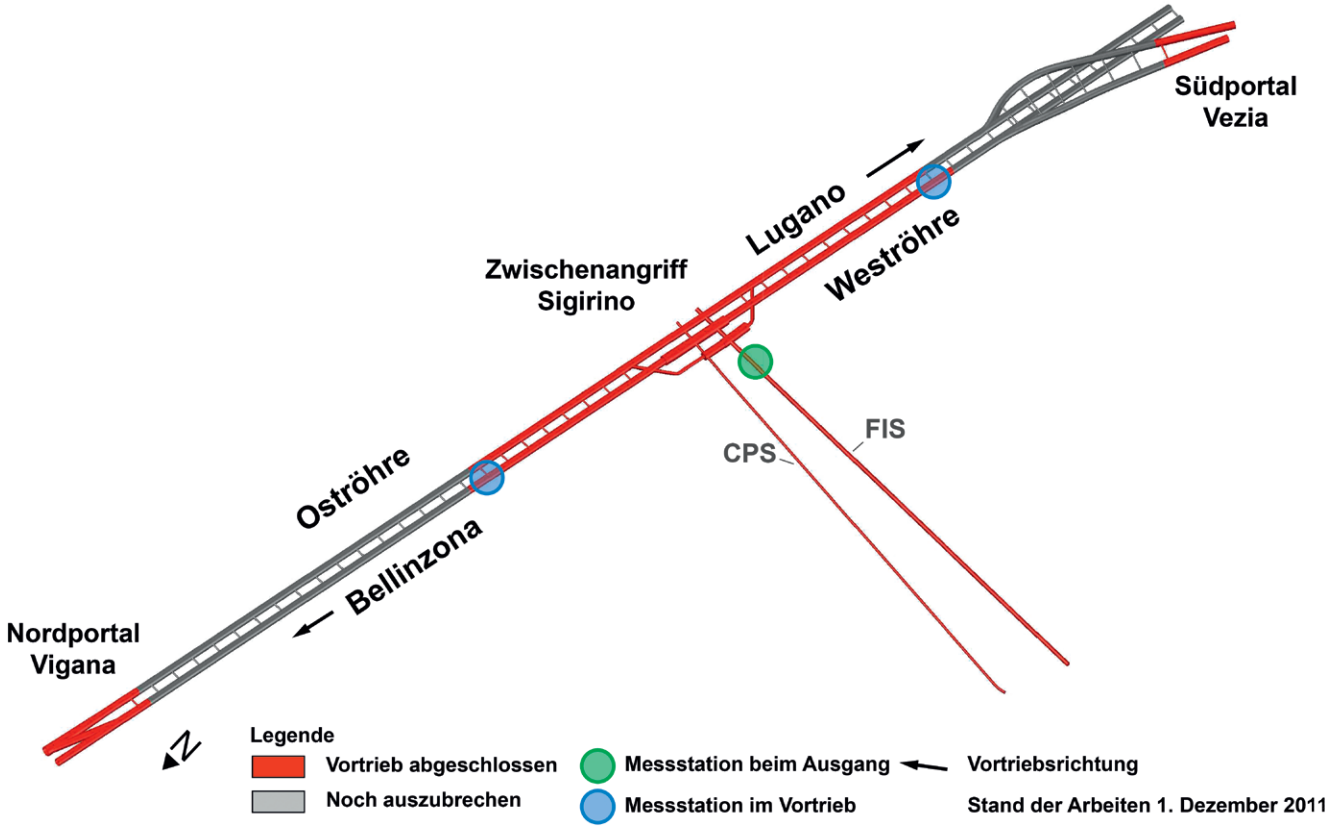


Fig. 6-1: Übersicht der Standorte mit den Messstellen für die Radonüberwachung.

belastung am Arbeitsplatz erreicht eine gesundheitsschädigende Wirkung, wenn die Faserlänge mehr als 5 µm beträgt, ihr Durchmesser weniger als 3 µm misst und das Verhältnis von Länge zu Durchmesser einen Wert 3:1 übersteigt (Referenz SUVA).

Diese Eigenschaften sind häufig in Inosilikaten der Amphibolserie mit Krokydolith, Amosit, Tremolit, Aktinolith und Anthophyllit aber auch in Schichtsilikaten der Serpentinserie mit Chrysotil zu finden.

Asbestvorkommen im CBT wurden in den basischen und ultrabasischen Gesteinen vermutet, die gemäss Prognose hauptsächlich in der Ceneri-Zone und seltener in der Val-Colla-Zone auftreten. Aufgrund des geologischen Modells und der Erfahrungen beim Vortrieb des CPS und FIS war die Durchörterung von ultrabasischen Gesteinen in CBT auszuschliessen, weshalb im Ausführungsprojekt die Gefährdung durch Asbestvorkommen im Vortrieb nur als Restrisiko betrachtet wurde.

Das Auffinden eines serpentinitähnlichen Gesteins (Fig. 6-2) in der Weströhre bei km 334.170 am 29.02.2012 war Anstoss für eine Neubeurteilung des Asbestrisikos im Vortrieb. Obschon die Analysen zweier Gesteinsproben mittels Röntgendiffraktometrie im Hinblick auf Asbestvorkommen negativ ausfielen, erarbeitete die öBL ein Konzept mit ei-

Fig. 6-2: a) Serpentinitähnliches Gestein aus dem Nordvortrieb des Hauptloses in der Weströhre bei km 334.167. b) Amphibolit führender Gneis, durchtrennt von einer kataklastischen Störungszone, in der das serpentinitähnliche Gestein gefunden wurde, km 334.163 (Fotos IG ITC).

nem Massnahmenplan, gestützt auf die Erfahrungen beim Vortrieb im Lötschberg- und Gotthard-Basistunnel, das den Richtlinien der eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit (EKAS, Nr. 6503), dem Artikel 62 der Bauarbeitenverordnung (BauAV) und den Richtlinien der SUVA (Grenzwerte am Arbeitsplatz, Doc. 1903.D) entspricht.

6.2.1 Überwachungskonzept

Im Überwachungskonzept waren die Abläufe zur Luftmessung sowie der Informationsfluss auf der Baustelle und die daraus resultierenden Massnahmen definiert.

Die korrekte Positionierung der Probenentnahmepumpe zur Asbestfasermessung nach VDI 3492 basierte auf dem jeweils aktuellen Tunnellüftungskonzept des CBT (Fig. 6-3).

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Lüftungskonzeptes waren neben den Standorten für die Probenentnahmen auch die Standorte der Bewässerungsanlagen zur Staubverminderung, die im Falle von Asbestauftreten eine Kontamination von Asbestfasern im rückwärtigen Bereich verhindern sollen.

Die Luftprobenentnahmen im Untertage fanden in jedem Vortrieb und den entsprechenden Sohlbaustellen (75% der Proben), an allen rückwärtigen Baustellen, wie Bankett- und Innenschalenbaustellen, an allen Eingängen der Untertagebaustellen sowie bei der mechanischen Werkstatt oder die Betonproduktionsanlage (20% der Proben) statt. Die restlichen Luftproben über Tage stammten aus dem Zwischenlager des Ausbruchmaterials, Wiederaufbereitungslager für Ausbruchmaterial, Ablagerung des Aushubs, Baustellenwerkstatt, Büros und dem Baustellendorf. Die analytischen Methoden für die Untersuchung von amphibol- und serpentinhaltigen Gesteinen sind in der Tabelle 6-1 zusammengefasst

Die Gesteinsuntersuchungen und die Pulveranalysen wurden von zwei spezialisierten Laboratorien durchgeführt: der Firma GEOPRO SA, im Analyselabor für Gebäudeschadstoffe, Boden-, Luft- und Gesteinsproben in 1852 Roche und dem IST, dem Institut universitaire romand de Santé au Travail in 1011 Lausanne.

6.2.2 Luftprobenanalysen beim Vortrieb

Für die Überwachung von Asbest beim Vortrieb des CBT sind in der Zeitspanne zwischen Februar 2012 und September 2014 insgesamt 115 Luftproben zur Pulveranalyse gesammelt worden.

In den Richtlinien der SUVA ist der maximale Arbeitsplatzkonzentrationswert (MAK) als die höchst zulässige Durchschnittskonzentration gesundheitsgefährdender Stoffe am Arbeitsplatz definiert. Der MAK-Wert für Asbest liegt bei 10000 LAF/m³ (LAF=lungengängige Asbestfasern). Dieser Wert legt fest, wie viele lungengängige Asbestfasern pro m³ Luft über die ganze Arbeitszeit über längere Perioden eingeatmet werden können, ohne die Gesundheit zu gefährden.

Die Richtlinie VDI 3492 beschreibt das Verfahren zur Bestimmung der Faserzahlkonzentration anorganischer Partikel in der Luft sowie die Identifizierung der Fasern (Chrysotil- und Amphibolasbest). In den Richtlinien sind zudem die Grundlagen für Mess-, Planungs- und Probenentnahmeverfahren für anorganische Fasern in der Luft erläutert.

Konkret besteht das Probenentnahmeverfahren nach den VDI-Richtlinien 3492 darin, die Umgebungsluft bei konstanter Luftmenge durch einen Filter während einer bestimmten Zeit zu pumpen. In einem zweiten Schritt werden die auf dem Filter abgeschiedenen Fasern mit Hilfe eines Elektronenmikroskops gezählt, was gleichzeitig eine mineralogische Bestimmung der Faser erlaubt. Diese Stichprobe wird mittels probabilistischer Berechnung auf einen m³ Luft hochgerechnet. Das Ergebnis ist umso verlässlicher, je länger die Probenentnahmezeit ist, weil aus strömungstechnischen Gründen der Durchfluss im Messgerät und die damit entnommene Luftmenge begrenzt bleiben.

In der Literatur sind wenige Erfahrungswerte für Luftprobenentnahmen in der speziellen Umgebung des Tunnelbaus vorhanden, deshalb ist die Vorgehensweise hinsichtlich der Standortwahl und Messdauer der Pumpen im CBT empirisch erarbeitet worden.

Bei den ersten Versuchen wurden die Probenentnahmen während oder unmittelbar nach der Sprengung in der

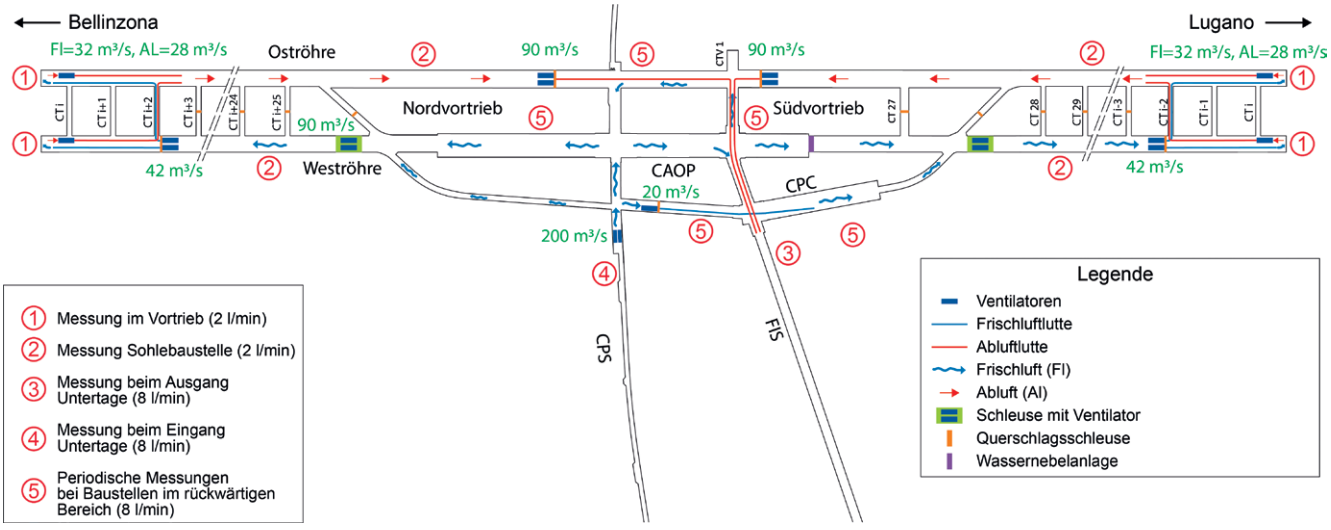


Fig. 6-3: Lüftungskonzept der Baustellen Untertage mit allen Positionen für die Probenentnahme. Die Probenentnahmen richtete sich jeweils nach dem aktuellsten Lüftungskonzept und den Standorten der Baustellen des Innenausbaus.

Tab. 6-1: *Kontrollplan mit entsprechenden analytischen Methoden.*

Gesteinstyp	Anzahl Proben	Dünnschliff-analyse	XRD	Polarisations-mikroskopie für Asbest	REM/EDX/TEM
Amphibolit oder Amphibol führender Gneis oder Schiefer B-UBC	Jeweils 1 Probe pro Gesteinstyp	✓	✓	✓	Nur falls erforderlich gemäss zuvor durchgeführten Ergebnissen
Amphibol führender Gneis und Schiefer B-SBVC	Jeweils 1 Probe pro Gesteinstyp	✓	✓	✓	Nur falls erforderlich gemäss zuvor durchgeführten Ergebnissen
Metagabbro, Amphibol, Pyroxen, Serpentin oder Olivin führender Gneis der UBC	Falls angetroffen – beim Vortrieb nicht erwartetes Gestein (Restrisiko)	Falls angetroffen	Falls angetroffen	Falls angetroffen	Nur falls erforderlich gemäss zuvor durchgeführten Ergebnissen
Adern oder Klüfte mit Chrysotil oder Amphibol	Falls angetroffen – beim Vortrieb nicht erwartetes Gestein (Restrisiko)	Falls angetroffen	Falls angetroffen	Falls angetroffen	Nur falls erforderlich gemäss zuvor durchgeführten Ergebnissen
Basische Gänge	Falls angetroffen jeweils 1 Probe pro Hornblenden- und Aktinolithvarietät	✓	✓	✓	Nur falls erforderlich gemäss zuvor durchgeführten Ergebnissen
Hornblende führender Ceneri-Orthogneis (OGC)	Falls angetroffen jeweils 1 Probe pro Hornblenden- und Aktinolithvarietät	✓	✓	✓	Nur falls erforderlich gemäss zuvor durchgeführten Ergebnissen

Nähe der Ortsbrust oder beim Steinbrecher durchgeführt, um Worst-Case-Bedingungen zu messen. Es zeigte sich rasch, dass diese Messungen wenig repräsentativ waren, da die Staubfilter verstopften, was zu einer Überschätzung der LAF in der Luftprobe führte (Fig. 6-4). Überdies hat das Labor mit den optischen Untersuchungen an den gefilterten Partikeln zahlreiche Hornblenden mit asbestähnlichem Habitus entdeckt, bei denen das Verhältnis zwischen Länge und Durchmesser weniger als 10 µm beträgt. Diese «Pseudo-Asbestfasern» entstanden durch mechanische Einwirkung auf das Gestein mittels Sprengung, Abbauhammer oder im Steinbrecher.

Nach dieser Erkenntnis fanden alle darauffolgenden Messungen beim Vortrieb unter «natürlicheren Bedingungen» statt, indem das Messverfahren ab April 2012 optimiert wurde. Die Probenentnahmen fanden unter realitätsnahen Bedingungen statt, zwischen Ortsbrust und Steinbrecher, an denen sich die Belegschaft auch am häufigsten aufhielt. Die Messdauer einer Probenentnahme dauerte dafür mehrere Stunden. Der Fasergehalt in den Luftproben lag unter dem Wert von 1000 LAF/m³ was gemäss Konzept der Stufe 0 entsprach. Die Graphik in der Figur 6-5 stellt die Ergebnisse der unterschiedlichen Messverfahren dar. Die gemessenen Extremwerte zu Beginn der Asbestüberwachung entsprechen den Probeentnahmen an exponierten Stellen beim Steinbrecher oder unmittelbar hinter der Ortsbrust und repräsentieren die Worst-Case-Bedingung. Die Messungen nach April 2012 entsprechen den realitätsnahen Bedingungen und lagen unterhalb der Grenze von 1000 LAF/m³.

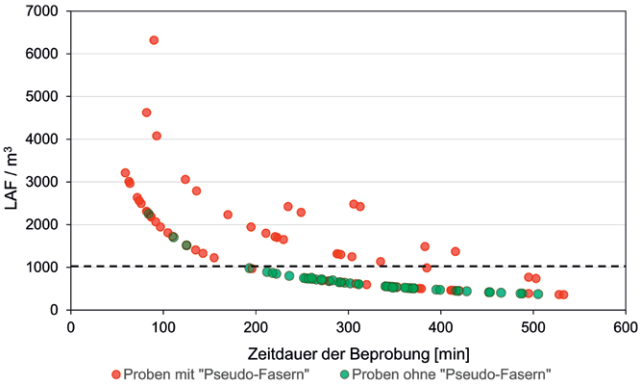


Fig. 6-4: Die probabilistische Auswertung des Fasergehalts nimmt exponentiell mit der Zunahme der Dauer der Probenentnahme ab. Das Vorhandensein von «Pseudo-Asbestfasern» in der Luftprobe, welche nicht zum Asbest gehören, beeinflusst das Ergebnis. Proben mit Pseudo-Fasern erreichten den MAK-Wert von 10000 LAF/m³ nie.

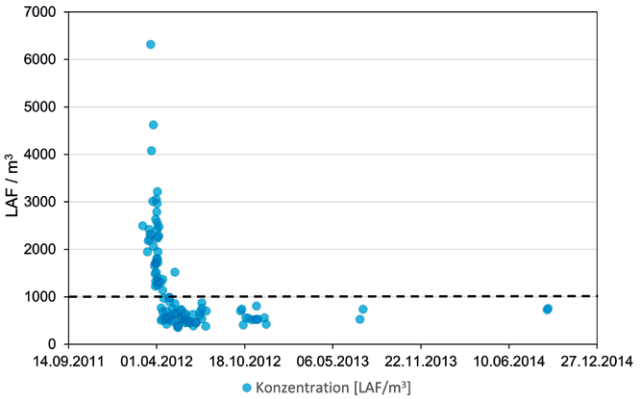


Fig. 6-5: Graphische Darstellung aller Messergebnisse der Luftproben für die beiden Messverfahren.

6.2.3 Untersuchung von asbesthaltigen Mineralen im Gestein

Der Kontrollplan (Tab. 6-1) enthielt verschiedene Untersuchungsmethoden, um das Gestein auf Asbestfasern zu prüfen.

Die petrographische Untersuchung von Handstücken beim Vortrieb geschah hauptsächlich an Hand von Dünnschliffen oder Röntgendiffraktometrie (XRD). Die Polarisationsmikroskopie für Asbest (Surace et al. 2011) kam für die Untersuchung von Partikel in der Luftproben und einigen Handstücken aus dem Vortrieb sowie Gesteinsproben aus Kernbohrungen zum Einsatz.

Asbestuntersuchungen wurden mit Hilfe der Gesteinsproben aus den Kernbohrungen GbC-NO-SPS-01, GbC-NO-SPS-02 und GbC-SE-01 durchgeführt. Die beiden ersten sind im Rahmen des Vorauserkundungskonzeptes im «Subparallelismus» beim Nordvortrieb zustande gekommen. Die dritte Kernbohrung im Süden, durchgeführt im April 2012, bezweckte mittels Erkundungskampagne eine Neueinschätzung der Prognose von Asbestmineralen in Amphiboliten und Amphibol führenden Gneisen (B-SBVC-Formation) der Val-Colla-Zone.

6.2.4 Massnahmenplan

Die Gefahrenstufen werden im Voraus definiert und basieren auf der Prognose von asbesthaltigen Lithologien, während VDI-Luftmessungen die LAF bestimmen. Die auf der Baustelle definierten Gefahrenstufen (Tab. 6-2) befolgen die EKAS Richtlinie Nr. 6503.

Tab. 6-2: *Gefahrenstufen Asbest auf der Baustelle des CBT, festgelegt nach der EKAS Richtlinie Nr. 6503.*

Gefahrenstufe	Beschreibung	LAF/m^3
0	Keine Gefahr	<1000
1	Gefahr nicht ausgeschlossen	1000–10000
2	Potenzielle Gefahr vorhanden	>10000

Dieser Massnahmenplan erfasste eine ausführliche Beschreibung aller Gesteinstypen mit potenziellem Asbest sowie die dazugehörige Beurteilung der Gefahrenstufen. Für jede Gefahrenstufe waren zudem die Massnahmen beschrieben, welche in Abhängigkeit der VDI-Ergebnisse zu treffen waren. Sofortmassnahmen Seitens öBL setzten je nach Gefahrenstufe und Standort auf der Baustelle eine Anpassung der Gefahrenstufe, Durchführen von Kontrolluntersuchungen des Gesteins mittels Dünnschliff- oder XRD-Analyse voraus.

Der Unternehmer war zudem verantwortlich für die gefahrenstufengerechte Ausstattung der Arbeiter mit der nötigen Schutzbekleidung, betrieb Wassernebelanlagen, überwachte die Entstaubungsanlagen und handhabte vorschriftsgemäss die Materialbewirtschaftung von asbesthaltigem Ausbruchmaterial.

6.3 Interpretation der Ergebnisse

Während der Asbestüberwachung wurden diverse Amphibole der Hornblendegruppe und gebietsweise Amphibole der Aktinolith-Tremolit-Mischreihe mit einem breiten Chemismusspektrum zwischen den Komponenten Calcium, Magnesium oder Eisen identifiziert, welche in Form von gesteinsbildenden Mineralen in der Matrix des Gesteins verzahnt waren. Anhand der VDI-Messungen wurde erkannt, dass durch mechanische Einwirkung beim Vortrieb (Sprengung, Abbauhammer und Steinbrecher) Bruchstücke von prismatischen Hornblendemineralen entstehen, deren Habitus eine ähnliche Geometrie aufweisen, wie die lungengängigen Asbestfasern. Diese «Pseudo-Asbestfasern» wurden im Überwachungskonzept für die Festlegung der Gefährdungsstufe den Asbestfasern gleichgestellt.

Die Luftproben, die LAF-Werte von mehr als 1000 LAF/m^3 erreichten, können den angetroffenen Amphibolitkörper und dem Hornblende führenden Ceneri-Orthogneis der mittleren Ceneri-Zone und den Amphibol führenden Gesteinskörpern im Stabbiello-Gneis der Val-Colla-Zone zugeordnet werden (Fig. 6-6).

Das mechanische Zerbrechen von Amphibolmineralen zu asbestähnlichem Habitus sowie deren Auswirkung auf die Gesundheit beim Tunnelvortrieb sind bisher schlecht erforscht. Die Erfahrungen im CBT sind umso mehr von relevanter Bedeutung für das Verständnis und die Wahl der Analysenverfahren und den Massnahmenplan beim Tunnelvortrieb in Amphiboliten oder Amphibol führenden Gesteinen.

Aus den detaillierten Untersuchungen an den detektierten Fasern lässt sich daraus schliessen, dass es sich bei den Amphibolen zwar um die Asbestminerale Aktinolith und Tremolit handelt, diese jedoch in prismatischer Form als «Pseudo-Asbestfasern» und nicht als mineralogisch «echte Asbestfasern» vorlagen.

Diese Beurteilung darf aufgrund der heutigen Erfahrungen bei der Einstufung der Gefährdung nicht in den Vordergrund gestellt werden, denn es besteht keine absolute Gewähr, dass sogenannte lungengängige «Pseudo-Asbestfasern» keine gesundheitsschädlichen Auswirkungen haben. Das wichtige Ergebnis aus der messtechnischen Luftüberwachung im CBT ist, dass die Asbestfasern in der Luft nie die vorgegebenen Grenzwerte überschritten und oft in geringer Konzentration nahe am angestrebten Minimum lagen, so dass jederzeit alle Vorschriften für die Einhaltung der Sicherheit am Arbeitsplatz eingehalten wurden.

Fig.6-6: Gegenüberstellung der VDI-Messungen im gesamten CBT und der angetroffenen Lithologien. Im unteren Teil des Diagramms sind die Lithologien der Oströhre, im oberen die Lithologien der Weströhre abgebildet. Die Dauer der Probenmessungen am Anfang der Überwachung war zu kurz gewählt und gleichzeitiger Probenentnahme an ausserordentlich staubexponierten Standorten führte die probabilistische Berechnungsmethode zu hohen LAF-Werten. Vorkommen von Hornblende führendem Ceneri-Orthogneis verlängerte die Asbestüberwachung mittels VDI-Messung beim Nordvortrieb in Sigirino.

7. Wiederverwertung des Ausbruchmaterials

7.1 Grundlagen und Ausganglage

Die Materialbewirtschaftung in Sigirino lieferte Zuschlagsstoffe für die Herstellung von Beton für den Tunnelvortrieb des CBT ab Beginn 2010. Rund 1,1 Mio. t (55%) der Gesteinskörnung, unterteilt in die vier Komponenten 0/4, 4/8, 8/16 und 16/32 wurden aus dem Ausbruchmaterial des CBT hergestellt. Die restlichen 0,8 Mio. t (45%) stammten aus den Steinbrüchen Gaggino di Faloppio (IT) und der Holcim-Kiesgrube Hüntwangen (CH) und wurden mit der Eisenbahn von aussen zugeführt. Die eigenen produzierten Zuschlagstoffe wurden hauptsächlich zu Beton für das Baulos Sigirino verarbeitet. Für die Betonherstellung des Vorloses Sigirino und des Portalbereichs Vigana wurden nur externe Zuschlagstoffe verwendet. Das Bauwerk im Portalbereich Vezia wurde hingegen ausschliesslich mit Transportbeton direkt ab Betonwerk beliefert.

Alle internen, externen und gemischten Gesteinskörnungen, die im CBT verwendet wurden, wurden kontinuierlich einer Überwachung gemäss den Normen SN 670 119-NA und SN 670 102b-NA unterzogen. Für die Materialauswahl und die Einhaltung deren Grenzwerte wurde ein Prüfsystem verwendet, das auf Thalmann (1996) basiert. Dieses Prüfsystem stützt sich neben den benannten Normen auch auf die Erfahrungen aus den AlpTransit-Projekten des Gotthard- und des Lötschberg-Basistunnels. Ausschlaggebend für die Auswahl der Prüfmethoden war, dass die Qualität bereits im Rohstadium mittels physikalischer Härtetests und petrographischer Analysen bestimmt werden konnte und nicht erst nach aufwendiger Aufbereitung des Ausbruchmaterial aus dem Tunnelvortrieb.

Die Triage des Ausbruchmaterials erfolgte in drei Schritten. Nach einer Erstbeurteilung an der Ortsbrust durch den Geologen und einer entsprechenden vorläufigen Qualitätsanalyse mittels Punktlastversuch auf der Baustelle wurde die Materialqualität durch eine Laboranalyse geprüft.

Tab. 7-1: *Einteilung des Ausbruchmaterials des CBT.*

Materialklassen	Verwendung des Materials	
A-Material	A1	Gesteinskörnung für Beton und Spritzbeton mit mittlerer bis hoher Festigkeit.
	A2	Gesteinskörnung für Beton der Sohle.
B-Material	B1	Material für Verfüllungen oder Pistenbau.
	B2	Zu deponierendes Ausbruchmaterial.

Die Klassifizierung in A-Material erfolgte unter den folgenden Hauptkriterien:

- Glimmergehalt < 20%
- Gehalt an ungeeigneten Mineralen (Erzminerale) oder tonigem, siltigem Anteil aus Störungszonen < 5%
- Gestein mit mittlerer bis hoher Härte

7.2 Verteilung des Ausbruchmaterials

Insgesamt konnten 18% des Ausbruchmaterials aus dem CBT als A-Material verwendet werden. Die restlichen 82% wurden als B-Material klassifiziert. Das B-Material umfasste hauptsächlich schiefrige Lithologien mit höherem Glimmergehalt, wie den Ceneri-Paragneis, Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone, Giumello-Gneis, Gneis und Schiefer der Val-Colla-Linie, Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone oder den Sabbiello-Gneis. Die Wiederverwertbarkeit aller durchörterten Lithologien ist in der Tabelle 7-2 zusammengefasst.

Tab. 7-2: *Wiederverwertbarkeit der Gesteine in den angetroffenen Lithologien.*

Geologische Formation	Gesamt	Verwertbarer Anteil innerhalb der Lithologie
Ceneri-Orthogneis	60,5%	81,7%
Ceneri-Paragneis	23,7%	12,6%
Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone	8,2%	34,6%
Bernardo-Orthogneis	4,0%	30,1%
Hornfels	2,7%	46,9%
Stabbiello-Gneis	0,5%	0,4%
Basische Gänge der Ceneri-Zone	0,4%	53,5%
Giumello-Gneis	–	–
LVC-FM und LVC-GS	–	–
Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone	–	–

Das meiste wiederverwertbare Material stammte aus der Ceneri-Zone, davon sind 60,5% Ceneri-Orthogneis und 23,7% Ceneri-Paragneis. In der Val-Colla-Zone konnten nur wenige Meter Bernardo-Orthogneis als A-Material verwendet werden.

Die folgende Figur zeigt die Verteilung des Ausbruchmaterials nach Unterteilung in A- und B-Material:

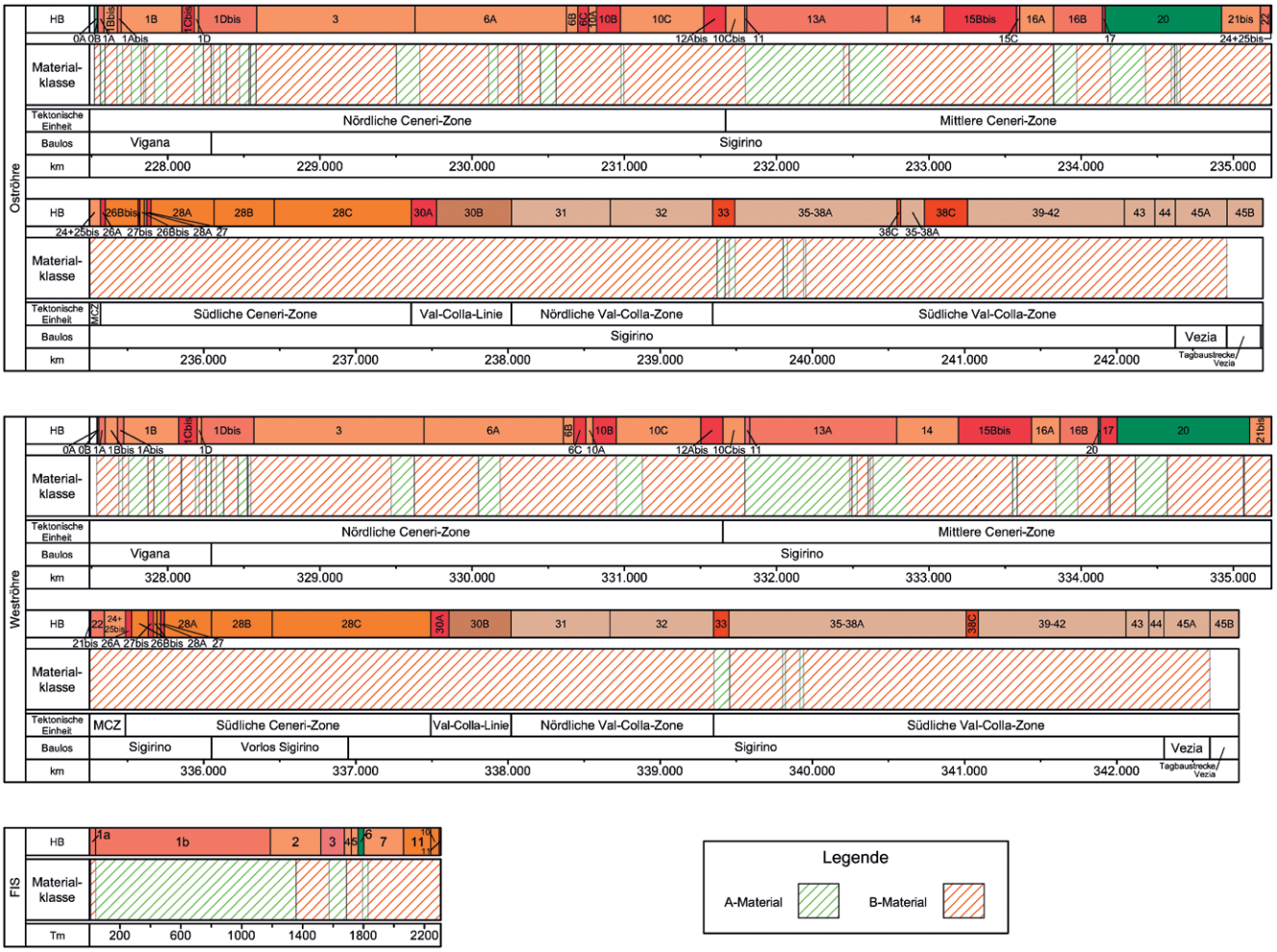


Fig. 7-1: Verteilung des Ausbruchmaterials nach Einteilung in A- und B-Material in den beiden Einspurtunnel des CBT und im FIS.

Im Vergleich zur Prognose konnte in der Ceneri-Zone, mit Ausnahme der südlichen Ceneri-Zone ca. 2–4% mehr Ausbruchmaterial wiederverwendet werden, obwohl die Längen der am besten geeigneten Formationen (OGC) geringer waren. Dies kann auf die etwas längeren Streckenabschnitten mit A-Material im Ceneri-Paragneis zurückgeführt werden. In der südlichen Ceneri-Zone fehlten gegenüber der Prognose 5% A-Material. Es wurden zwar einzelne Horizonte mit geeignetem A-Material im Giumello-Gneis angetroffen, wegen der Heterogenität des Glimmergehalts und nicht durchführbarer Trennung dieser Horizonte wurde das gesamte Ausbruchmaterial als B-Material deponiert. In der Val-Colla-Zone lag die Menge an wiederverwendbarem Material aus dem Bernardo-Orthogneis weit unter den Erwartungen, weil dieser oft zerschert war und dadurch die nötige Zugfestigkeit nicht erreichte.

8. Felstemperaturen

Die geothermische Prognose für den CBT stützte sich auf die Ergebnisse der Temperaturmessungen ausgewählter Kernbohrungen aus den beiden Bohrkampagnen zwischen 1997 und 2003. Mit Hilfe der Felstemperaturmessungen beim CPS-Vortrieb erfolgte die Korrektur und Anpassung des geothermischen Modells (Fig. 5-11).

Die Messfrequenz der Felstemperatur wurde anhand des geothermischen Modells festgelegt, welches zum grössten Teil aufgrund der topographischen Verhältnisse im Bereich des Tunnels (dreidimensional betrachtete Überlagerung) bestimmt wurde. Die Temperaturmessungen im CBT erfolgten alle 500 m mittels Sonde, eingetaucht in ein wassergefülltes, 5 m langes Bohrloch, welches im Hinblick auf die benachbarte Tunnelröhre immer im Parament der gegenüberliegenden Seite lag. Die Messprozedur (Bohrtiefe und Dauer) konnte in der Zeit des CPS Vortriebes empirisch ermittelt werden. Testversuche haben ergeben, dass konstante Messwerte nach 48 Stunden ab dem Eintauchen der Sonde in das Loch erreicht wurden. Als geeigneten Standort suchte der Geologe Fels, der möglichst wenig geklüftet und trocken war. Regelmässige Zweitmessungen bestätigten die Ergebnisse.

Die 31 Felstemperaturmessungen aus beiden Tunnelröhren liegen zwischen 13,8 und 23 °C. Der resultierende mittlere geothermische Gradient beim Vortrieb des CBT beträgt 22,0 °C/km und entspricht einem schweizweit betrachtet eher niedrigem, aber für die Südalpen typischen geothermischen Gradienten. Im Vergleich zur Prognose liegen die Felstemperaturwerte insbesondere in der nördlichen (+3,5 °C) und mittleren Ceneri-Zone (+2,7 °C) leicht über dem Prognosewert. Nahe der Kernbohrungen CB83 und CB84 sowie in der CAOP sind kleinere Anomalien der Felstemperaturen zu beobachten, die auf die Abkühlung des Fels durch Infiltration von Oberflächenwasser aus dem Bohrloch oder durch die Lüftung des ausgebrochenen CPS zurückgeführt werden können (Fig. 5-11).

Es ist anzunehmen, dass der leicht höhere Temperaturwert südlich des Verzweigungsbauwerks Sarè im Zusammenhang mit den «wärmeren» Quellen steht (Kap. 5.2.3).

Der mittlere Fehler der Prognosekurve liegt im Bereich von ±2–3 °C, d.h. zusammenfassend liegt die Felstemperatur innerhalb der Prognosebandbreite

9. Allgemeine geotechnische Verhältnisse bei den Tunnelvortrieben

9.1 Allgemeine geotechnische Verhältnisse bei den Vortrieben im Fels

9.1.1 Generelle Beurteilung im Hinblick auf die Submission

Die prognostizierten geotechnischen Verhältnisse wurden für den intakten Fels auf der Basis von felsmechanischen Kennwerten in den geologischen Formationen GCornub, OGC, B-UBC, OGBern und PGC als günstig eingestuft (Kap. 9.1.1). Die Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus den geologischen Formationen GGium, GStab, GM und PGC und LVC ergaben im Hinblick auf die Tunnelvortriebe eher ungünstige geotechnische Verhältnisse. Wegen des komplexen strukturgeologischen Aufbaus des Monte Ceneri mussten diese Beurteilungen jedoch mit der Gebirgsdurchtrennung in Zusammenhang gebracht werden. Dies erfolgte bereits im Jahr 2000 in der Vorstudie «zwei Einspurtunnel» mit der Definition und Aufteilung des Gebirges in Homogenbereiche (Kap. 2.3 und 2.4).

Die daraus resultierenden Risikozonen waren bis zum Ende der Stufe Bauprojekt mit Kernbohrungen erkundet worden. Die prognostizierten, durchschnittlichen Störungszonenlängen machten summiert insgesamt rund 12% der Tunnelstrecke aus, wobei 4% in der nördlichen bis mittleren Ceneri-Zone, weitere 4% in der LVC Val-Colla-Linie und der Rest in der südlichen Ceneri-Zone und in der Val-Colla-Zone aufgeteilt waren. Es ist zu erwähnen, dass im Streckenabschnitt des «Subparallelismus» (mittlere Ceneri-Zone) allein drei prognostizierte Störungszonen knapp die Hälfte der 4% ausmachten.

Für die Bewältigung der Störungszonen Val d'Isone, Val Mara, «Subparallelismus» und LVC war der Einsatz der schwersten Ausbruchsicherungstypen SPV 7–10 vorgesehen. Ausserhalb dieser Störungszone wurde vorwiegend mit den niedrigen SPV 1–4 bis mittleren Profiltypen SPV 5–6 gerechnet, gegebenenfalls auch SPV 7 (Beschreibung s. Kap. 11.2.1).

9.1.2 Felsmechanische Kennwerte vor dem Bau

Die in der Geologie des Bauprojekts wiedergegebenen Gesteinskennwerte wurden ausschliesslich durch Laborversuche bestimmt, welche an Proben aus den Erkundungsbohrungen sowie aus dem Erkundungsstollen Sigirino (CPS) ausgeführt wurden. Die Streubreiten der gemittelten Gesteinskennwerte der Prognose (Stufe Bauprojekt) sind in der Tabelle 9-1 zusammengestellt. Es wurden folgende Versuche ausgeführt:

- Einaxiale Druckfestigkeitsversuche mit Bestimmung des E-Moduls (E_{50})
- Triaxialversuche mit konstantem Seitendruck von 4 bzw. 8 MPa
- Spaltzugsfestigkeitsversuche
- Punktlastversuche
- Cerchar-Versuche

Die Anzahl der pro geologische Einheit durchgeführten Versuche waren proportional zu den prognostizierten Längen der geologischen Einheiten auf Tunnelebene. Es wur-

Tab. 9-1: *Streubreiten (unteres Quartil – oberes Quartil) der felsmechanischen Gesteinskennwerte der Prognose (Stufe Bauprojekt), gegliedert nach geologischer Formation.*

Geologische Formation	$I_{s(50)}$ //S	$I_{s(50)} \perp S$	Anisotropie-Index	Einaxiale Druckfestigkeit	E-Modul (E_{50})	Spaltzug-festigkeit	Cerchar-Abrasivitäts-index CAI
	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[GPa]	[MPa]	[-]
PGC	1–4	7–11	2–7	35–120	50–70	5,4–5,8	3,2–3,4
GM	1–5	5–13	2–4	25–90	40–70	4,4–11,2	2,5–3,0
OGC	1–5	6–13	2–5	45–130	45–70	8,4–13,0	3,1–4,1
GCornub	2–4	6–9	2–3	80–120	60–100	6,7–7,7	1,7–2,7
B-UBC	4–6	8–13	2–3	45–110	70–120	6,3–12,2	2,6
GGium	1–2	4–7	4–8	10–19	6–30	2,0–6,4	1,8–2,4
LVC-FM	0–1	1–4	3–7	5–14	1–8	1,7–1,8	–
LVC-GS	1–2	3–6	2–6	12–60	6–45	6,6–9,1	–
GStab	1–2	3–6	3–5	17–60	20–50	3,9–7,2	4,8–5,1
B-SBVC	1–3	8–11	3–6	25	30	5,8	–
OGBern	2–3	3–8	2–8	50–80	35–50	5,2–8,3	5,6–6,0

Tab. 9-2: *Streubreiten (unteres Quartil – oberes Quartil) der Mohr-Coulomb-Gesteins-Festigkeitsparameter der Prognose (Stufe Bauprojekt) aus triaxialen Versuchen, gegliedert nach geologischer Formation.*

Geologische Formation	Reibungswinkel Gestein (φ) Spitze/Rest		Kohäsion Gestein (c) Spitze/Rest	
	Seitendruck 4 MPa	Seitendruck 8 MPa	Seitendruck 4 MPa	Seitendruck 8 MPa
	φ [°]	φ [°]	c [MPa]	c [MPa]
PGC	33–47/45–50	27–37/35–41	12–25/1,4–1,2	20–35/3,4–5,6
GM	41–53/47–51	37–49/41–44	6–25/1,0–1,6	12–20/3,1–4,8
OGC	43–56/47–51	43–48/39–46	10–16/1,1–2,1	6–20/3,3–4,6
GCornub	41/57	39/47	35/1,2	35/5,4
B-UBC	47–55/50–57	42–52/43–52	9–18/1,7–2,1	10–25/4,4–5,2
GGium	45–46/43–46	37–40/35–39	4–8/0,9–1,7	6–8/2,1–4,1
LVC-FM	45–47/45–49	39–40/36–40	9–10/1,4–2,3	12/4,1–6,0
LVC-GS	46/42	29/36	3/1,0	8/2,8
GStab	42–49/43–47	39–43/36–40	3–11/1,0–2,1	5–10/3,0–4,3
B-SBVC	–	–	–	–
OGBern	45–52/48–51	42–49/41–45	7–14/1,1–1,6	10–19/3,0–4,7

Tab. 9-3: *Resultate der triaxialen Druckversuche an der EPFL und an der ETHZ: gemittelte Kennziffern, gegliedert nach Kakirit-Typ aus der jeweiligen geologischen Formation (FG = Kakirit-Typ «fault-gouge», FB = Kakirit-Typ «fault-breccia»).* [1] *Triaxialversuch ETHZ*

Geologische Formation	Reibungswinkel (φ) gemittelt [°]	Kohäsion (c) gemittelt [MPa]	E-Modul (E_{50}) [GPa]
LVC Typ 3 (FG)	26,30	0,20	1,10
LVC Typ 2 (FB)	30,00	0,75	0,50
GM (FG)	20,00	0,80	0,10
OGC (FG)	30,00	0,50	–
PGC (FG)[1]	27,40	0,22	–
GM (FB)	36,50	2,50	0,50
OGC (FB)	30,50	1,30	–
GStab/OGBern (FB)	24,00	3,50	–
GStab (FB)	23,00	2,70	1,50
Alle FG-Proben	25,90	0,43	–
Alle FB-Proben	28,80	2,15	–

den alle prognostizierten geologischen Einheiten geotechnisch untersucht.

Die Kennwerte streuten sowohl zwischen den geologischen Einheiten als auch innerhalb der einzelnen Einheiten markant. Dies ist einerseits auf die Anisotropie des Gebirges (Gefüge, Schieferungsflächen, Trennflächen), anderseits auf die stark variable petrographische Zusammensetzung der Gesteine zurückzuführen (glimmerreichere versus quarz- und feldspatreichere Lagen im Gestein).

Die in den einaxialen Druckfestigkeitsversuchen festgestellten Festigkeitsunterschiede zwischen den geologischen Einheiten widerspiegelten sich auch in den Mohr-Coulomb-Festigkeitsparametern (Reibungswinkel und Kohäsion, s. Tab. 9-2). Bei allen triaxialen Versuchen zeigte sich eine Abhängigkeit der Gesteinsparameter zur seitlichen Einspannung φ_3. Mit ansteigender seitlicher Einspannung von 4 auf 8 MPa nahmen die Kohäsionswerte durchschnittlich um Faktor 1 bis 1,3 (Bruchwert) bzw. um Faktor 2,5 (Restwert) zu. Bei den Reibungswinkeln hingegen wurde eine Reduktion von rund 4–5° (Bruchwert) bzw. 6–7,5° (Restwert) festgestellt. Ein möglicher Grund für diese Abnahme dürften Anisotropieeffekte im Prüfkörper darstellen (z.B. räumliche Änderung des Schieferungswinkels sowie der Stoffbänderung). Das Auftreten von Kriech- oder Konsolidierungsprozessen während der Durchführung des Triaxialversuchs, welche die Scherparameter φ und c beeinflussen könnten, kann wegen der relativ kurzen Versuchsdauer eines konventionellen Triaxialversuchs, als unwahrscheinlich angesehen werden.

Weitere felsmechanische Gesteinskennwerte der Prognose sind den Tabellen der in der Bauausführung durchgeführten Versuche zu entnehmen (s. Kap. 9.1.3).

An kakiritischen Gesteinsproben, die aus Störungszonen stammten, wurden Triaxialversuche durchgeführt. Da die Datenmenge aufgrund einer kleinen Anzahl an geeigneten kakiritischen Gesteinsproben in den Kernbohrungen ge-

ring war, resultierte ein grösserer Streubereich. Für die Gesteinsproben mit Kakirit des Typs «fault-gauge» variierten die Reibungswinkel zwischen 20 und 30°, die Kohäsion zwischen 0,2 und 0,8 MPa. Gesteinsproben mit Kakirit des Typs «fault-breccia» erreichten Reibungswinkel mit Werten zwischen 23 und 36,5°. Die Kohäsion lag zwischen 0,75 und 3,5 MPa (Tab. 9-3).

9.1.3 Felsmechanische Kennwerte während der Bauausführung

Im Verlauf des Tunnelvortriebs wurde eine Vielzahl von felsmechanischen Labor- und Feldversuchen durchgeführt. Die Gesteinsproben stammen aus dem Ausbruchmaterial oder aus Bohrkernproben. Darüber hinaus führte der Geologe der Materialbewirtschaftung regelmässige Materialprüfungen am Ausbruchmaterial für die Beurteilung der Punktlastwerte $I_{s(50)}$, der Brechbarkeit und der Abrasivität durch. Die folgende Tabelle fasst alle am CBT durchgeführten geomechanischen Laborversuche zusammen.

Tab. 9-4: *Übersicht der durchgeführten Labor- und Feldversuche während der Bauausführung.*

Versuch	Anzahl
Punktlastversuche	52
Punktlastversuche (Materialbewirtschaftung)	350
Einaxiale Druckfestigkeitsversuche	63
Triaxialversuche (mit konstantem Seitendruck)	73
Triaxialversuche (mit variablem Seitendruck)	1
Triaxialversuche (ETH Zürich)	4
Direktscherversuche auf Trennflächen	9
Spaltzugfestigkeitsversuche	6
Abrasivitätsversuche	26
TBM-Penetrationsversuche (Feldversuch im FIS)	9

Punktlastversuche

Punktlastversuche dienten zur Beurteilung des Einflusses der Anisotropie aufgrund der Schieferung. Mittels Umrechnung des Anisotropie-Indexes ($I_{a(50)}$) liess sich zudem die einaxiale Druckfestigkeit abschätzen. Die Mehrheit der Gesteinsproben stammten aus den Bohrkernproben im «Subparallelismus», des Homogenbereichs 12Abis und dem Verzweigungsbauwerk Sarè (Anh. 13-p, 13-q).

Bei den Punklastversuchen wurde die Belastungsrichtung bezüglich der Schieferung beim Versuch festgehalten. Die Resultate der schieferungssenkrechten Festigkeit ($I_{s(50)\,senkrecht}$) und der schieferungsparallelen Festigkeit ($I_{s(50)\,parallel}$) wurden darüber hinaus mit den Kennziffern der Prognose verglichen (Kap. 9.1.5).

Der Geologe der Materialbewirtschaftung führte eine systematische Beurteilung der Gesteinshärte am Ausbruchmaterial durch (Anh. 13-q), mit dem Ziel, das Ausbruchmaterial in wiederverwendbares Material (A-Material) oder nicht wiederverwendbares Material (B-Material) einzustufen. Da jeweils qualitativ bessere Handstücke von potenziellem A-Material ausgesucht wurden, weisen die Kennwerte der Materialbewirtschaftung generell höhere Festigkeitswerte und niedrigere Anisotropie-Indizes auf. Diese aufgeführten Werte sind für eine Beschreibung der realen

Tab. 9-5: *Medianwerte und Standardabweichungen der felsmechanischen Kennwerte aus den Punktlast- und Einaxialen Druckfestigkeitversuche (während der Bauausführung), gegliedert nach geologischer Formation.*

Geologische Formation	Punktlastversuche								Einaxiale Druckfestigkeitsversuche		
	Externe Laboruntersuchungen				Materialbewirtschaftung öBL						
	Anzahl	$I_{s(50)}$ //S	$I_{s(50)}$ ⊥S	$I_{a(50)}$	Anzahl	$I_{s(50)}$ //S	$I_{s(50)}$ ⊥S	$I_{a(50)}$	Anzahl	UCS	E_{50}
	[n]	[MPa]	[MPa]	[-]	[n]	[MPa]	[MPa]	[-]	[n]	[MPa]	[GPa]
PGC	12	0,89 (1,05)	6,79 (3,03)	9,56 (6,71)	164	2,40 (1,08)	6,60 (2,15)	2,64 (1,11)	12	19,7 (16,3)	19,9 (19,7)
OGC	5	1,72 (1,48)	4,75 (3,2)	2,76 (4,64)	60	2,80 (0,86)	7,50 (1,43)	2,63 (1,11)	–	–	–
B-UBC	–	–	–	–	10	3,00 (0,93)	6,35 (2,10)	2,55 (0,55)	8	46,3 (31,7)	30,5 (33,2)
GCornub	4	1,83 (0,68)	8,42 (2,19)	5,02 (2,77)	7	2,40 (0,86)	6,7 (1,15)	2,79 (0,49)	4	88,6 (16,0)	60,6 (10,6)
GGium	1	0,85 (-)	4,18 (-)	4,92 (-)	21	1,70 (0,72)	4,65 (1,39)	2,55 (0,90)	12	84,1 (73,2)	72,9 (32,2)
LVC	1	0,05 (-)	0,74 (-)	14,80 (-)	3	1,50 (0,64)	3,10 (2,06)	3,50 (0,88)	2	4,6 (5,0)	4,1 (4,2)
GStab	27	0,33 (0,22)	2,18 (2,29)	10,60 (7,81)	55	1,30 (0,65)	3,10 (1,94)	2,70 (1,18)	21	36,1 (20,6)	29,1 (13,4)
B-SBVC	2	0,70 (0,35)	3,81 (0,21)	6,33 (3,5)	3	2,05 (1,91)	4,85 (1,34)	3,64 (2,73)	1	25,2 (-)	7,5 (-)
OGBern	–	–	–	–	16	2,00 (0,62)	5,50 (2,16)	2,43 (0,80)	3	44,7 (17,0)	36,9 (11,7)

felsmechanischen Eigenschaften der Gesteine statistisch nur indikativ.

Die Gesteinsproben mit den höchsten Festigkeitswerten waren der Ceneri-Orthogneis mit isotroperem Gefüge und der Hornfels. Die Lithologien der Ceneri-Paragneis-Formation hatten wegen Schichtsilikatgehalts geringere Festigkeiten und einen viel höheren Anisotropie-Index. Weitere, ausgeprägt anisotrope Lithotypen im CBT waren der Giumello-Gneis, Schiefer und Gneis der Val-Colla-Linie und der Stabbiello-Gneis. Die basischen Gesteine, eingeteilt in Basite und Ultrabasite des Ceneri, oder Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone waren als annähernd isotropes Gestein zu betrachten.

Einaxiale Druckfestigkeitsversuche

Die verwendeten Gesteinsproben zur Ausführung der einaxialen Druckversuche stammen aus den Bohrkernproben der Vorausbohrungen. Die erkundeten Zonen liegen in den Bereichen des Homogenbereichs 12Abis und des Parallelismus (südliche Ceneri-Zone), sowie im Bereich der Val-Colla-Linie, der Kernbohrung GbC-SE-01 und dem Verzweigungsbauwerk Sarè.

Die Kennwerte der einaxialen Druckfestigkeit (UCS) und E-Modul (E_{50}) beim Nordvortrieb Sigirino (Anh. 13-r) zeigen, mit der Ausnahme des Hornfelsen, eine grosse Streuung. Sie korrelieren mit den statistischen Werten der entsprechenden Punktlastversuche.

Die Untersuchungen beim Südvortrieb Sigirino enthalten vorwiegend Proben der Stabbiello-Gneis-Formation. Die Standardabweichung widerspiegelt die variable Petrographie, Gefüge und das Verhältnis Quarz/Schichtsilikate, welche diese geologische Formation prägen.

Triaxialversuche

Die Triaxialversuche umfassen insgesamt 73 Gesteinsproben mit konstantem Seitendruck und fünf mit variablem Seitendruck. Alle Gesteinsproben stammen aus den Kernbohrungen.

Die Kennwerte aus den Triaxialversuchen mit konstantem Seitendruck sind in der Figur 9-4, gegliedert nach geologischer Formation, dargestellt. Weitere Details dazu sind im Anhang 13-s nachzulesen.

Bei konstantem Seitendruck (σ_3) weisen die Gesteinsproben der OGC und der BUBC eine höhere vertikale Druckfestigkeit auf als der Ceneri-Paragneis und der Hornfelsgneis. Der Ceneri-Paragneis weist mit ca. 42 N/mm² unabhängig vom Seitendruck 4 oder 8 MPa die kleinsten Druckfestigkeiten auf.

Tab. 9-6: *Medianwert und Standardabweichungen der felsmechanischen Kennwerte der Triaxialversuche mit konstantem Seitendruck, Spaltzugfestigkeit- und Abrasivitätsversuche (FIS) während der Bauausführung, gegliedert nach geologischer Formation. σ_1: Vertikaldruck, σ_3: Seitendruck*

Geologische Formation	Triaxialversuche			Spaltzugfestigkeitversuche		Abrasivitätsversuche			
	Anzahl	φ_3	φ_1	Anzahl	Zugfestigkeit	Anzahl	LCPC-Index	Klassifizierung CAI	CAI Bezeichnung
	[n]	[MPa]	[MPa]	[n]	[MPa]	[n]	[g/t]	[-]	[-]
PGC	6	4	42,2 (23,8)	–	–	8	861 (126)	3,1 (0,6)	sehr abrasiv
	4	8	42,1 (9,1)						
OGC	3	4	137,9 (20,5)	–	–	14	1136 (235)	4,0 (1,0)	von sehr bis extrem abrasiv
	5	8	136,1 (22,8)						
	3	5	88,7 (5,5)						
	3	10	112,3 (9,9)						
GCornub	3	4	116,6 (33,3)	–	–	1	668 (–)	2,4 (–)	sehr abrasiv
	4	8	104,5 (16,3)						
	1	12	180,3 (–)						
B-UBC	6	4	156,3 (84,9)	–	–	1	488 (–)	1,8 (–)	abrasiv
	2	8	242,4 (36,9)						
GGium	–	–	–	–	–	2	462 (14)	1,8 (0,3)	von abrasiv bis sehr abrasiv
LVC	–	–	–	–	–	–	–	–	–
GStab	13	4	49,1 (28,1)	6	1.4 (1.3)	–	–	–	–
	9	8	53,5 (41,9)						
	2	5	89,0 (28,3)						
	2	10	103,7 (29,3)						
	2	12	119,4 (42,2)						
B-SBVC	5	1	91,1 (–)	–	–	–	–	–	–
	10	1	184,4 (–)						
OGBern	1	4	99,8 (–)	–	–	–	–	–	–
	2	8	107,8 (22,2)						

Tab. 9-7: *Übersicht über die Ergebnisse aller mehrstufigen Triaxialversuche der Kakiritproben aus der LVC (Tabelle Institut für Geotechnik, ETHZ) unter drainierten Bedingungen.*

Probe Nr.	Spezifisches Gewicht	Durchlässigkeitsbeiwert	Verformungsparameter				Festigkeitsparameter	
	γ [kN/m^3]	k [m/s]	E [GPa]				φ [°]	c [MPa]
			1. Laststufe	2. Laststufe	3. Laststufe	4. Laststufe		
SIG_1720	26,0	$7{,}7 \cdot 10^{-11}$	1,5	1,8	3,5	n/a	20,4	0,15
GbC-SE-1088-R	23,8	$3{,}2 \cdot 10^{-9}$	1,4	2,3	3,8	5,5	30,8	0,67
SIG_1603	24,5	n/a			5,4	6,3	22,7	0,63
SIG_1680	24,7	$1{,}2 \cdot 10^{-10}$		2,7	3,5	n/a	25,4	0,0

Beim Südvortrieb des Bauloses Sigirino lieferten die Triaxialversuche wertvolle Informationen über die Festigkeit und der Anisotropie des Fels, speziell für die ergänzende Prognose beim Vortrieb im Verzweigungsbauwerk Sarè. Zu Beginn des Ausbruchs der Kavernen des Verzweigungsbauwerkes Sarè wurden mit zwei Kernbohrungen (GbC-Sarè-SE-01 und GbC-Sarè-SO-01) die Felsverhältnisse im Hinblick auf die Störungszone 38C.1 in der Nähe der Stirnwand beider Kavernen erkundet. Das Ziel war, wegen des zunehmenden Ausbruchquerschnitts (von 68 m^2 bis zu 282 m^2) und der subhorizontalen Hauptschieferung Verstärkungsmassnahmen für die Ausbruchsicherung und Gitterbögen-Strecken frühzeitig zu bestimmen (Kap. 9.2.3, 10.3.11 und 11.4.7).

Ähnlich wie bei den Punklastversuchen, weisen die Proben der Triaxialversuche beim Bernardo-Orthogneis und bei den Basiten und Semibasiten der Val-Colla-Zone eine höhere Druckfestigkeit als der Stabbiello-Gneis auf.

Zum Vorauserkundungskonzept der Störungszonen in der LVC gehörten insgesamt vier Kernbohrungen, die alle in der vorauseilenden Oströhre ausgeführt wurden. Die erste Kernbohrung (GbC-SE-LVC-01) ermöglichte, das Gestein aus der vorliegenden Störungszone zu untersuchen. Darüber hinaus wurde in einer von der ETHZ separat durchgeführten Bohrung ein Shelby Tube Sampler angewendet, um die Probe GbC-SE-1088-R in der Nähe desselben Bohrlochs zu entnehmen.

Das Institut für Geotechnik der ETHZ untersuchte das Nachbruchverhalten («post-failure») in Gesteinsproben aus der Störungszone der LVC mit triaxialem Mehrstufenversuch (Anh. 13-u) unter drainierten und nicht drainierten Bedingungen. Die Störungszone, welche dem Homogenbereich 30A entspricht, besteht aus einer unregelmässigen metrischen Aufeinanderfolge von Kataklasit, Kakirit des Typs «fault breccia» und «fault gouge», durchmischt mit wenigen Myloniten, häufig in Kombination mit zwei bis drei verschiedenen Gesteinstypen in derselben Ortsbrust. In diesem Sinn wurde Kakirit des Typs «fault gouge» (LVC Lithotyp 2), bestehend ursprünglich aus Stabbiello-Gneis, oder wenig Giumello-Gneis, als repräsentatives Gestein verwendet, um die starke Heterogenität der Lithotypen und das dazugehörige mechanische Verhalten darzustellen. In der Figur im Anhang 13-u lässt sich erkennen, dass bei Seitendruck von 6 MPa die Werte des Elastizitätsmoduls konstant blieben (3,5–3,8 GPa).

Die aus den Triaxialversuchen resultierenden Ergebnisse der Kakiritproben veranschaulichen in bautechnischer Sicht, dass sich der Fels bei sehr geringer oder fehlender Kohäsion ähnlich verhält wie ein Lockergestein und Ereignisse wie Ortsbrustinstabilität und Niederbrüchen begünstigen kann.

Mit einem weiteren triaxialen Mehrstufenversuch bei konstantem Seitendruck und undrainierten Bedinungen (Anh. 13-t) bestimmte das Labor die Kennwerte einer Gesteinsprobe, bestehend aus einem stark chloritisierten und serizitisierten Kataklasit des Typs «fault breccia».

Direktscherversuche auf Trennflächen

Beim Tunnelvortrieb wurden insgesamt neun Direktscherversuche auf Trennflächen durchgeführt. Die dafür benutzten Gesteinsproben stammen aus dem Homogenbereich 12Abis, der mittleren Ceneri-Zone und dem Verzweigungsbauwerk Sarè. Die Kennwerte der durchgeführten Versuche sind im Anhang 13-v einsehbar.

Spaltzugfestigkeitsversuche

Zur Dimensionierung der Ausbruchsicherung beim Vortrieb des Verzweigungsbauwerks Sarè verhalfen Spaltzugfestigkeitsversuche an Kernbohrproben der Vorausbohrung GbC-Sarè-SO-01. Die entnommenen Gesteinsproben, bestehend aus Lithologien des Stabbiello-Gneises, wiesen eine Zugfestigkeit von 0,7–4,3 MPa, mit einem Mittelwert von 1,40 MPa, auf (Anh. 13-w).

Abrasivitätsversuche

Die Bestimmung des Abrasivität des Gesteins erfolgte beim Maschinenvortrieb des Fensterstollens FIS mittels LCPC-Verfahrens (Tab. 9-6).

Der Ceneri-Orthogneis weist eine mittlere Abrasivität auf, der Ceneri-Paragneis und Hornfels wurden als «schwach abrasiv» klassifiziert. Trotz des hohen Amphibolanteils ergab der Versuch mit den Basiten und Ultrabasiten der Ceneri-Zone einen relativ niedrigen Abrasitivitätswert. Die Werte der beiden letzten erwähnten geologischen Formationen folgen aus jeweils nur einen einzigen Versuch. Die Giumello-Gneis-Formation wies, wie zu erwarten, eine sehr geringe Abrasivität auf.

TBM-Penetrationsversuche

Der Fensterstollen Sigirino wurde von Tm 40 bis Tm 2308 mittels TBM aufgefahren. TBM-Penetrationsversuche dienten der Beurteilung der Bohrkopf-Penetration für den Vergleich der prognostizieren Bohrklassen und den daraus folgenden Anpassungen der Vortriebsprognose. Die Pe-

netrationsrate ist als mittlere Eindringtiefe ins Gebirge mit einer einzigen Umdrehung des Bohrkopfes zu verstehen. Tabelle 9-8 enthält die Penetrationsraten der einzelnen Versuche.

Tab. 9–8: *Resultate der durchgeführten TBM-Penetrationsversuche im Fensterstollen Sigirino.*

Tm	Geologische Formation	Penetration	Bohrklasse
		[mm/U]	[-]
281	OGC	9,12	Y (mittel)
417	OGC	11,51	Y (mittel)
444	OGC	9,75	Y (mittel)
531	OGC	4,42	X (schwer)
577	OGC	7,25	Y (mittel)
806	PGC	19,12	Z (leicht)
1016	OGC	13,04	Z (leicht)
1187	OGC	8,31	Y (mittel)
1387	PGC	Versuch abgebrochen	Z (leicht)

Die meisten Penetrationsversuche erfolgten im Ceneri-Orthogneis, welcher einer mittleren Bohrbarkeitsklasse entspricht. Innerhalb des Ceneri-Orthogneises sind grosse Unterschiede der Penetration feststellbar. Es ist daher nachvollziehbar, dass innerhalb der gleichen geologischen Formation die Bohrbarkeit nicht nur von der Mineralogie, sondern auch von der Korngrösse abhängt. Gesteine mit mittlerem bis grossem Korn ergaben tiefere Penetrationswerte als feinkörnige Gesteine.

9.1.4 Geologische Überprofile

Die Grösse des geologischen Überprofils und die radialen Verformungen im Tunnelprofil sind zwei direkte Messgrössen, die das Verhalten und die Beschaffenheit des Gebirges beschreiben. Der Tunnelvortrieb hat gezeigt, dass ein komplexer Zusammenhang zwischen Vortriebsleistung, Bautechnik und Beschaffenheit des Gebirges besteht. Im Hinblick auf die beim Vortrieb gesammelten Beobachtungen und Erfahrungen der Gebirgsbeschaffenheit präsentiert dieser Abschnitt ein paar Ergebnisse einer umfangreichen Analyse der geologischen Überprofile ausschliesslich für das Baulos Sigirino. Die vollständige Zusammenstellung zwischen Bautechnik, geologischem Überprofil und Verformung entlang der gesamten Tunnelachse ist im geologischen-bautechnischen Längenprofil der Oströhre ersichtlich (Taf. I).

Im Werkvertrag des Bauloses Sigirino wurde der Wert für die Grenzlinie G gemäss Norm SIA 118/198 für den Einspurtunnel mit 60 cm festgelegt (Fig. 9-1). Überschreitet die effektive Ausbruchslinie die Grenzlinie G, so wird das entstandene Überprofil, soweit geologisch bedingt, ab der Linie d = 20 cm als anerkanntes geologisches Überprofil vergütet. Der Wert «d» wurde vom Unternehmer im Leistungsverzeichnis für alle Ausbruchsicherungstypen mit 20 cm angegeben. Die Fläche zwischen der theoretischen Ausbruchslinie und «d» entspricht dem arbeitstechnischen Überprofil. Als Richtwert für die Mengenermittlung des geologischen

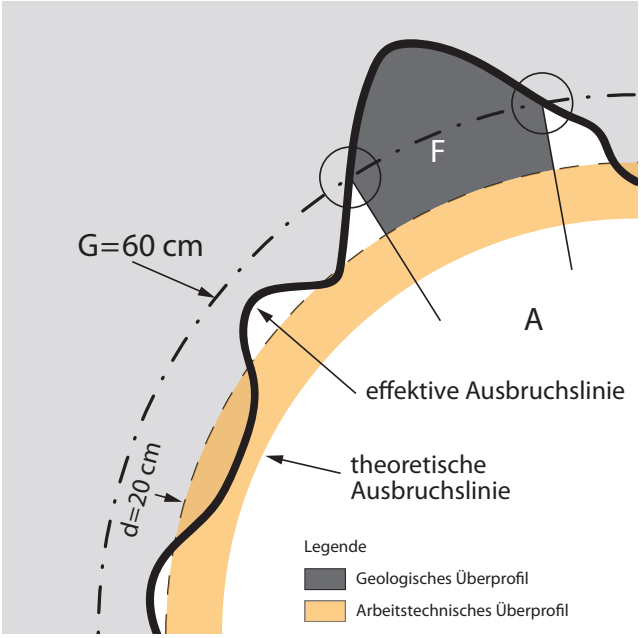


Fig. 9-1: Definition des geologischen Überprofils beim Sprengvortrieb nach SIA-Norm 118/198. Erläutert die im Werkvertrag festgelegten Grössen für das Baulos Sigirino.

Überprofils wurde im Leistungsverzeichnis ein Volumen von 1 m³/m' angenommen.

Die Gegenüberstellung der Homogenbereiche, welche die angetroffenen Lithologien repräsentieren, zusammen mit den eingebauten Ausbruchsicherungstypen, den geologischen Überprofilen mit den dazugehörigen Abschlagslängen sowie dem Zerscherungsgrad des Gesteins individuiert eine mögliche Proportionalität zwischen den geologischen, bautechnischen und arbeitstechnischen Grössen (Fig. 9-3 und Fig. 9-4).

Aus den beiden erwähnten Figuren geht hervor, dass die maximalen Werte der geologischen Überprofile in den Portalbereichen, in der CAOP und im Verzweigungsbauwerk Sarè West entstanden sind. Diese Tatsache hängt zum Teil mit dem Durchmesser des Ausbruchquerschnittes zusammen und ist anderseits auf die ungünstigeren Felsverhältnisse zurückzuführen (CAOP und Sarè West). Ein anderer wichtiger Faktor, der zu einer Zunahme der geologischen Überprofile führte, ist die Auflockerung des Gebirges, die hauptsächlich im Portalbereich Vigana beobachtet wurde. Nach dem Gletscherrückzug am Ende der letzten Eiszeit wurde durch die isostatische Ausgleichsbewegung an den Bergflanken eine Klüftung induziert, die eine Alteration durch infiltriertes Oberflächenwasser entlang der Klüfte bewirkte und das Gebirge entfestigte.

Beim Vortrieb Vigana betrugen die maximalen, gemessenen geologischen Überprofile 29 m³/m' in der Kaverne Ost und 32 m³/m' in der Kaverne West wobei ein Mittelwert von 3,2 m³/m' für den gesamten Ausbruch des Hauptloses des CBT anfällt (Fig. 9-3 und Fig. 9-4).

Die Höchstwerte beim Vortrieb im Baulos Sigirino können anhand der einzelnen Peaks identifiziert werden, die üblicherweise zwischen 7 m³/m' und 10 m³/m' variieren (Fig. 9-3

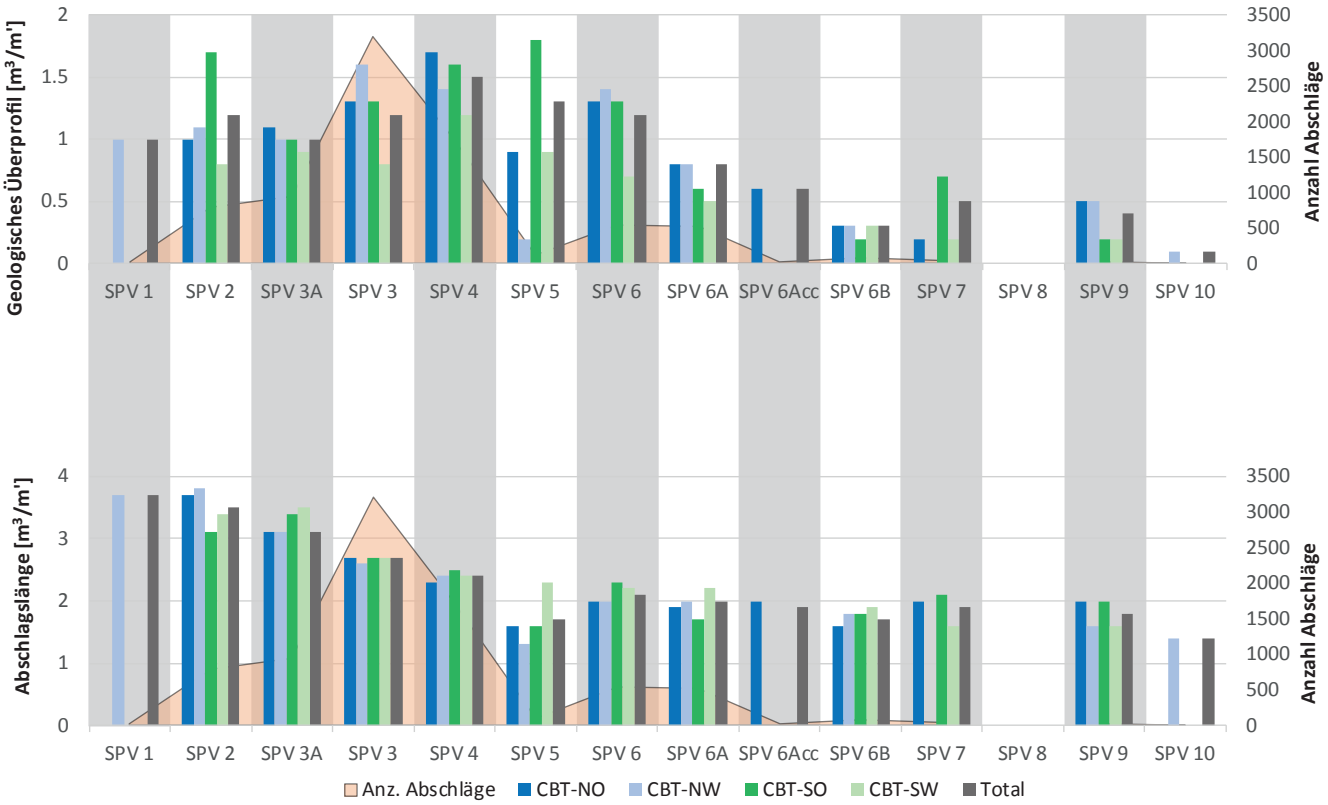


Fig. 9-2: Gegenüberstellung der geologischen Überprofile, effektiven Abschlagslängen und Anzahl Abschläge für das Baulos Sigirino, geordnet nach Bauwerk und Ausbruchsicherungstyp. Strecken mit maschinenunterstützten Vortrieb (MUF) und das Verzweigungsbauwerk Sarè wurden ausgeschlossen.

und Fig. 9-4). Figur 9-2 zeigt die Zusammenhänge zwischen AST, der Anzahl durchgeführten Abschlägen und den angetroffenen geologischen Überprofilen. Aus der Auswertung ergibt sich, dass die geologischen Überprofile aller leichten Ausbruchsicherungstypen (SPV 1–6) im Bereich zwischen 0,3 und 1,5 m³/m' lagen. Der am häufigsten eingebaute Typ SPV 3 lag mit einer mittleren Abschlagslänge von 2,7 m und einem geologischen Überprofil von 1,2 m³/m' im Mittelfeld.

9.1.5 Vergleich zwischen Prognose und Befund

Dieses Kapitel beschreibt den Vergleich zwischen den felsmechanischen Kennwerten vor und nach der Bauausführung (Kap. 9.1.2 und 9.1.3).

Punktlastversuche

Tabelle 9-1 und 9-5 listen die Medianwerte und Standardabweichungen der Resultate der Punktlastversuche für die Prognose und den Befund auf.

Der Vergleich zwischen den Prognose- und Befunddaten lässt erkennen, dass die Festigkeitswerte $I_{s(50)}$ und Anisotropie-Indizes im Befund zum Teil ausserhalb der Prognose liegen. Es ist zu beachten, dass während der Bauausführung viel mehr Proben untersucht wurden, als für die Prognose erforderlich erschienen. Deshalb weisen Anisotropie-Indizes aus der Materialbewirtschaftung gesammelten Proben statistisch repräsentativere Ergebnisse auf. Die Medianwerte der $I_{s(50)}$// Indizes der Materialbewirtschaftung zeigen, dass die Werte der PGC und GStab eine gute Übereinstimmung mit denen der Prognose haben. Für die geologischen Formationen OGC, GGium, LVC und B-SBVC zeigen die Resultate für $I_{s(50)}$// bessere Werte als prognostiziert. Für die übrigen geologischen Formationen B-UBC, GCornub und OG-Bern liegen die Werte etwas niedriger. Bei den senkrechten Festigkeitswerten von $I_{s(50)}^{\perp}$ ist anzumerken, dass die Formationen GGium und LVC die einzigen sind, die mit den prognostizieren Werten übereinstimmen, während die übrigen Formationen tiefere Werte als die Prognose aufweisen. Die Werte der Anisotropie-Indizes sind ausschliesslich für die Formationen GGium, LVC, GStab und B-SBVC höher als die Prognose.

Der Unterschied zwischen den Werten der Materialbewirtschaftung und denen der externen Laboratorien sind auf das Probenentnahmekriterium zurückzuführen. Bei den Gesteinsproben, die in den externen Laboratorien untersucht wurden, war das Ziel die Kennzahlen von den ungünstigsten Gesteinen zu bestimmen. Die Probenentnahmen der Materialbewirtschaftung beruhte immer auf der Auswahl von geeignetem Ausbruchmaterial für die Herstellung von Gesteinskörnung für Beton. Dabei spielten die Druckfestigkeitseigenschaften des Ausbruchmaterial für die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit eine übergeordnete Rolle.

Einaxiale Druckfestigkeitsversuche

Die Befunddaten der Ceneri-Paragneis-Formation zeigen eine Abweichung im Vergleich zu den Prognosewerten des UCS und E_{50} (Tab. 9-1 und Tab. 9-5). Dieser Unterschied (E_{50}) kann wegen der kleinen Anzahl Versuche, die während dem Bau durchgeführt wurden, oder durch die hohe Heterogenität des Gesteinsgefüges innerhalb der PGC-Formation

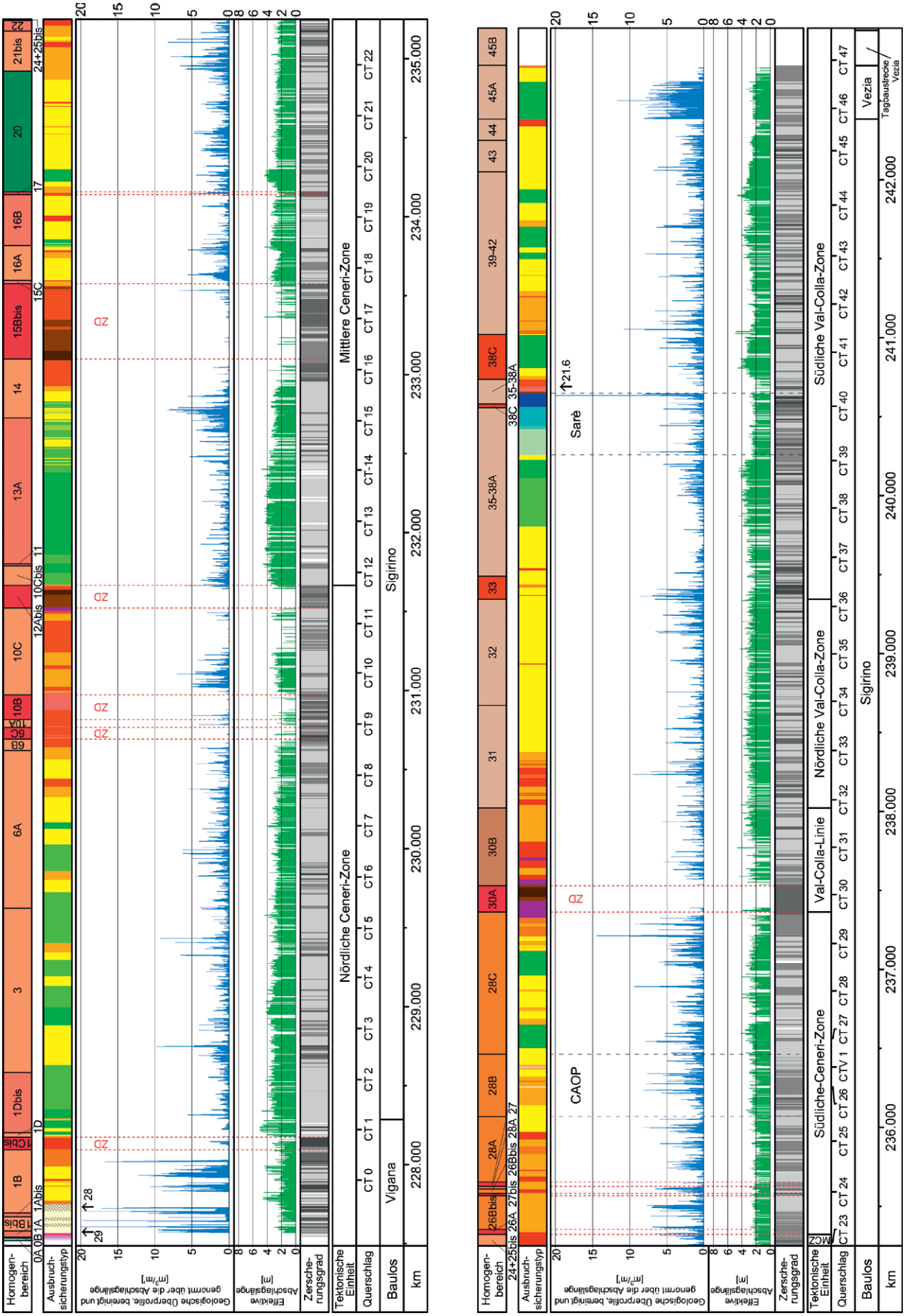


Fig. 9-3: Befund und Gegenüberstellung der Homogenbereiche, Ausbruchsicherungstypen, geologischem Überprofil, Abschlagslänge und Grad der Zerscherung für die gesamte Oströhre. Für die Erläuterung der Farben wird auf die allgemeine Legende verwiesen (Anh. 13-c, 13-d).

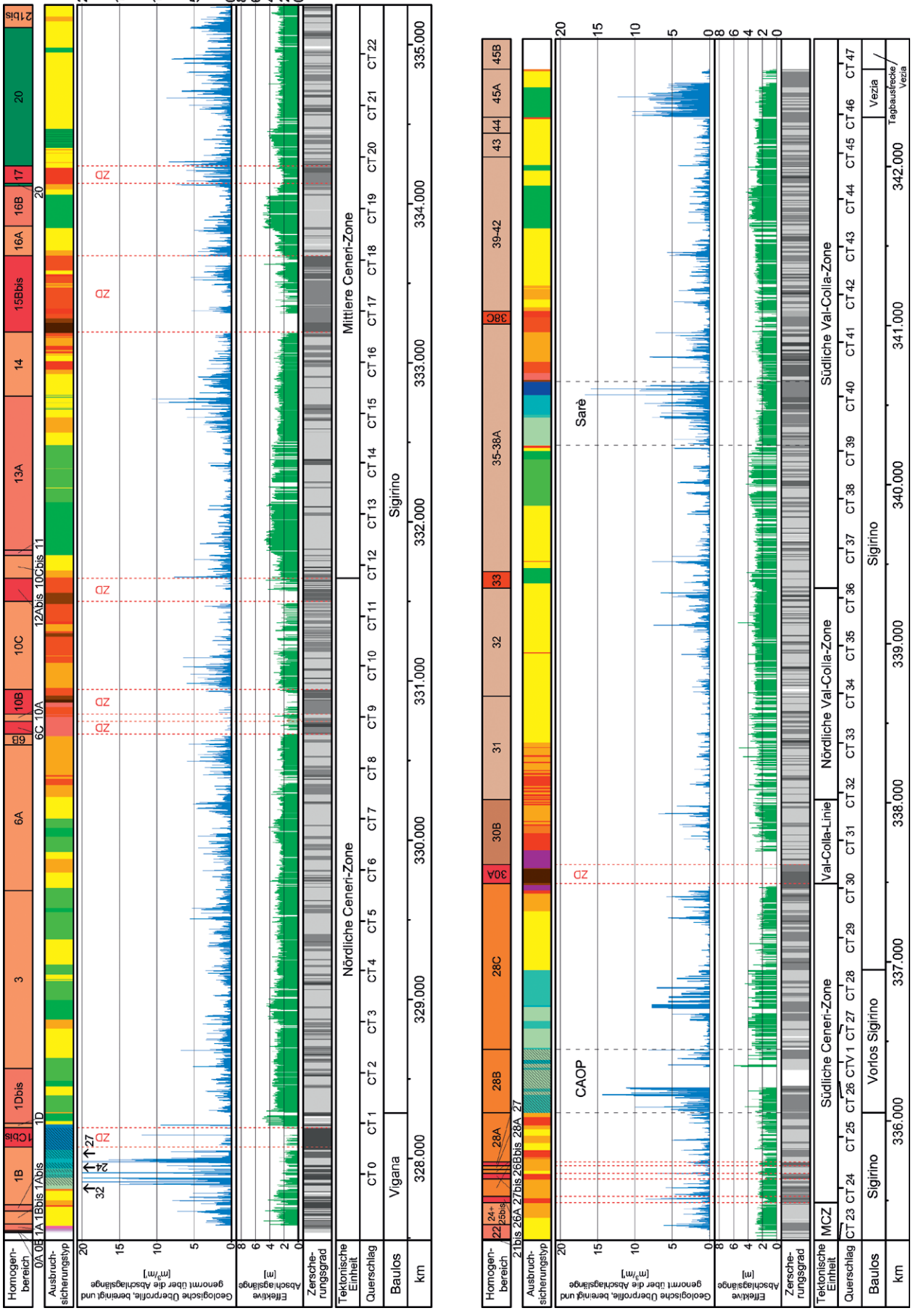


Fig. 9-4: Befund und Gegenüberstellung der Homogenbereiche, Ausbruchsicherungstypen, geologischem Überprofil, Abschlagslänge und Grad der Zerscherung für die gesamte Weströhre. Für die Erläuterung der Farben wird auf die allgemeine Legende verwiesen (Anh. 13-c, 13-d).

entstanden sein. Beim Ceneri-Orthogneis ist die Anzahl der während des Baus durchgeführten Versuche deutlich geringer als die Anzahl Proben für die Prognose. Die UCS-Werte der Ceneri-Orthogneis-Proben im Befund zeigen niedrigere Werte als in der Prognose, hingegen weisen die E_{50}-Werte eine höhere Streuung auf. Die Ergebnisse deuten auf eine grössere lithologische Variabilität innerhalb des OGC und sind mit der Variation im Gefüge des Gesteins in der Grössenordnung der Probe zu erklären. Die UCS-Werte für den Hornfels sind höher als die Prognosewerte, es gibt statistisch gesehen wenig repräsentative Versuche. Die UCS-Werte der B-UBC stimmen gut mit den Prognosewerten überein, hingegen liegen die E_{50}-Werte darunter.

In der Planungsphase wurden vor allem für die Risikozonen in der südlichen Ceneri-Zone (GGium) und der LVC (LVC-FM und LVC-GS) zahlreiche einaxiale Druckfestigkeitsversuche durchgeführt. Während der Durchörterung der LVC wurden die Versuche hauptsächlich auf mehrstufige Triaxialversuche mit variablem Seitendruck unter drainierten Bedingungen zur Bestimmung der Kennwerte im kakiritischen Gestein des Typs «fault gouge» und «fault breccia» fokussiert (s. Kap. 9.2.3). Die beiden Proben, die einem einaxialen Druckfestigkeitsversuch unterzogen wurden und die mit der Prognose verglichen werden können, stammen aus der Kernbohrung GbC-SE-LVC-02 und enthalten feinkörnigen Phyllonit (LVC-FM) mit einem UCS-Wert von 4,6 MPa.

Die UCS-Werte des Stabbiello-Gneises entsprechen im Wesentlichen der Prognose. Für den Bernardo-Orthogneis resultieren ähnlich wie beim Ceneri-Orthogneis, geringere UCS- und E_{50}-Werte, wobei diese beim Bernardo-Orthogneis auf den Zerscherungsgrad zurückzuführen sind, weil die angetroffenen Gesteine häufig tektonisiert sind.

Triaxialversuche

Die Kennwerte, die aus den Triaxialversuchen resultieren, stimmen für die untersuchten Gesteinsproben auf dem Streckenabschnitt beim Nordvortrieb Sigirino weniger gut mit der Prognose überein (Tab. 9-2 und Tab. 9-5). So sind die Prognosekennwerte des PGC ungünstiger als die des Befundes. Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse des OGC höhere Werte als die der Prognose. Dasselbe gilt für die Proben aus den B-UBC, die z.T. die Werte der Prognose deutlich übertreffen. Angesichts der geringen Anzahl der Versuche an Hornfels in der Projektphase, verfügt diese geologische Formation, statistisch gesehen, über keinen repräsentativen Vergleich.

Die Versuche mit Gesteinsproben des Stabbiello-Gneises ergaben nur eine gute Übereinstimmung für einen Seitendruck von 4 MPa. Bei einem Seitendruck von 8 MPa ist eine Abweichung feststellbar, was auf die Variabilität der Gesteinsbeschaffenheit innerhalb der Formation zurückzuführen ist. Die Kennwerte der Bernardo-Orthogneis-Formation sind ähnlich jenen der Prognose, wobei auch bei diesen ein grösserer Streubereich wegen der geringen Anzahl von Proben berücksichtigt werden muss.

Spaltzugfestigkeitsversuche

Die Spaltzugfestigkeitsversuche wurden ausschliesslich mit Proben aus der Stabbiello-Gneis-Formation (Tab. 9-1 und Tab. 9-6) durchgeführt. Angesichts der geringen Anzahl der im Laufe der Bauausführung gewonnen Daten, ist der Vergleich statistisch gesehen nicht aussagekräftig. Die Versuchsergebnisse der Ausführung weisen einen niedrigeren Medianwert gegenüber der Prognose auf. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die angetroffenen Gesteinsverhältnisse ungünstiger waren als prognostiziert.

Abrasivitätsversuche

Um einen Vergleich der Versuche aus der Ausführung mit denen der Prognose zu ermöglichen, wurden die Befunddaten der LCPC-Abrasivitätsversuche an den Proben des Fensterstollens mit Hilfe der folgenden Gleichung auf den Cerchar-Abrasivitätsindex (CAI) umberechnet:

$$LAK = 303{,}7 \times CAI - 71{,}02 \quad \text{(Thuro et al. 2006)}$$

Die relativ hohen Werte des OGC, gefolgt von jenen des PGC, werden bestätigt (Tab. 9-1 und Tab. 9-5). Was den GCornub und den GGium betrifft, so besteht eine gute Übereinstimmung zwischen der Prognose und dem Befund. Das Ergebnis des einzigen Versuches B-UBC dürfte eine Unterschätzung des Wertes für ein amphibolitisches Gestein darstellen.

9.2 Vorauserkundungen

Die vortriebsbegleitende Vorauserkundung hatte zum Ziel, frühzeitig Erkenntnisse über das vorausliegende Gestein zu erhalten, damit beim Vortrieb dem jeweiligen Befund entsprechende Massnahmen getroffen werden konnten, welche zu einem sicheren und effizienten Vortrieb beitrugen. Im Rahmen des Auflage- und Bauprojektes erarbeitete der Projektgeologe ein Vorauserkundungskonzept.

9.2.1 Vorauserkundungskonzept

Beim Vortrieb sollte mittels vorauseilenden Erkundungsbohrungen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines unerwarteten geologisch oder hydrogeologisch bedingten Ereignisses frühzeitig erkannt werden. Die Ergebnisse der Vorausbohrungen dienten den Entscheidungsträgern als Unterlagen zur Beurteilung der Lage und zum Ergreifen von Massnahmen. Dieses Vorauserkundungskonzept wurde mit den Erfahrungen während der Vortriebsarbeiten angepasst (Bohrlänge, Bohrkopfdurchmesser und Bohrparameter), um den Ablauf, die Effizienz und Qualität der Vorausbohrungen zu optimieren.

Die Vorauserkundungsmethode wurde abhängig von deren Zielsetzung festgelegt. Schlagbohrungen sind eine relative kosten- und zeiteffiziente Methode, um in Vortriebs-, Diagonal- oder Radialrichtung das Gebirge zu erkunden. Während des Bohrvorgangs wurden die Bohrdaten aufgezeichnet und das Bohrklein nach jedem Bohrstangenwechsel gesammelt. Anhand der Zusammensetzung des Bohrkleins, der Eigenschaften des Spülwassers und der Bohrdaten waren Störungen, lithologische Grenzen und die Wasserführung metergenau bestimmbar.

Kernbohrungen kamen dann zum Einsatz, wenn Gesteinseigenschaften und Gesteinszusammensetzungen er-

mittelt werden mussten. An Bohrkernen liessen sich Änderungen in Schicht- und Schieferungslagen sowie die Kluftscharen zentimetergenau erfassen. Auch Richtung und Einfallen von lithologischen Grenzen konnten bestimmt werden. Zudem waren Bohrkerne für felsmechanische Untersuchungen erforderlich. In Vergleich zu den destruktiven Vorausbohrungen, waren Kernbohrungen zeit- und kostenintensiv, ermöglichten aber im CBT die Erstellung von Bohrungen bis 350 m Länge. Der dazu nötige Zeitaufwand verursachte einen Unterbruch des Vortriebs; Schlagbohrungen konnten hingegen mehrheitlich während den Arbeiten zwischen Vortriebszyklen eingeplant werden.

Seismische Methoden, wie TSP (Tunnel Seismic Prediction), können zur Bestimmung der Lage und Mächtigkeit von Störungen oder Gesteinsveränderungen im Vorfeld des Vortriebs rasch und ohne grössere Behinderung des Vortriebs eingesetzt werden. Die Auflösung und die Resultate bei dieser Methode sind aber von den örtlichen Randbedin-

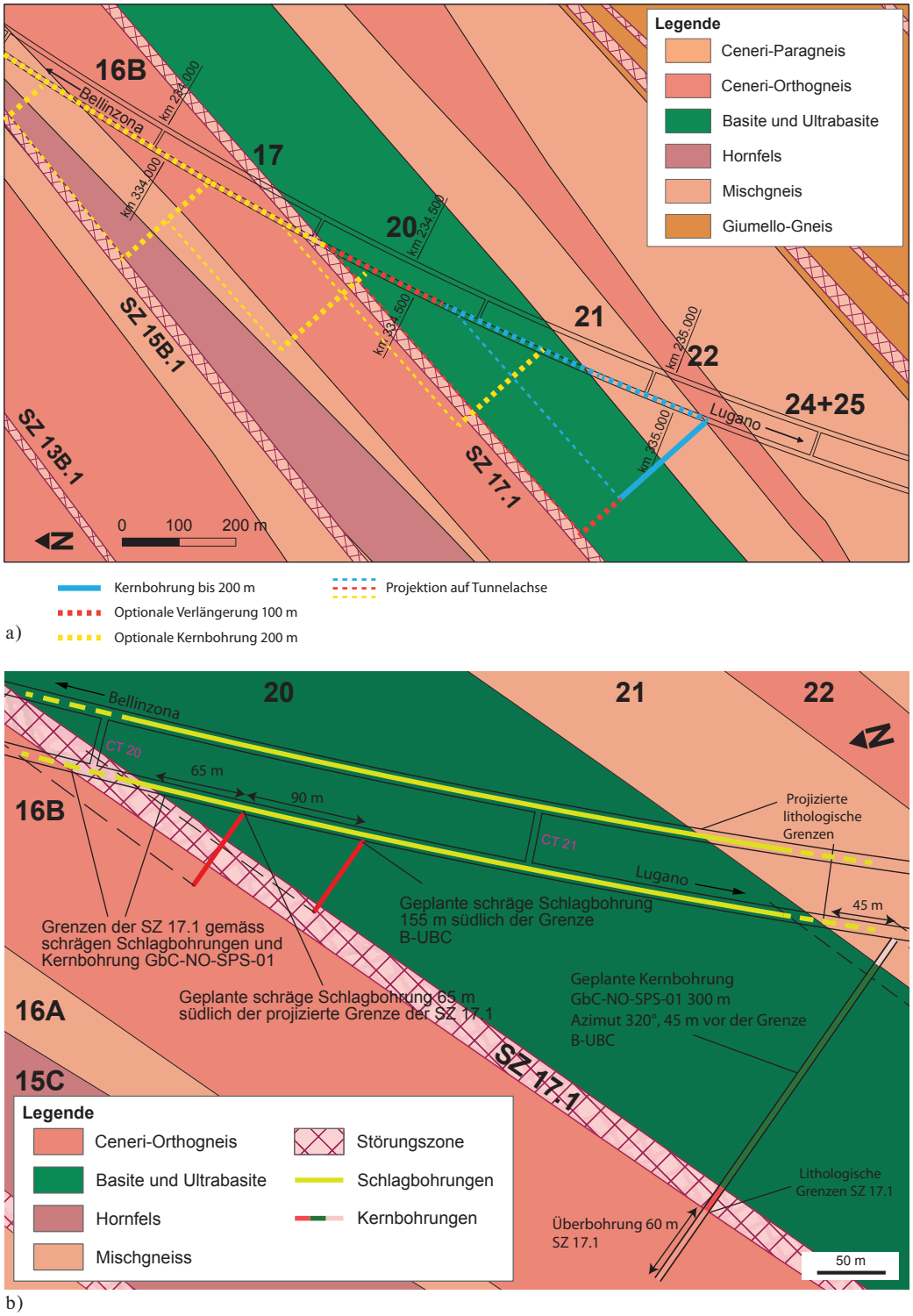


Fig. 9-5: Horizontalplan mit der geologischen Prognose der mittleren Ceneri-Zone. a) Vorauserkundungskonzept im Projekt zur Vorauserkundung der Risikozonen in den Homogenbereichen 13B bis 17, b) Angepasstes Konzept mit Annäherung an die Störungszone 17.1 mit Kernbohrungen schräg zur Vortriebsrichtung und anschliessenden destruktiven Schlagbohrungen.

gungen abhängig, gegeben durch die Impedanz der Grenzflächen im Fels, welche besonders im «Subparallelismus» oder in Störungszonen mit ähnlichen Kennwerten wie das ungestörte Gestein, die Interpretation erschweren. Um die Wirksamkeit dieser Erkundungsmethode zu ermitteln, wurde sie in der Val-Colla-Linie getestet. Es zeigte sich, dass bei den Gebirgsverhältnissen der LVC die TSP nicht zur Verbesserung der Prognose beitrug (vgl. Kap. 9.2.4).

Gemäss Vorauserkundungskonzept wurden systematische destruktive Vorauserkundungsbohrungen mit einer Überlappung von 5 m entlang beider Tunnelachsen geplant und ausgeführt.

Das Vorauserkundungskonzept unterschied in Anbetracht der geplanten Kernbohrungen zwischen Vorauserkundungsmassnahmen Nord und Süd. In den Risikozonen ausserhalb des «Subparallelismus», welcher sich auf die mittlere Ceneri-Zone bezog, waren Kernbohrungen in Vortriebsrichtung geplant. Zusätzlich sah das Konzept vor, die Kernbohrungen beim Vortrieb im «Subparallelismus» und in der Val-Colla-Linie mit schräg ausgerichteten Kernbohrungen zu ergänzen, damit wegen der spitzwinkligen Vortriebsrichtung zur Schieferung eine Prognose möglichst weitreichend extrapoliert werden konnte.

Der Befund in der vorauseilenden Tunnelröhre wurde für die Prognose in der anderen Tunnelröhre herangezogen. Die Vorausbohrungen konnten in geologisch günstigen Strecken allenfalls entsprechend reduziert oder auf die bereits erkundeten Störungszonen beschränkt werden, und insbesondere die aufwendigen Kernbohrungen gezielt angesetzt, bzw. durch Schlagbohrungen ersetzt werden (z.B. Vorauserkundung in der LVC).

Die beiden Erkundungskonzepte beim Vortrieb im «Subparallelismus» und in der LVC mit schrägen Kernbohrungen wurden nach den ersten Erfahrungen beim Vortrieb angepasst, indem zu Beginn dieser Risikozone Kernbohrungen schräg zur Vortriebsrichtung (rechtwinklig zur Schieferung) mit Schlagbohrungen in Vortriebsrichtung kombiniert wurden. Die nachfolgenden Kernbohrungen fanden jeweils in Vortriebsrichtung statt. Destruktive Schlagbohrungen schräg zur Vortriebsrichtung standen ergänzend zur Verfügung (Fig. 9-5 und Fig. 9-6).

Um die Prognose im «Subparallelismus» räumlich auszuweiten, wurden zusätzlich zu den systematischen Schlagbohrungen Schlag- und Kernbohrungen schräg zur Vortriebsrichtung angeordnet. Diese Vorgehensweise ermöglichte, die ungünstig zur Vortriebsachse parallel verlaufenden Strukturen (d.h. Schieferung und Störungszonen) möglichst rechtwinklig zu durchbohren. Das Ziel der Kernbohrungen im «Subparallelismus» war, die lithologischen Kontakte, insbesondere die Formation der Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone (HB 20), zu erkunden, und gleichzeitig die Lage, Mächtigkeit und den Zerscherungsgrad der prognostizierte Störungszonen 17.1, 15B.1 zu identifizieren (Fig. 9-5).

Das angepasste Vorauserkundungskonzept für die Durchörterung der Val-Colla-Linie basiert auf demselben Prinzip wie das Konzept im «Subparallelismus» mit Kernbohrungen schräg zur Vortriebsrichtung und destruktiven Schlagbohrungen in Vortriebsrichtung (Fig. 9-6).

Die Kernbohrungen im CBT wurden durch den Subunternehmer Stump-BTE AG gemäss Vorauserkundungskonzept und den Vorgaben der öBL realisiert.

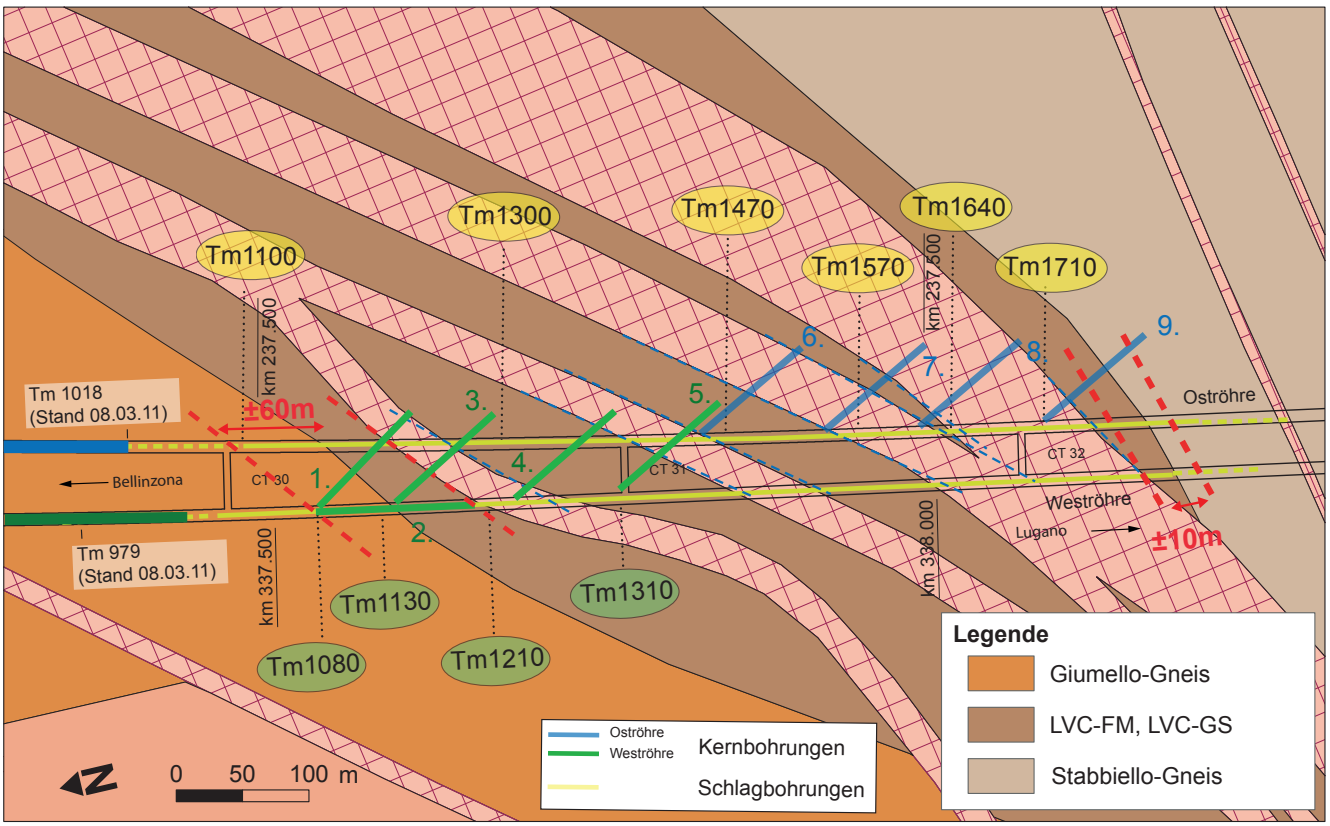


Fig. 9-6: Der Horizontalschnitt mit der geologischen Prognose der Val-Colla-Linie veranschaulicht das angepasstem Vorauserkundungskonzept mit Schlag- und Kernbohrungen.

Der Unternehmer führte die Vorauserkundungen mittels destruktiver Schlagbohrungen gemäss Anordnung der öBL durch und erfasste die erforderlichen Daten, welche der öBL zur Interpretation dienten. Die Länge der systematischen Schlagbohrungen war vom Unternehmer gemäss seinem Bauablauf festzulegen. Der Bohrdurchmesser betrug mindestens 76 mm (NQ).

Der baubegleitende Geologe vor Ort wertete die Vorausbohrungen aus und interpretierte sie. Bei der Durchführung einer Vorauserkundung erfolgte durch den Geologen ein Vergleich mit der geologischen Prognose sowie eine Beurteilung und Auswertung des Gebirges hinsichtlich bautechnischer Relevanz.

9.2.2 Ausgeführte Schlagbohrungen

Ausserhalb der Streckenabschnitte mit Kernbohrungen in Vortriebsrichtung wurden gemäss Konzept systematisch destruktive Schlagbohrungen durchgeführt. In besonderen Fällen ordnete die öBL schräge oder radiale Schlagbohrungen an.

Die Bohrungen hatten einen Anpressdruck zwischen 35 und 65 bar und einen Schlagdruck zwischen 100 und 140 bar. Die Datenerfassung der Bohrparameter erfolgte je nach Bohrung mit Abständen von 0,05 bis 0,15 m mit entsprechender Auflösung von 0,1 bis 0,3 m (in Analogie zum Nyquist-Shannon-Abtasttheorem). Mit der Erfahrung der ersten Schlagbohrungen wurde der Bohrkopf mit einem Durchmesser 76 mm, wie vertraglich vorgeschrieben, durch einem kleineren mit Durchmesser 64 mm ausgetauscht. Die Versuche zeigten, dass ein kleinerer Bohrkopf besser zur technischen Leistung des Vortriebsbohrjumbos passte, um möglichst lange und gerade Bohrungen bis 60 m Länge zu realisieren.

In intaktem Gestein erzielten die Bohrungen Geschwindigkeiten von 0,8 m/min und in gestörtem Gestein (Kakirite) bis zu mehr als 2,0 m/min mit Anpressdruck von 40 bar, Schlagdruck von 140 bar und Bohrkopfdurchmesser von 64 mm.

Eine simple Lösung, Zeit und Kosten zu sparen, war die Vorauserkundungen in den Störungszonen 11.1 und 12Abis.1, für die anstelle von Kernbohrungen doppelt geführten Schlagbohrungen zum Einsatz kamen. Auf diese Weise konnte das Prognoserisiko genügend klein gehalten werden (Fig. 9-7).

Im Durchschnitt waren die Vorausbohrungen ca. 50 m lang. Um genügend Vorlaufzeit für die geologische Prognose zu haben, wurde eine Bohrlänge von 60 m angestrebt. Insgesamt wurde mit 687 Schlagbohrungen eine Strecke von 31,413 km erbohrt.

Aufgrund des hydrogeologischen Befundes mit geringen Wasserzutritten kam kein Bohrpreventer zum Einsatz.

9.2.3 Ausgeführte Kernbohrungen

Alle 12 Kernbohrungen wurden beim Vortrieb im Baulos Sigirino ausgeführt (Tab. 9-9).

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse der ausgeführten Kernbohrungen in der Reihenfolge von Norden nach Süden grob zusammengefasst.

Die Kernbohrung GbC-NO-ZD12A-01 hatte als Ziel, die Störungszone 12A.1 zu erkunden. Diese Störungszone bildet das Val Mara und zugleich die Grenze zwischen nördlicher und mittlerer Ceneri-Zone. Insgesamt 19 geomechanische Laborversuche sowie sieben Dünnschliffuntersuchungen wurden durchgeführt. Zugleich diente diese Vorausbohrung zur Einschätzung der Gefährdungsbilder und der Festlegung der entsprechenden Ausbruchsicherung.

Die in der mittleren Ceneri-Zone angeordnete Kernbohrungen waren Bestandteil des Vorauserkundungskonzeptes im «Subparallelismus». Aufgrund der Ergebnisse der ersten Kernbohrung GbC-NO-SPS-01 fand das Vorauserkundungskonzept mit einer Kernbohrung schräg zur Vortriebsrichtung nur in der Anfangsphase Verwendung. Wegen der petrographischen Heterogenität wurden die drei weiter nördlich liegenden Kernbohrungen alle in Vortriebsrichtung gebohrt. Die Kernbohrung GbC-NO-SPS-01, wel-

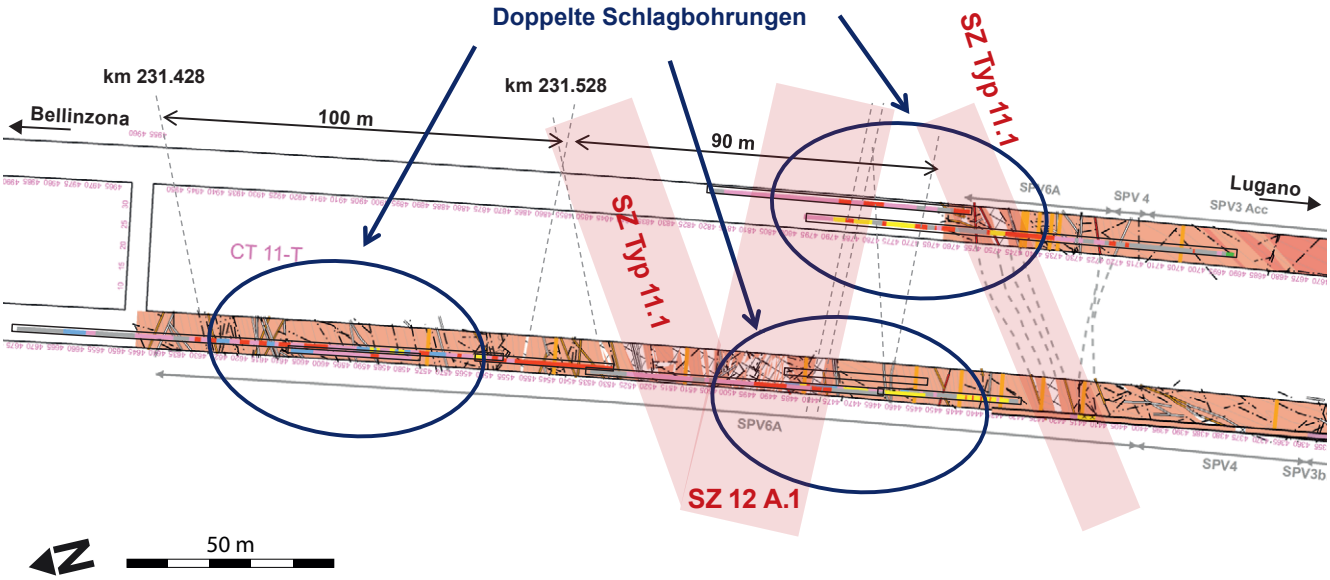


Fig. 9-7: Der Horizontalschnitt mit geologischem Befund veranschaulicht die angetroffenen Störungszonen im Val Mara (HB 12A). Dabei wird das Konzept der doppelt geführten destruktiven Schlagbohrungen zur Erkundung von Störungszonen veranschaulicht.

che in Richtung NNW orientiert war, durchbohrte die geologischen Formationen PGC und B-UBC. Die Kernbohrung GbC-NO-SPS-02 erkundete die Grenzen der Homogenbereiche 16A, 16B und 20 mit Ceneri-Paragneis, Ceneri-Orthogneis sowie Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone. Die Nordgrenze der Störungszone 15B.1 wurde mit den Kernbohrungen GbC-NO-SPS-03 und GbC-NO-SPS-04 erfasst. Diese beiden Bohrungen durchbohrten hauptsächlich stark tektonisierten Fels aber auch intakten Ceneri-Paragneis und wenig Hornfels. Weil der Homogenbereich 13C 323 m weiter nördlich als prognostiziert lag, wurde mit der Kernbohrung GbC-NO-SPS-04 dessen Grenze nicht erreicht. Die Bohrkerne im «Subparallelismus» erlaubten zahlreiche Laborversuche, darunter geomechanische Versuche, petrographische Dünnschliffuntersuchungen und Röntgendiffraktometrie (XRD), welche wertvolle Ergebnisse für die Beurteilung des Gebirgsverhaltens sowie der aktualisierten Prognose lieferten.

Tab. 9-9: *Ausgeführte Kernbohrungen beim Vortrieb des CBT geordnet nach Kilometrierung.*

Kernbohrung	Bohrloch-ansatzpunkt	Orientierung in Bezug zur Tunnelachse	Länge
	[km]	[-]	[m]
GbC-SE-LVC-01	237.477	schräg	187,7
GbC-SE-LVC-02	237.504	parallel	181,0
GbC-SE-LVC-03	237.686	parallel	350,3
GbC-SE-LVC-04	238.044	parallel	227,0
GbC-SE-01	238.615	parallel	252,1
GbC-Sarè-SE-01	240.474	parallel	233,9
GbC-NO-ZD12A1-01	331.817	parallel	200,0
GbC-NO-SPS-04	333.221	parallel	297,1
GbC-NO-SPS-03	333.267	parallel	43,0
GbC-NO-SPS-02	334.134	parallel	349,5
GbC-NO-SPS-01	335.159	schräg	253,0
GbC-Sarè-SO-01	340.320	parallel	345,0

Im Südvortrieb des Bauloses Sigirino wurden drei Streckenabschnitte mittels Kernbohrungen erkundet: die Val-Colla-Linie, die Basite und Semibasite der Val-Colla-Zone und das Verzweigungsbauwerk Sarè.

Ab der Nordgrenze der Val-Colla-Linie wurde das Vorauserkundungskonzept LVC angewendet. Die erste Kernbohrung GbC-SE-LVC-01 fand bei km 237.477 kurz vor dem Niederbruch am 03.05.2011 in der Oströhre statt (s. weitere Details in Kap. 10.3.8). Diese Erkundungsbohrung war in Richtung SE orientiert und zeigte wichtige Erkenntnisse über die Lage und Beschaffenheit der vorausliegenden Störungen des Homogenbereichs 30A (Fig. 9-9a). Das Institut für Geotechnik der ETH Zürich führte unter anderem an Gesteinsproben dieser Kernbohrungen mehrstu-

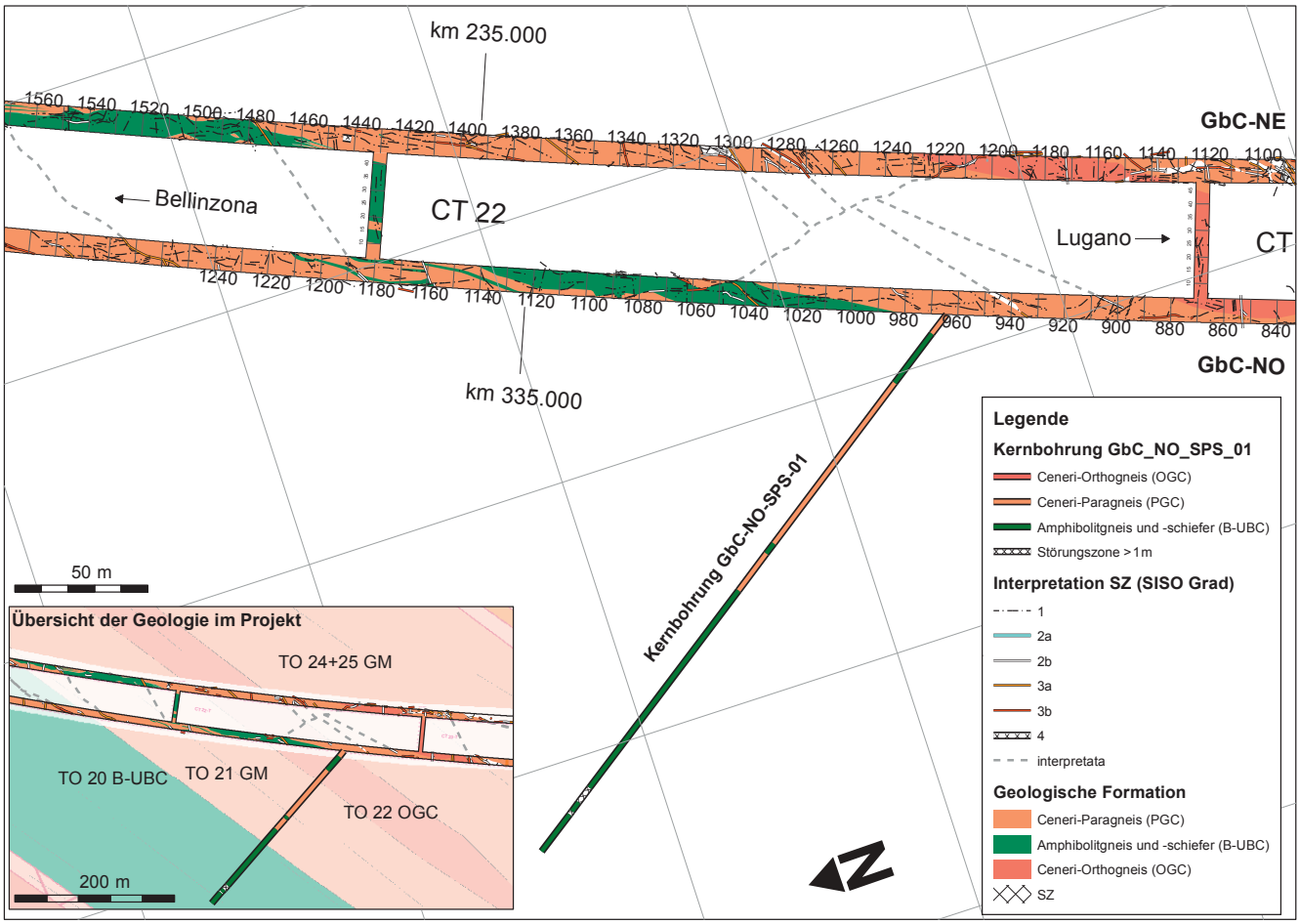
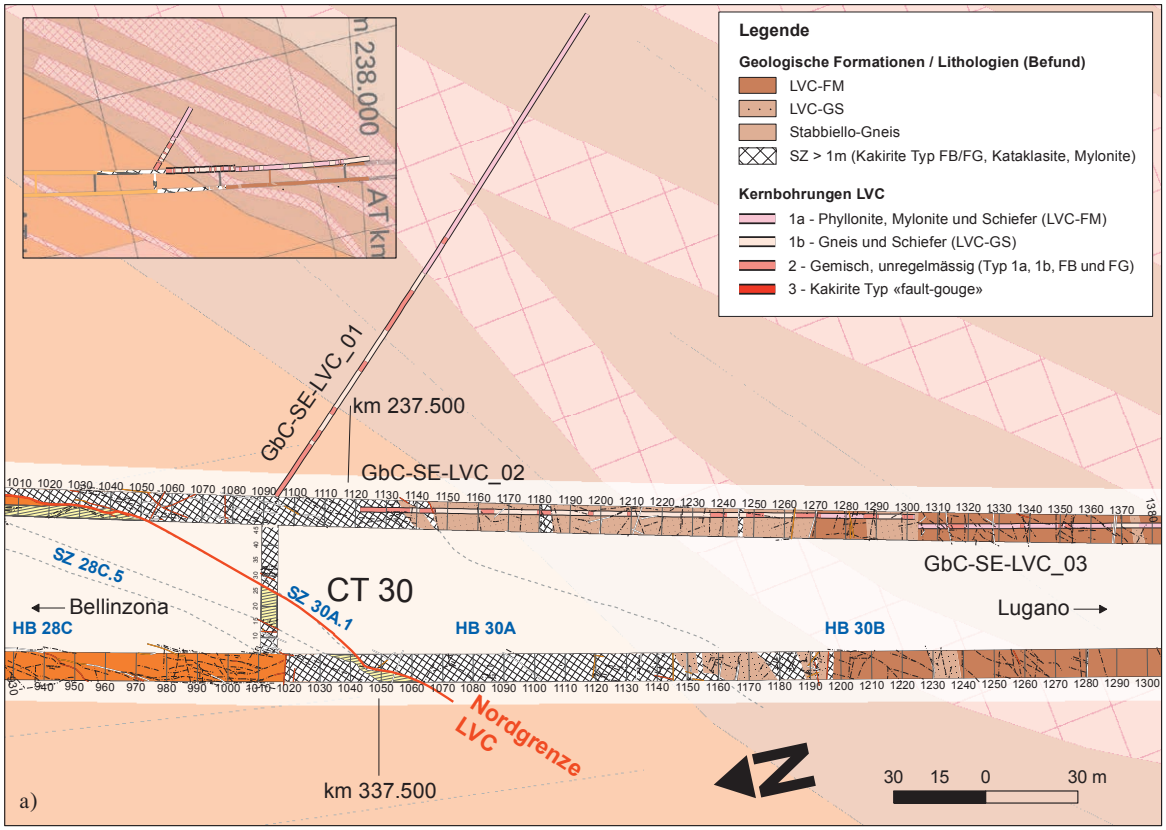


Fig. 9-8: Erste schräg ausgeführte Kernbohrung GbC-NO-SPS-01 zur Erkundung des «Subparallelismus».



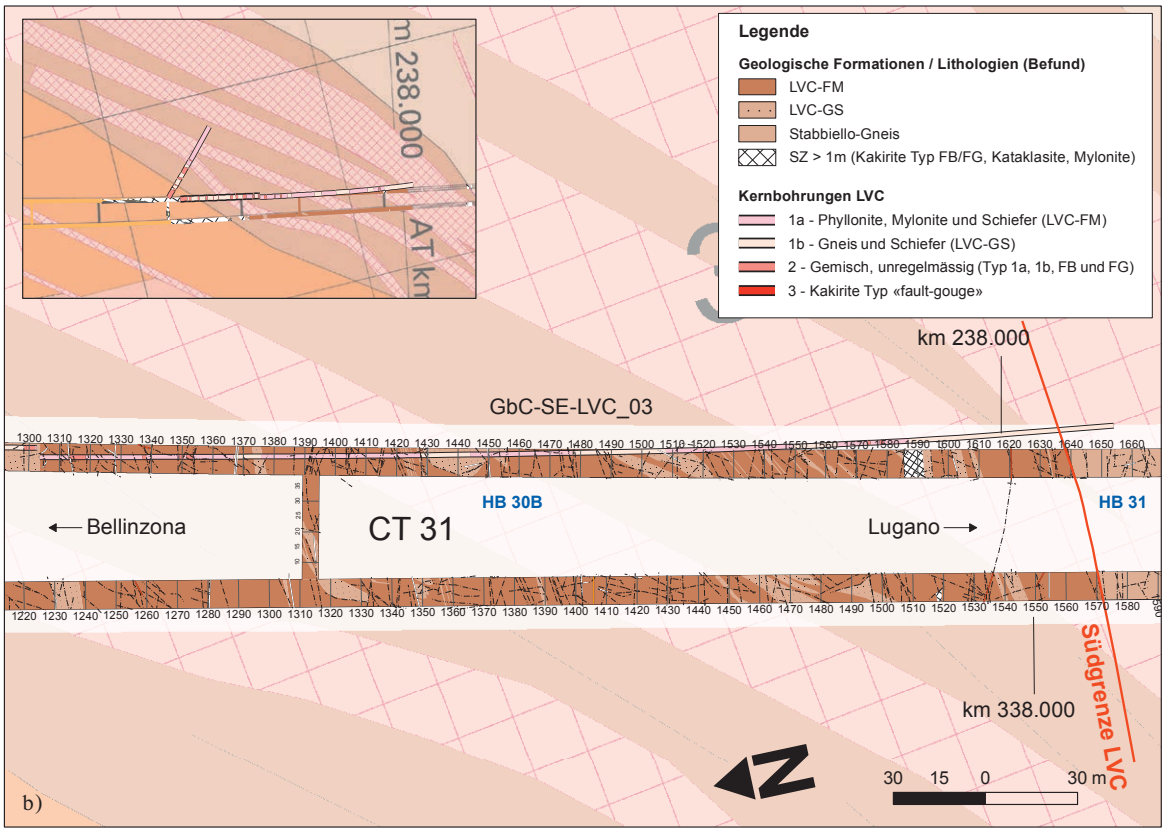


Fig. 9-9: Der Horizontalschnitt mit der geologischen Prognose im Hintergrund und dem geologischen Befund der Val-Colla-Linie (HB 30A und HB 30B) zeigt die ausgeführten Kernbohrungen. a) Mit den Kernbohrungen GbC-SE-LVC-01 und GbC-SE-LVC-02 konnte die Mächtigkeit der Störungszone im Homogenbereich 30A festgelegt werden. b) Die Kernbohrung GbC-SE-LVC-03 gab für die Erkundung der Südgrenze der LVC keine eindeutigen Ergebnisse.

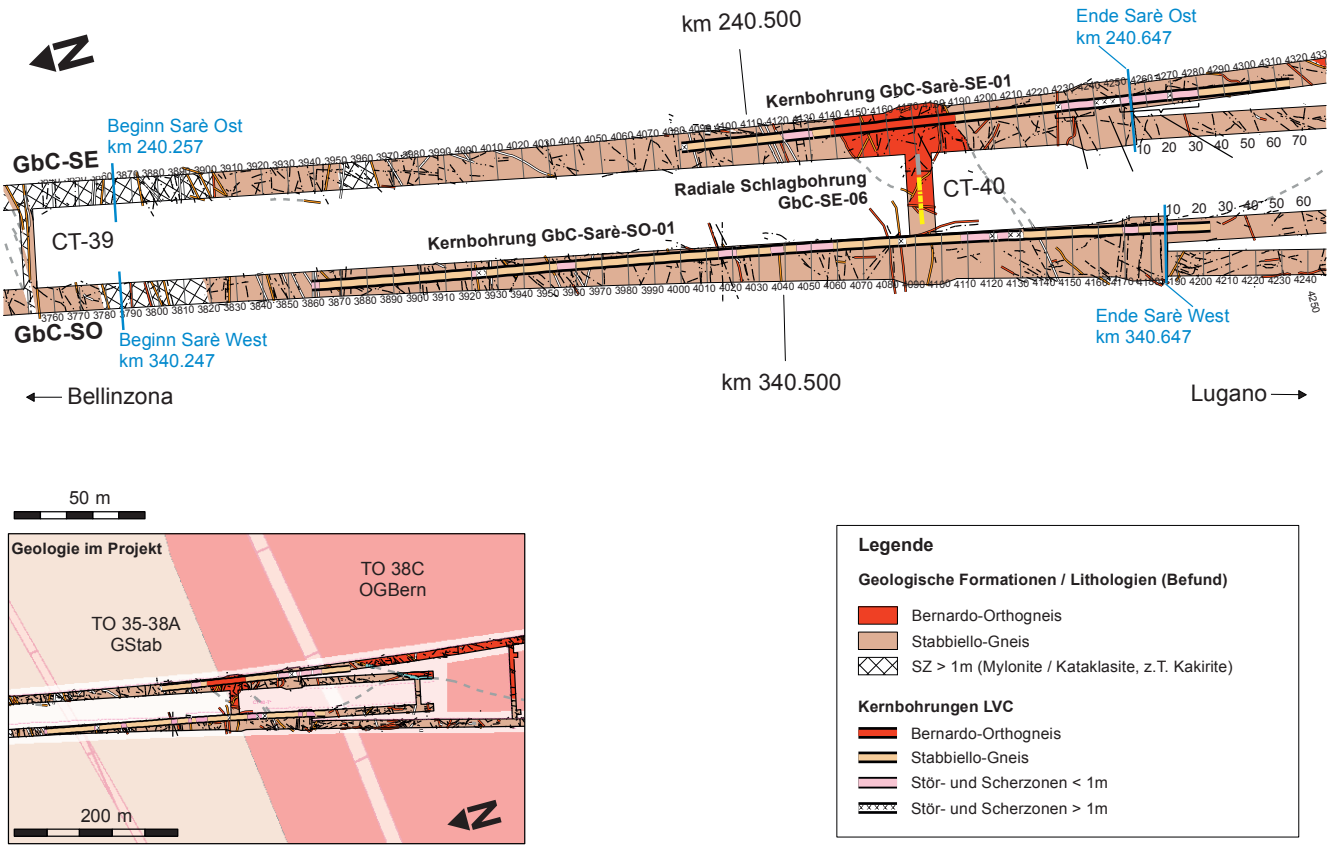


Fig. 9-10: Situationsplan der Kernbohrungen GbC-Sarè-SO-01 (km 340.312) und GbC-Sarè-SE-01 (km 240.474) mit geologischem Befund und zusätzlicher Schlagbohrung im Querschlag 40.

fige Triaxialversuche unter drainierten Bedingungen durch (Tab. 9-7, Anh. 13-u). Der strukturgeologische und petrographische Übergang zum Homogenbereich 30B liess sich mit der zweiten Kernbohrung GbC-SE-LVC-02, welche in Vortriebsrichtung lag, bei km 237.530 festlegen (Kap. 3.1.3, Fig. 9-9 a). Die Bohrkerne ermöglichten, den graduellen Übergang zwischen gestörtem Gestein des Homogenbereichs 30A (hauptsächlich Lithotyp 2 abwechselnd mit wenig Lithotyp 3) und ungestörtem Fels des Homogenbereichs 30B mit Lithotyp 1b zu erkennen. Die Kernbohrproben dieser Kernbohrung wurden benutzt, um einaxiale Druck- und Punktlastversuche durchzuführen. Mit der GbC-SE-LVC-03 wurde das Ende der Val-Colla-Linie und der entsprechende Übergang vom Homogenbereich 30B in den Homogenbereich 31 (Fig. 9-9 b) erkundet. Weil der Übergang einerseits nach Norden verschoben war und die Gneise und Schiefer der Val-Colla-Linie ähnliche Eigenschaften wie die Glimmerschiefer der Stabbiello-Gneis-Formation haben, folgte zur Verifizierung die letzte Kernbohrung GbC-SE-LVC-04. Diese Kernbohrung führte ebenfalls zu keinem eindeutigen Ergebnis. Sie war aber entscheidend, weil gegenüber der vorherigen in den Bohrkernen petrographische und strukturelle Anzeichen feststellt wurden, die ähnlich wie die Tesserete-Grona-Linie ausgerichtet waren. Die Südgrenze der Val-Colla-Linie wurde erst rückwirkend nach der Durchörterung aufgrund der folgenden im Projekt bestimmten Kriterien bestätigt.

Beim Vortrieb wurde eine Rotation der Schieferung von 310–350/40–70 im südlichen Teil des Homogenbereichs 30B nach 340–040/50–80 in nördlichen Teil des Homogenbereichs 31 (Kontakt Val-Colla-Linie – Val-Colla-Zone) beobachtet.

Die Strukturen mit Scher- und Störungszonen, die steil nach Norden einfallen (350–005/70–85), sind auf das Verformungsregime der Tesserete-Grona-Linie zurückzuführen und liegen ausserhalb der Val-Colla-Linie.

Die Abnahme von Phyllonit und Mylonit (Lithotyp 1a) zugunsten von Quarz führendem Gneis und Glimmerschiefer der Stabbiello-Gneis-Formation liess die Grenze petrographisch einschätzen. Hingegen können Phyllonit und Mylonit ebenfalls in der Stabbiello-Gneis-Formation auftreten, weshalb dieses Kriterium nicht ausschlaggebend war.

Die Durchführung der Kernbohrung GbC-SE-01 war vorrangig von petrographischem Interesse und zur Prognose von Asbest in den basischen Gesteinen der Val-Colla-Zone vorgesehen. Die petrographischen Untersuchungen der Kernbohrproben haben keine Minerale, die zu Asbest zählen, festgestellt. Das Thema Asbest und die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Kapitel 6.2 ausführlich dargestellt. Zudem bestand die Gelegenheit, anhand von ausgewählten Borkernen Laborversuche durchzuführen, um die Felskennwerte zu prüfen und mit der Prognose zu vergleichen.

Die letzten Vorauserkundungsmassnahmen mit Kernbohrungen in Richtung Süden fanden im Laufe der Ausbruchsarbeiten des Verzweigungsbauwerks Sarè statt. Figur 9-10 zeigt die Lage der beiden ausgeführten Erkundungsbohrungen.

Wegen der prognostizierten Komplexität im Bereich der

Tab. 9-10: *Beschreibung des angepassten geotechnischen Prognosemodells für den Vortrieb im Verzweigungsbauwerk Sarè.*

Abschnitt	Beschreibung
Am1	Mehrheitlich intakter Fels, keine bis sehr geringe Instabilität des Felsen. Kleinsteinfall und Ablösungen mit geringen Volumen als Hauptgefährdungsbild, sehr geringfügige Verformung (<1 cm)
Am2	Ähnliche Beschaffenheit und Gefährdungsbilder wie der Am1. Kluftkörper im Gewölbe nehmen parallel zum Ausbruchquerschnitt zu. Die Ortsbrustinstabilität und die Verformung sind gering (<1 cm).
F1	Steil stehende (50–90°) kataklastische Störungszonen mit variablem Anteil an Kakirit oder verfächerte Störungen oder Schmierlassen schräg oder parallel zum Vortrieb streichend. Bergaus- oder einwärts fallende Störungen führen zu Ortsbrustinstabilität mit Ausbrechen oder Abgleiten von Gestein. Mittlere bis hohe Wahrscheinlichkeit von Kluftkörpern und Ablösungen in der Kalotte. Geringe Verformung (<2 cm).
F2	Flach einfallende (0–40°) kataklastische Störungszonen oder verfächerte Störungen mit variablem Anteil an Kakirit schräg oder parallel zur Ortsbrust streichend. Ablösungen und Kluftkörper im Bereich der Kämpfer sind mit mittlerer bis hohe Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Lokale Ortsbrustinstabilität durch Ausbrechen von kohäsionslosem Material. Verformungen <3 cm.

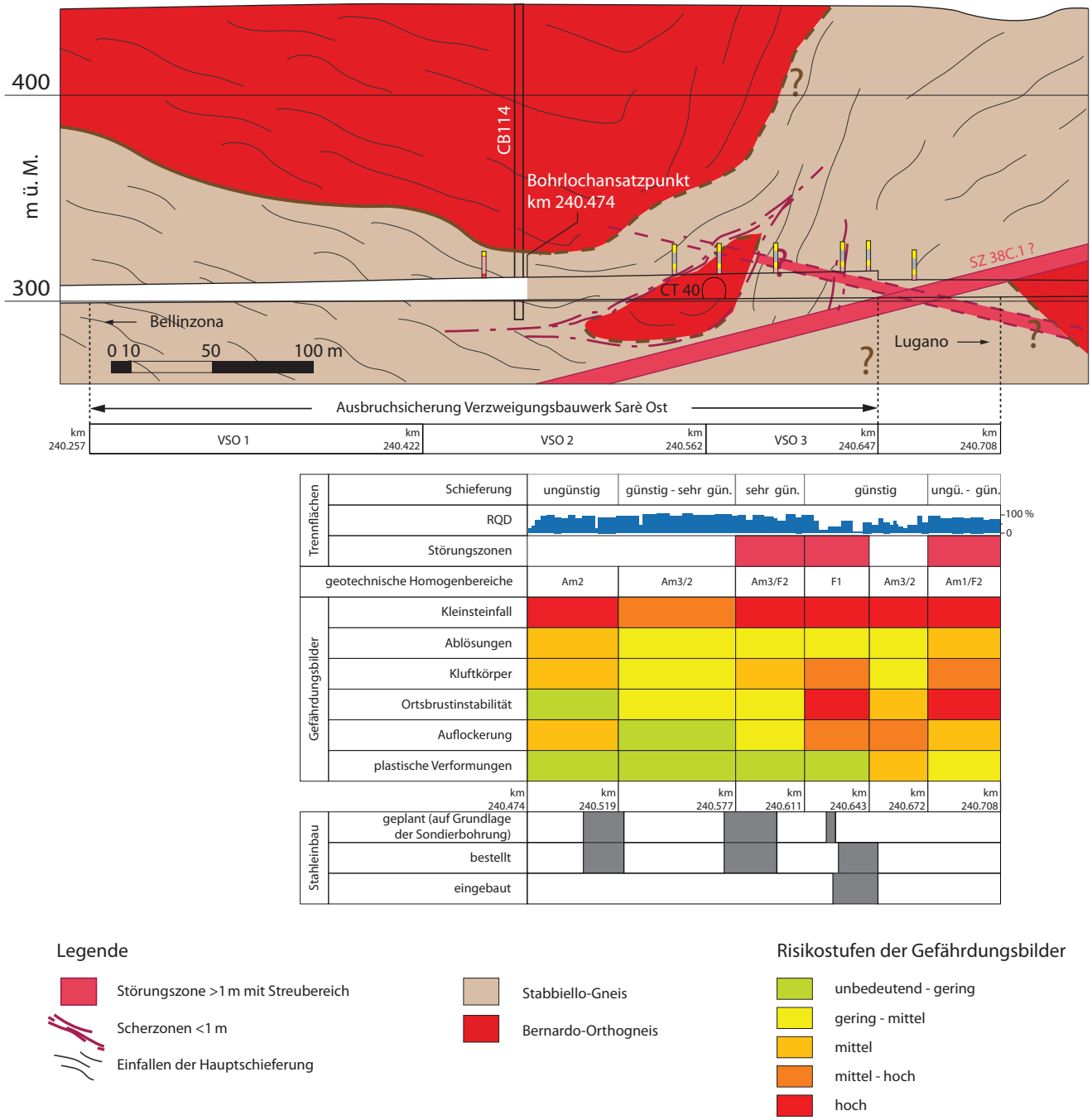


Fig. 9-11: Angepasstes Prognosemodell für das Verzweigungsbauwerk Sarè West mit den Erkenntnissen nach der Kernbohrung GbC-Sarè-SO-01.

Stirnwand, gegeben durch die Störungszone 38C.1 und den Übergang Stabbiello-Gneis/Bernardo-Orthogneis sowie die zunehmenden geotechnischen Schwierigkeiten beim Vortrieb in der Westkaverne, wurden zwei Kernbohrungen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden zur frühzeitigen Planung und Festlegung von Gitterbogenstrecken in Abhängigkeit der Störungszonen verwendet. Mit zunehmendem Kavernendurchmesser erfolgten Einzelproduktionen der Gitterbögen auf vorzeitige Bestellung.

Die Kernbohrung GbC-Sarè-SO-01 durchörterte ausschliesslich Lithotypen der Stabbiello-Gneis-Formation innerhalb des Homogenbereichs 35-38A. Es konnten vier kataklastisch-kakiritische Störungen mit einer Mächtigkeit von 3–6 m und weitere Streckenabschnitte von 2–14 m Länge mit intensiv durchtrenntem Felsen ausgeschieden werden.

In der Oströhre verlief die Kernbohrung GbC-Sarè-SE-01 zum grössten Teil im Stabbiello-Gneis. Sie durchbohrte einen 50 m mächtigen Bernardo-Orthogneiskörper auf der Höhe des Querschlags 40. Ähnlich wie bei der Weströhre, traf die Bohrung auf verschiedene Abschnitte mit ungünstigen Felsverhältnissen.

Insgesamt 34 geomechanische Laborversuche und zwei Dünnschliffanalysen zeigen die Gesteinsbeschaffenheit und bestätigen die Komplexität des Felses in den beiden Kavernen.

Die Kernbohrungen dienten dazu, die Sicherungsmittel sowie die Gefährdungsbilder für die geänderte Prognose im Verzweigungsbauwerk Sarè zu bestimmen (Fig. 9-11, 9-12).

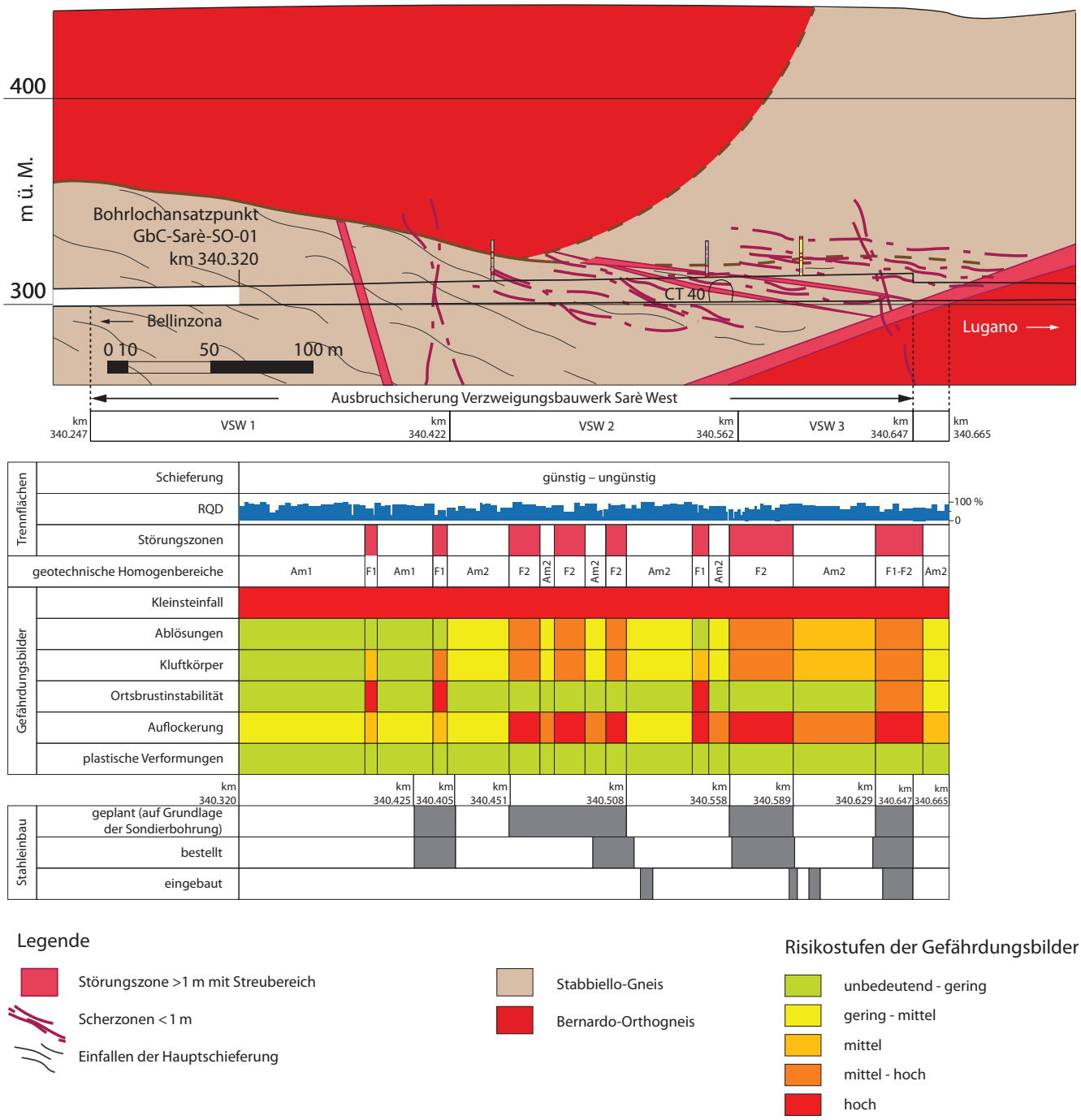


Fig. 9-12: Angepasstes Prognosemodell für das Verzweigungsbauwerk Sarè Ost mit den Erkenntnissen nach der Kernbohrung GbC-Sarè-SE-01.

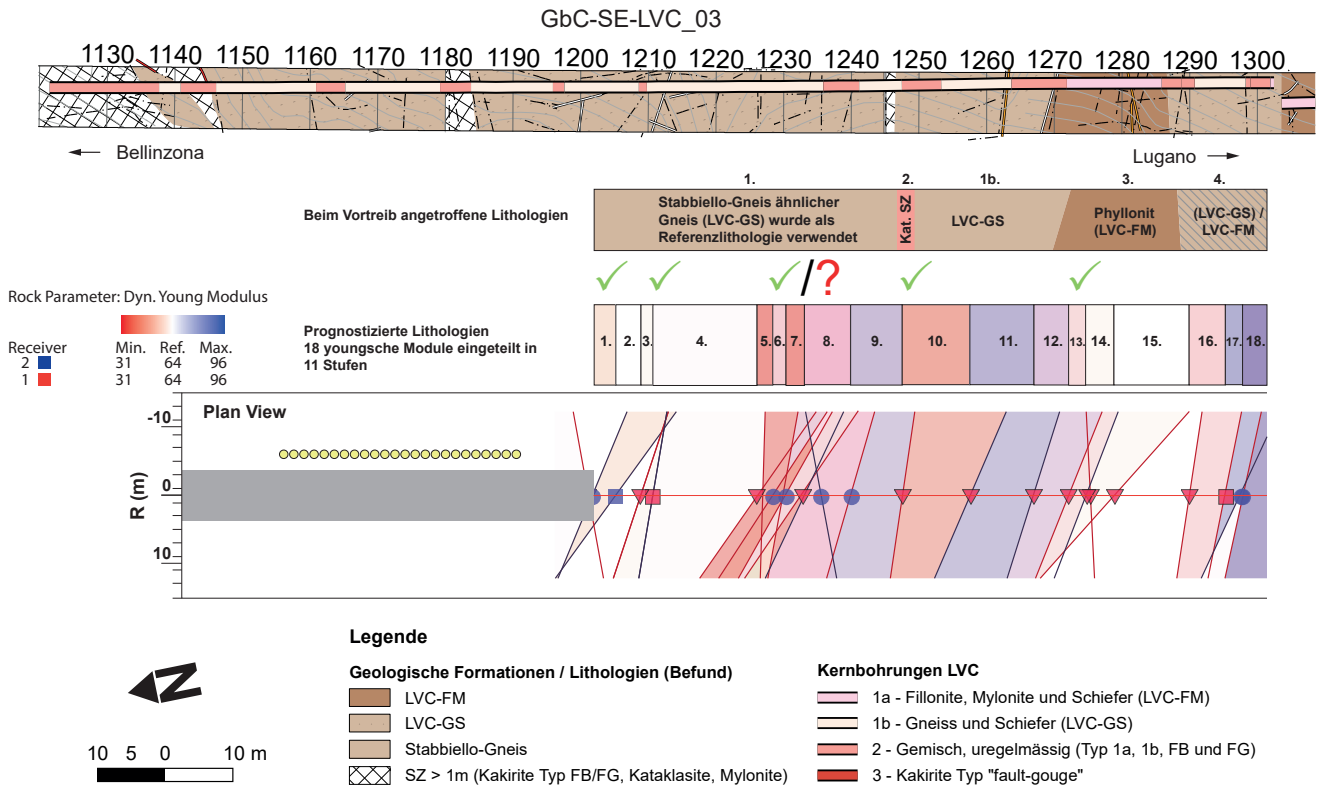


Fig. 9-13: Horizontalplan mit Gegenüberstellung der Kernbohrung GbC-SE-LVC-03, dem geologischen Befund beim Vortrieb und der seismischen Erkundung mit TSP im Streckenabschnitt Oströhre km 237.583–238.583 (Tm 1200–1300). Die vier angetroffenen Lithologien verteilen sich in 18 unterschiedliche E-Module.

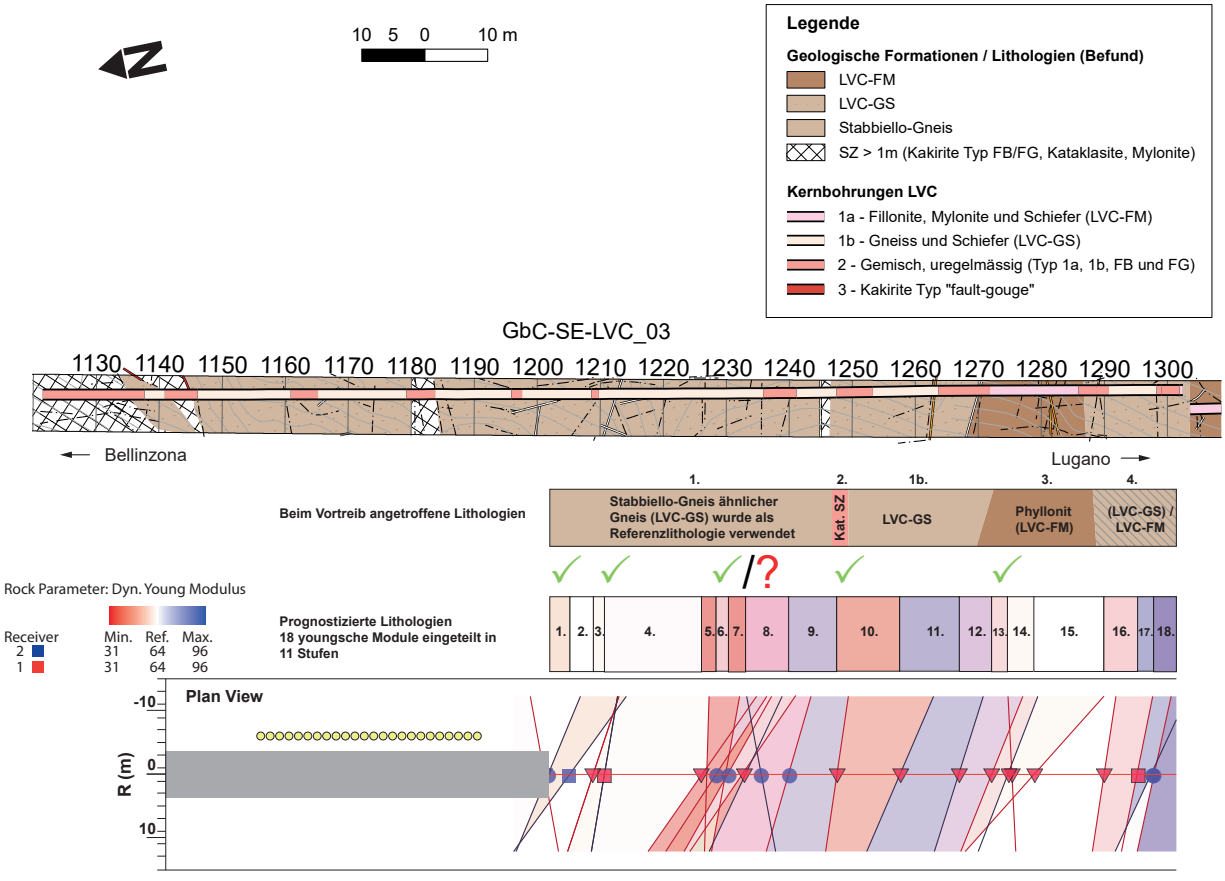


Fig. 9-14: Gegenüberstellung der Kernbohrung GbC-SE-LVC-03, dem geologischen Befund im Horizontalschnitt und der seismischen Erkundung mit TSP-Ergebnissen im Längenprofil für den Streckenabschnitt Oströhre km 237.583–238.583 (Tm 1200–1300). Rund die Hälfte aller angetroffenen Störungszonen waren mit der TSP-Erkundung in der Val-Colla-Linie nicht prognostizierbar.

Die beiden Figuren stellen das geotechnische Modell im Längenprofil der beiden Kavernen dar, welches auf der Einteilung von geotechnischen Homogenbereichen beruht. Als Grundlage für Anordnung von Gitterbögen dienten die Petrographie, Schieferung, RQD-Werte und die daraus resultierenden Gefährdungsbilder. Die geotechnischen Homogenbereiche sind in Tabelle 9-10 zusammengefasst.

Die Kernbohrung GbC-Sarè-SO-01 in der Weströhre war die erste und zugleich die längste der beiden Kernbohrungen. Die relevanten Erkenntnisse waren ein Umbiegen der Schieferung von einer subhorizontalen ungünstigen Orientierung in ein günstiges Südeinfallen (bis 20–40°) in den letzten 85 m der Bohrung der Westkaverne. Der RQD-Wert war allgemein variabel, stimmte aber gut mit den Störungen überein. Die Prognose für Kleinsteinfall war meistens hoch und systematisch und die Auflockerung vor allem in den Störungszonen hoch eingestuft worden. Die Gefahr von Kluftkörpern und Ablösungen lagen im Bereich zwischen gering bis mittel, Ortsbrustinstabilität und plastische Verformung galten als unbedeutende Gefährdungen für den Vortrieb.

Das angepasste Prognosemodell in der Kaverne Sarè Ost beschreibt sechs Streckenabschnitte mit unterschiedlichem geotechnischem Verhalten. Die Schieferung variierte von ungünstig bis sehr günstig. Der RQD-Wert war bei ungefähr 75% konstant in den ersten 145 m, sank aber in einer Bohrtiefe zwischen 145 und 200 m. Auch in der Ostkaverne hatte Kleinsteinfall hohe Relevanz. Umgekehrt zur Prognose und gegeben durch die Orientierung der Störungszonen, hatte die Westkaverne eine höhere Ortsbrustinstabilität. Kluftkörper, Ablösungen, Auflockerung und plastische Verformung wurden zwischen insignifikant und mittel eingestuft.

9.2.4 Durchgeführte Seismik

Das Vorauserkundungskonzept sah seismische Erkundungen für die Durchörterung von bautechnisch relevanten Störungszonen in der Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie vor. Der Unternehmer beauftragte Amberg Technologies AG, in der Val-Colla-Linie bei km 237.583 eine seismische Testerkundung mittels Tunnel Seismic Prediction (TSP) durchzuführen.

Die TSP als Vorauserkundung ist eine indirekte geophysikalische Methode, welche ermöglicht, die Grenzen zwischen Gesteinen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften zu lokalisieren. Darüber hinaus resultiert durch den Festigkeitswechsel im Fels eine qualitative Aussage zur Poissonzahl und zum E-Modul. Des Weiteren lässt sich in gewissen Fällen der Einfallswinkel von Störungszonen bestimmen. Zwei Geophone empfingen seismische P- und S-Wellen, welche durch 24 kleine Sprengungen erzeugt wurden. Die Sprenglöcher befanden sich im rechten Parament, während die Triaxzellen in den Empfängerbohrlöchern im gegenüberliegenden Parament einzementiert wurden. Diese Methode erlaubt eine Erkundung bis zu 100 m vor der Ortsbrust. Für die TSP müssen zwei Bedingungen erfüllen sein: 1. Grenzflächen müssen einen Einfallswinkel von mindestens 25° gegenüber den Wellen aufweisen, für eine optimale Erfassung sind 45° nötig. 2. Der Unterschied der Impedanz muss mindestens 20% zur benachbarten Grenzfläche betragen. Im Bereich der Val-Colla-Linie waren diese Bedingungen wegen der spitzwinkligen Streichrichtung der Strukturen und parallelen Schieferung nicht erfüllt. Auch wegen dem geringen Unterschied der Impedanz sowie den zahlreichen schmalen Störungen und Scherzonen (<0,2 m) war das TSP-System nicht in der Lage, die jeweiligen Grenzflächen richtig zu erkennen. Aufgrund dieser Erfahrung hat die öBL entschieden, keine weiteren seismischen Erkundungen durchzuführen. Ein Vergleich zwischen Prognose und Befund zeigt, dass mit der TSP-Erkundung aufgrund der fehlenden Voraussetzungen rund 50% der Störungen in der Val-Colla-Linie nicht prognostizierbar gewesen wären (Fig. 9-13 und Fig. 9-14).

9.3 Auswirkung der Gebirgsüberlagerung

Bergschlagähnliche Erscheinungen bis Entspannungsschläge traten hauptsächlich in den Lithologien des Ceneri-Orthogneises und des Ceneri-Paragneises auf, ab einer minimalen Gebirgsüberlagerung von 500 m (s. Kap. 10.2.3). In den Streckenabschnitten mit der grössten Gebirgsüberlagerung, in denen die beiden oben erwähnten Lithologien auftraten, wurden überaschenderweise keine Entspannungsschläge festgestellt. Deswegen konnte nicht allgemein eine proportionale Beziehung zwischen spannungsbedingten Erscheinungen und Gebirgsüberlagerung festgestellt werden. Daraus resultiert, dass sich die Gebirgsspannungen zum Teil über das Trennflächengefüge der Gneise und Schiefer abbauen liessen.

Mit Ausnahme von einigen Streckenabschnitten, in denen die Verformungsmessungen auf die höhere Gebirgsüberlagerung zurückgeführt werden konnten (z.B. HB 15Bbis), war allgemein bei den radialen Verformungen im Tunnel keine eindeutige Systematik im Vergleich zur Gebirgsüberlagerung zu erkennen, da die Petrographie und das Trennflächengefüge zu heterogen waren.

9.4 Geotechnische Relevanz der Störungen

Geotechnisch relevant und damit bautechnisch schwierig erwiesen sich die sprödverformten, kataklastischen Störungszonen aus einem Gemisch mit Kataklasit und Kakirit. Oft entwickelten sich diese Störungszonen entlang früher entstandener, duktil verformter Vorgängerstrukturen (Scher- und Mylonitzonen) und überprägten diese sprödartig. Innerhalb der Störungszone war das zerscherte Material erwartungsgemäss sehr heterogen verteilt. Neben Kakirit- und Kataklasitlagen variabler Mächtigkeit traten Lagen und Bereiche von nicht bis sehr wenig kataklastisch erfasstem, bis zu stark zerlegtem Nebengestein auf (Fig. 9-15). Sofern sie nicht spröd überprägt waren, verhielten sich die Mylonitzonen hingegen als geotechnisch wenig bis kaum relevant, da sich ihre Gesteinseigenschaften nur wenig vom angrenzenden, ungestörten Gestein unterscheiden.

Im Allgemeinen konnte ein Zusammenhang zwischen Mächtigkeit, Länge, Kakiritanteil sowie Orientierung der Störungszonen und deren geotechnischer Relevanz festge-

stellt werden. Dabei kam die fehlende bis sehr bescheidene Wasserführung dem Vortrieb in den Störungszonen entgegen. Wasser hätte voraussichtlich die Schwierigkeiten bei der Durchörterung stark vergrössert.

Im «Subparallelismus» beanspruchte die Bewältigung der intensiv tektonisierten Zone (ITZ, Kap. 11.4.3) insgesamt acht Monate (Weströhre) bzw. fast zehn Monate (Oströhre) und verursachte einen Rückstand von rund 150 Arbeitstagen. Der Vortrieb erfolgte grösstenteils mittels Hydraulikhammer, und die Ortsbrust wurde streckenweise in Teilen ausgebrochen, weshalb pro Vortriebsröhre eine bescheidene durchschnittliche Tagesproduktion von 2 m/AT resultierte. Die Prognose ging für die Durchörterung der SZ 15B.1 von einer Tagesleistung pro Röhre von 1,5 m/AT und für den übrigen Bereich ausserhalb der Störungszone von 7 m/AT aus. Der Vortrieb der ITZ erforderte massive Ausbruchsicherungen, insbesondere Sicherungsprofile mit Stahlbögen sowie Bewehrungsnetze, Spritzbeton und zusätzliche Anker. Dabei konnte der modifizierte Ausbruchsicherungstyp SPV 6A besser an die sich rasch ändernden sehr heterogenen und komplexen geologisch-geotechnischen Felsverhältnisse angepasst werden, indem der Sohlschluss hinter der Ortsbrust von 50 m (ST-SPV 6) auf 15 m verkürzt wurde und wegen des etwas grösseren Ausbruchquerschnitts (+5 cm in der Kalotte, +20 cm im Paramentfuss) bei asymmetrischer Verformung eine bessere Wirkung erzielte. Dieser Ausbruchsicherungstyp deckte 73 % der Gesamtlänge der ITZ ab. Dennoch mussten die schwersten Ausbruchsicherungstypen im anspruchsvollsten, nördlichsten Abschnitt der ITZ im Bereich der prognostizierten SZ 15B.1 eingesetzt werden (St-SPV9 und 10, mit Schlitzen im Spritzbeton und Ortsbrustankerung).

Das Gebirgsverhalten entlang der ITZ widerspiegelte die sehr hohe Variabilität und Versatilität in den Baugrundverhältnissen. Da die Vortriebe in den beiden Röhren gleichauf liefen, war eine gegenseitige Beeinflussung in den Verformungen schwer festzustellen. Die wesentlichen angetroffenen Ereignisse («Gefährdungsbilder» im Befund) waren Kluftkörper, Mehrausbrüche in der Ortsbrust, Herausgleiten von Gesteinspaketen an der Ortsbrust sowie Ablösungen im Profil vorwiegend im östlichen Parament, ein Niederbruch von 150 m^3 Gesteinsvolumen und systematischer Kleinsteinfall. Die Ergebnisse der Extensometermessungen bestätigten, dass zudem insbesondere in den Störungsbereichen vermehrt Auflockerung auftrat und einen Einfluss auf die Ortsbruststabilität hatte. Anhand der radialen Verformungsmessungen und dem Auflockerungsgrad im Gebirge konnten in den kakiritischen Störungsbereichen indirekt plastische Verformungen nachgewiesen werden.

Mittels 3D-Verformungsmessungen wurden örtlich in der ITZ Gesamtverschiebungen von bis zu 230 mm gemessen, dabei resultierte ein Verformungsmuster, welches aufgrund der Schieferung vermehrt Verformungen im unteren linken (westlichen) Parament und insbesondere im rechten (östlichen) oberen Parament und im Kämpferbereich aufwies. Laut Einschätzungen liegt der Betrag der Vorverformungen bei rund 30 %.

Eine weitere interessante Beobachtung zeigte das Verformungsmuster in den Rand- und Zwischenbereichen der Störungszonen, die z.T. aus intaktem aber intensiv durchtrenntem Fels ohne grossen Anteil an Kakirititen bestanden (Fig. 9-15). Diese «geschwächten Streckenabschnitte» wiesen häufig über 50–100 mm Verformung auf, so dass erst weiter ausserhalb der Störungszonen leichtere Ausbruchsicherungstypen eingebaut werden konnten.

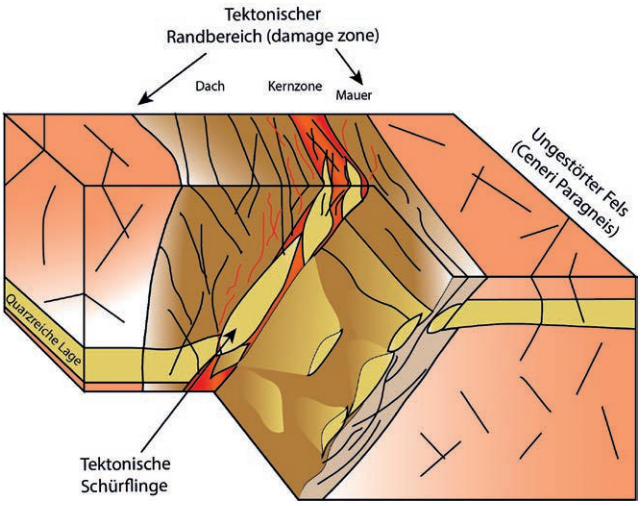


Fig. 9-15: Modell einer klassischen Störungszone der Ceneri-Zone. Modifiziert nach (Berg 2004) und (Fredmann 2007).

9.5 Verformungsmessungen

Das Überwachungskonzept im Projekt sah den Einbau von Messstationen mit einer Variablen Anzahl von optischen Messpunkten (Bireflex-Targets) und Extensometern mit folgenden Zielsetzungen vor:

- Überwachung der Stabilität des Hohlraums
- Erfassung der Verformungen des Querschnitts und Kontrolle der Einhaltung der Profilgeometrie
- Erhöhung der Sicherheit der Belegschaft
- Bewertung der Angemessenheit der eingesetzten Ausbruchsicherungstypen
- Vergleich der Verformungen mit der Projektierungsphase
- Bestimmung des Zeitpunkts des Innenausbaus

Die Verformungsmessungen enthielten im Tunnelquerschnitt bis zu sieben optische Messpunkte mit einem Bolzen, einer Sollbruchstelle (Adapter) und dem eigentlichen Bireflex-Target. Die Anzahl und Positionierung der jeweiligen Messpunkte erfolgte auf der Basis der Profilgeometrie und der Vortriebsmethode (Voll- oder Teilausbruch). Die optischen Messpunkte dienten der Messung der oberflächlichen Verformungen des Felsen. In eigenen wenigen Fällen wurden Stahlbögen mit Messpunkten ausgestattet, um dessen Verformung in den Störungszonen zu überwachen.

Die Extensometer bestanden aus Drei- oder Vierfachextensometer mit 8 m oder 16 m Länge. Die Ergebnisse aus den Extensometermessungen ermöglichten die Dimensionierung der Anker bzw., den Ankertyp und seine Länge zu optimieren.

Die Messintervalle in Tabelle 9-11 sind indikativ und wurden gemäss Überwachungskonzept an die angetroffenen geologischen und geotechnischen Bedingungen beim Vortrieb angepasst.

Tab. 9-11: *Vorgesehene Intervalle für die Verformungs- und Extensometermessungen gemäss Überwachungskonzept nach Ausbruchsicherungstyp.*

Ausbruch-sicherungstyp	Intervall Verformungsmessungen	Intervall Extensometer
SPV 1–4	60 m	–
SPV 5	30 m	–
SPV 6	30 m	60 m
SPV 7	20 m	40 m
SPV 8–9	15 m	30 m
SPV 10	10 m	20 m

Aus der Auswertung der geotechnischen Vermessungsdaten liessen sich drei Faktoren beobachten, die das Ausmass und den Verformungsmechanismen im Fels beeinflussten: die Orientierung der Hauptstrukturen (Schieferung und Störungszonen), die lokalen petrographischen und geotechnischen Felsverhältnisse und der Einfluss durch den Vortrieb selbst (Vortriebsmethode, Ausbruch des Sohlgewölbes mit Einbau des Ringschlusses).

Die lokale Beschaffenheit der Gesteine, vor allem der Granat führende Zweiglimmergneis und der Glimmerschiefer der Giumello-Gneis-Formation in der südlichen Ceneri-Zone, zusammen mit der Felsüberlagerung zwischen 400 und 700 m und einer zur Tunnelachse spitzwinklig oder parallel orientierten Streichrichtung der Schieferung, bewirkten ein empfindliches anisotropes Verformungsverhalten im Gebirge.

Im «Subparallelismus» traten im Vergleich zu den Bereichen, wo die Orientierung der Hauptstrukturen senkrecht oder quer zur Schieferung stand, viel höhere Verformungen auf. Ausserdem wurde eine anisotrope Verformung entlang des Tunnelprofils beobachtet, in denen die Setzungen und Querverschiebungen wesentlich höher ausfielen als die Längsverschiebung. Die Verformungen in der Sohle waren gesamthaft gesehen um einen Bruchteil kleiner als die Verformungen in der Kalotte.

Mit den Weg-Zeit-Diagrammen konnte indirekt anhand der Richtung der Verformungsvektoren die Umverteilung der Gebirgsspannungen nach der Sprengung beobachtet werden. Dabei fällt in einigen Verformungs-Zeit-Diagrammen erneute Umverteilung der Spannungen auf, die sich in Form von kleinen Peaks (Verformungsbeschleunigungen) während der Stabilisierungsphase widerspiegelten und in Verbindung mit den Vortriebsaktivitäten nahe an der jeweiligen Verformungsmessstelle standen (Kap. 9.5.6). Solche Aktivitäten waren z.B. dem Ausbruch des Sohlgewölbes für den Bogenschluss, dem Abtragen der Strosse oder der gegenseitigen Beeinflussung der gegenüberliegenden Tunnelröhre (Kap. 9.5.6) zuzuordnen.

Zur Überwachung von Langzeitverformungen wurden in der Val-Colla-Linie sowie im nördlichen Gebiet der Giumello-Gneis-Formation zusätzliche Messbolzen im Sohlgewölbe und in der Sohle eingebaut.

9.5.1 Verformungsmessungen

Der Unternehmer war für die Verformungsmessungen verantwortlich und erstellte mit jeder Messauswertung ein achsbezogenes Zeit-Weg-Verschiebungsdiagramm und ein querschnittbezogenes Vektordiagramm, die er nach jedem Messzyklus der öBL zustellte. Die Verschiebungskomponenten sind im dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem aufgeteilt in Setzungen, Querverschiebungen und Längsverschiebungen. Die Vektorsumme der drei Verschiebungskomponenten ergibt den 3D-Verschiebungsvektor des Messpunktes.

Die Messgenauigkeit der Bireflex-Targets betrug ± 2 mm. Zudem wurde ein nicht quantifizierbarer Positionierungsfehler berücksichtigt. Die Summe der Messungenauigkeiten machte sich in den Analysen, insbesondere bei geringen Verformungen, bemerkbar. In den Zeit-Weg-Verschiebungsdiagrammen sind diese Abweichungen z.T. auch als Schwankungen der Verschiebungswerte mit inkohärenten rückläufigen Verschiebungen ersichtlich (z.B. nach oben gerichteten Verschiebungen).

Die radialen Verschiebungswerte beider Tunnelröhren, welche den letzten Verformungsmessungen vor dem Einbau der Innenschale entsprechen, sind in Figur 9-16 und 9-17 zusammengefasst. Ergänzend dazu sind in den Figuren die maximalen vertraglich zugelassenen Verformungswerte für jeden Ausbruchsicherungstyp, die angetroffenen geologischen Formationen und die effektive Ausbruchsicherung dargestellt.

Der folgende Abschnitt fasst die Ergebnisse der Analysen und deren Interpretation zusammen.

Die Messdaten im Bereich des Nordportals Vigana weisen maximale Verformungen von 24 mm auf (mittlere Verformungen im Streubereich von 10–15 mm), was unter Berücksichtigung der Querschnittsflächen der Kavernen bis zu 232 m² sehr geringe Verformungen sind. Die höchsten Verformungen (Querverschiebungen) traten meist in der Kalotte auf und waren gegen Westen gerichtet. Derartige Verschiebungen waren auf Auflockerungen in Verbindung mit den Trennflächen zurückzuführen. Die geringen Verformungen sind auf die relativ guten felsmechanischen Eigenschaften des Gesteins und die geringe Gebirgsüberlagerung im Portalbereich zurückzuführen.

Beim nördlichen Vortrieb des Bauloses Sigirino bis zur Logistikkaverne CAOP fallen besonders die höheren Verformungen in der mittleren und südlichen Ceneri-Zone zwischen den Homogenbereichen 20 bis 27A auf. Der «Subparallelismus» bewirkte Verformungen, die meistens im östlichen Kämpferbereich und dem westlichen Paramentfuss am grössten waren und oft 50 mm übersteigen. Die ungleichmässigen Verformungen sind vor allem auf die Anisotropie des Gebirges infolge der Schieferung und auf die schleifende Vortriebsrichtung zurückzuführen. So hatten die Verformungen im Giumello-Gneis (Oströhre km 235.322–236.383 und Weströhre km 335.487–336.053) im östlichen Kämpferbereich und Firstgewölbe gefolgt vom westlichen Paramentfuss und Parament etwa fünf- bis zehnmal höhere Werte als die restlichen Messpunkte.

Der zweite markante Trend zeigt eine Abnahme der Verformungen von Süden nach Norden welche durch die

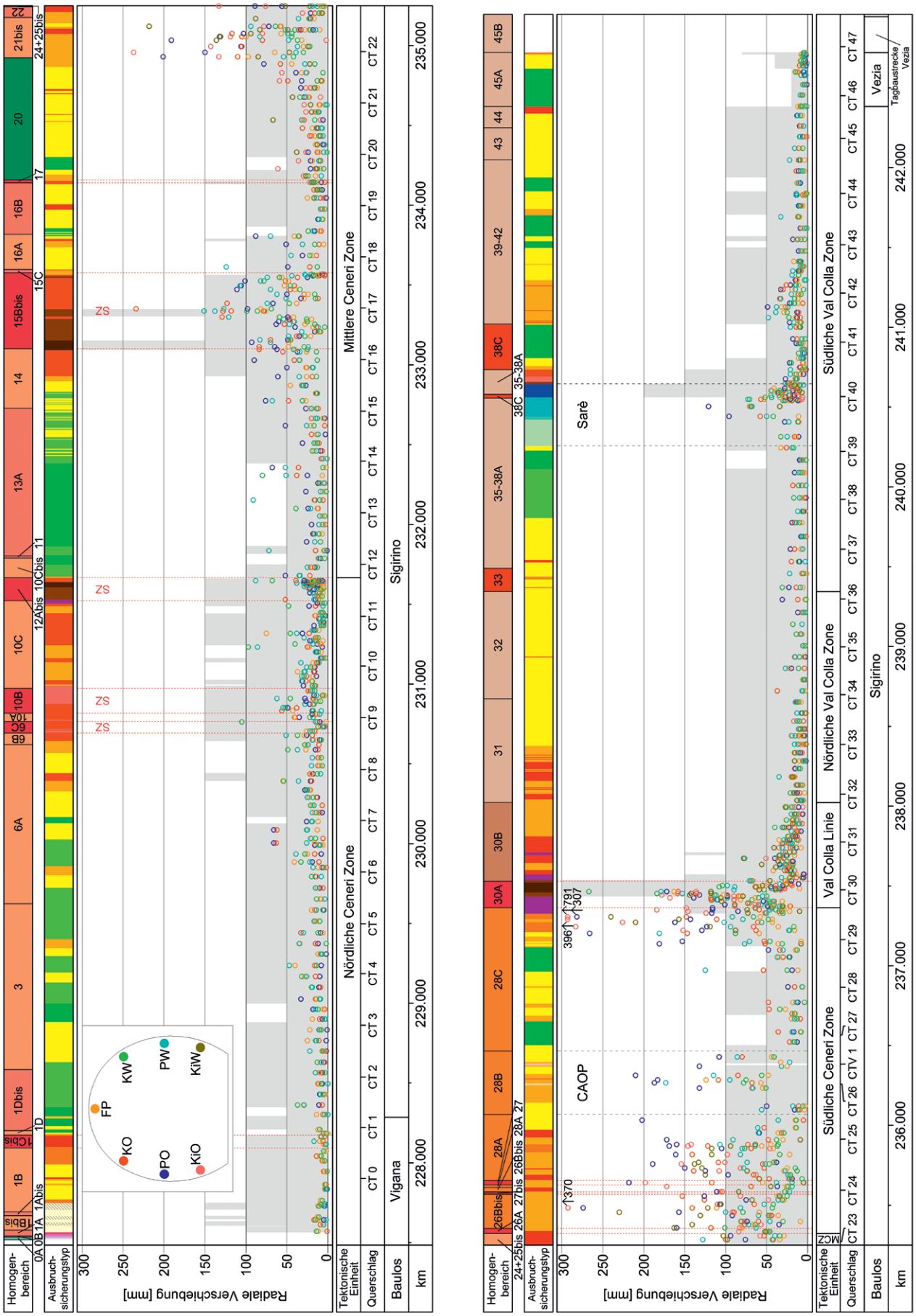


Fig. 9-16: Letzte Verformungsmessungen vor dem Einbau der Innenschale in der Oströhre. Die Farben der Homogenbereiche und Ausbruchsicherung entsprechen der allgemeinen Legende in Anhang 13-a und Anhang 13-c. Erläuterungen zu den Positionen der Messspiegel Anhang 13-b.

Fig. 9-17: Letzte Verformungsmessungen vor dem Einbau der Innenschale in der Weströhre. Die Farben der Homogenbereiche und Ausbruchsicherung entsprechen der allgemeinen Legende in Anhang 13-a und Anhang 13-c. Erläuterungen zu den Positionen der Messpiegel Anhang 13-b.

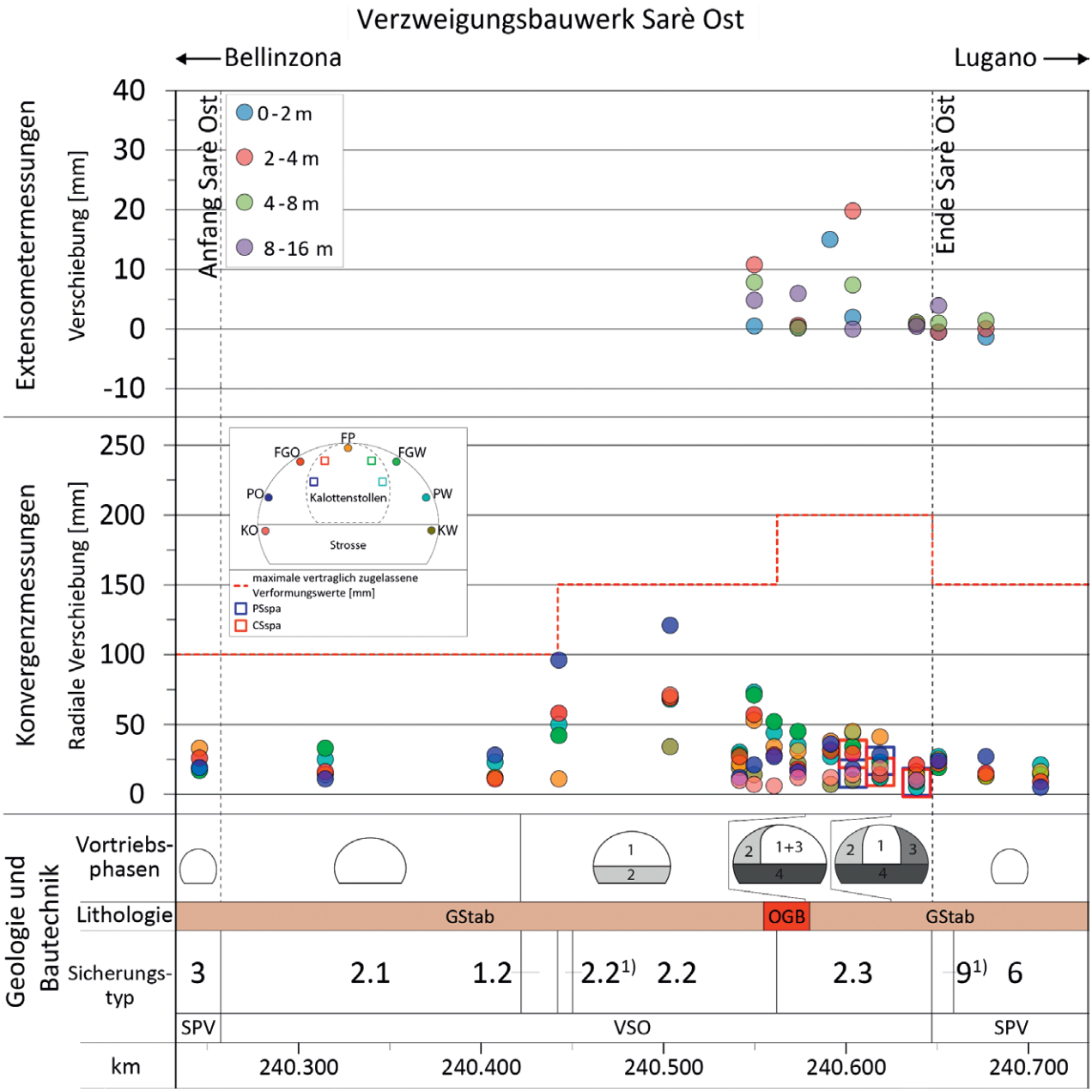


Fig. 9-18: Darstellung der Verformungs- und Extensometermessungen im Bereich der Kaverne Sarè Ost zwischen km 240.233 und 240.733.
[1)] Ausbruchsicherungstyp nach Klassenbereinigung.

Änderung der Strukturen am Übergang nördliche Ceneri-Zone/mittlere Ceneri-Zone und die günstigeren Felsverhältnisse hervorgerufen wurde. So lagen die Verformungen im Ceneri-Ortho- und -Paragneis, Hornfels, in den Basiten und Ultrabasiten der Ceneri-Zone mit 20–40 mm deutlich unter den Verformungen des Giumello-Gneises. Die Auswirkungen der Störungszonen auf das Gebirgsverhalten reflektierten im Homogenbereich 15Bbis deutlich höhere Verformungen (bis 150 mm) als in den angrenzenden Homogenbereichen und Störungszonen wie in den Homogenbereichen 17, 12Abis, 10B und 6C, welche auf die spitzwinklige Orientierung, Mächtigkeit und Beschaffenheit der Störungszone zurückzuführen war.

Die Messstationen der CAOP erreichten Verformungen von 20–130 mm (im Durchschnitt 70 mm) bis hin zu Spitzwerten von 300 mm. Derartige Messwerte können auf folgende zwei Ursachen zurückgeführt werden. Die Orientierung der Vortriebsachse liegt parallel bis subparallel zu den Hauptstrukturen (Schieferung und Störungen). In den Querstollen CTV 1, CTV 2 (Lüftungsstollen) und Querschlag QS 26, welche quer zur Hauptspannungsrichtung liegen, sind die Verformungen deutlich kleiner ausgefallen. Die zweite Ursache lag bei der Vortriebsmethode. Der Teilausbruch in den Kavernen beeinflusste die Stabilität des Felsen durch eine erneute Veränderung des sekundären Spannungszustandes um den Hohlraum.

In den Nord-Süd ausgerichteten Bauwerken, wie CAOP, RA und CPC, entstanden wegen Langzeitverformungen nach einigen Monaten zentimeterdicke Risse in der Spritzbetonschale, insbesondere in den Kreuzungsbereichen der CAOP (s. Kap. 11.4.5).

Im Streckenabschnitt der Weströhre und der CAOP zwi-

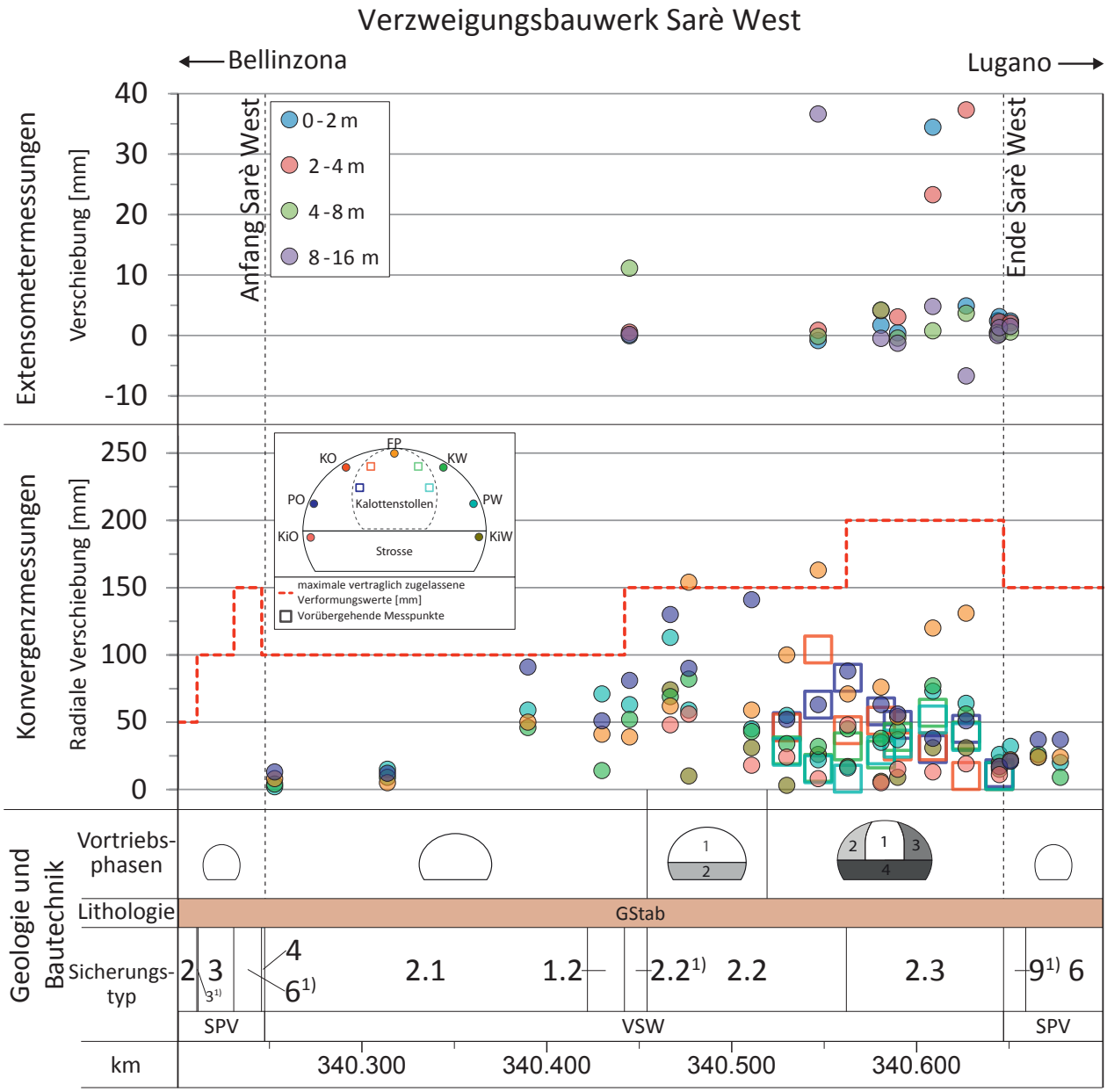


Fig. 9-19: Darstellung der Verformungs- und Extensometermessungen im Bereich der Kaverne Sarè West zwischen km 340.201 und 340.701. [1)] Ausbruchsicherungstyp nach Klassenbereinigung.

schen den Homogenbereichen 26Bbis und 28B zeigten die Verformungen trotz des deutlich grösseren Ausbruchquerschnittes in der CAOP keine Unterschiede (Fig. 9-17). Diese Beobachtung kann auf die Unterschiedliche Felsqualität zurückgeführt werden (Kap. 10.3.6, 11.4.4 und 11.4.5).

Zu Beginn der beiden Vortriebe des Bauloses Sigirino in Südrichtung lagen die Verformungen im Giumello-Gneis unterhalb von 50 mm, während sie im Randbereich der Val-Colla-Linie im östlichen Kämpferbereich auf 200 mm anstiegen. Während der Durchörterung des Homogenbereichs 30A liess sich, in Übereinstimmung mit dem Verlauf der Störungszone, eine Migration der Höchstwerte vom östlichen Paramentfuss in das westliche Parament feststellen (spitzwinkliges Verschneiden der Störungszone mit der Tunnelachse). Die Höchstwerte der Gebirgsspannungen im Kern der Störungszone verursachten beim Übergang in den Firstbereich deutlich höhere Auflockerung, wodurch bei km 237.478 ein Niederbruch erfolgte (Kap. 10.3.8).

In Anbetracht der Ergebnisse der Verformungsmessungen in der Val-Colla-Zone fallen drei Streckenabschnitte mit grossen Verformungen auf: Der Bereich der Homogenbereiche 32–33 (km 238.773–239.611), das Verzweigungsbauwerk Sarè (km 240.246–240.778) und der Streckenabschnitt südlich von Sarè (Oströhre km 241.031–241.266 und Weströhre km 340.846–340.964).

Im ersten Streckenabschnitt der Val-Colla-Zone (HB 32–33) übersteigen einige Messpunkte die durchschnittlichen Verformungen und erreichen Werte zwischen 20–40 mm (Fig. 9-18 und Fig. 9-19). Die Maximalwerte befinden sich in beiden Paramenten und dem Kämpferbereich und sind auf die unregelmässige Schieferung und Änderung deren Einfallen und Richtung zurückzuführen.

Die Erhöhung der Verformungen im Verzweigungsbauwert Sarè ist einerseits mit der Zunahme der Querschnittsfläche zu verbinden. Anderseits haben die heterogene Beschaffenheit der Gesteine und die Trennflächen insbesondere in der Westkaverne höhere Verformungen hervorgerufen. Die Setzungen in der Kaverne Sarè West erreichten Werte zwischen 70 und 163 mm und können mit der subhorizontalen Schieferung erklärt werden, indem eine Biegung der Gesteinslagen im Firstgewölbe Ablösungen und Auflockerungen begünstigte. Infolge dieser Erkenntnisse wurde in beiden Kavernen der Vortrieb zusätzlich mittels Kalottenvortriebs fortgesetzt. Diese Bauhilfsmassnahme war wirkungsvoll, weil sie eine deutliche Verringerung der Verformungswerte auf 80 mm erzielte.

Der dritte Streckenabschnitt im Bereich des Hosentunnels und dem Einspurtunnel West südlich der Stirnwand des Verzweigungsbauwerkes Sarè verformte sich besonders durch die Spannungskonzentrationen durch das tektonisch geschwächte Gebirge in der Umgebung des Bernardo-Orthogneiskörpers. Es traten trennflächeninduzierte Maximalwerte der Verformungen im Bereich der beiden Kämpfer und der Firste mit Verformungen im Tunnelstumpen West und Weströhre und in beiden Paramenten des Tunnelstumpens Ost bis zu 55 mm auf. Wegen des relativ schmalen verbleibenden Felspfeilers zwischen Einspurtunnel und Tunnelstumpen wurde in diesem Streckenabschnitt ein Ausbruchsicherungstyp SPV 6A eingebaut (Kap. 11.4.9).

Die Verformungsüberwachung beim Vortrieb Südportal Vezia basierte auf den Ergebnissen von 20 Messquerschnitten mit zusätzlichen drei Messbolzen in der Ortsbrust bei Vortriebsende. Die Verformungen lagen unterhalb von 10 mm. Die maximalen Verformungen traten in der Kalotte auf.

9.5.2 Extensometermessungen

Die Extensometermessungen halfen, das Spannungs-Dehnungs-Verhalten im Fels besser zu beobachten und zu verstehen sowie die Auflockerungstiefe zu quantifizieren. Die Länge und Anzahl der Extensometer pro Messquerschnitt war unterschiedlich und wurde anhand der Geometrie des Tunnelquerschnittes und der Beschaffenheit des Gebirges festgelegt. Die eingesetzten Bohrloch-Extensometer enthielten drei oder vier Messgestänge mit Längen von 2, 4, 8 oder 16 m und wurden in der Regel in den Positionen 10, 12 und 14 Uhr entlang des Tunnelprofils eingebaut. Die Dehnung liess sich anhand positiver Werte erkennen, während die Verkürzung negative Werte ergab. Die positiven Werte entsprechen der Setzung des aufgelockerten Gesteins oder Gleitbewegungen von Felsblöcken entlang der Gleitflächen. Im Gegensatz dazu entsprechen die negativen Werte voraussichtlich den Gleitbewegungen in Richtung Gebirge.

Die im Portalbereich Vigana eingesetzten Extensometer erfassten Verformungen von weniger als 1 mm. Der Maximalwert von 4 mm erfasste die Verschiebung im Störungsbereich der Kaverne West.

Beim Nordvortieb Sigirino liessen sich Gesamtverschiebungen von einigen Millimetern messen. In einigen Extensometerstationen stellte die öBL eine Diskrepanz zwischen Extensometermessungen und Verformungsmessungen fest, denn diese ergaben z.T. keine vergleichbaren Messwerte. Der Versuch mit einem 20 m langen Sliding Deformeter in unmittelbarer Nähe eines Extensometers prüfte dessen Funktionalität. Es stellte sich heraus, dass die verwendeten Extensometer aufgrund der z.T. grösseren Scherverformung in den ersten 4–8 m des Felses gequetscht werden und dadurch das Instrument die Verformung der tieferen Fixpunkte nicht mehr korrekt aufzeichnet.

In den grösseren Ausbruchquerschnitten im Verzweigungsbauwerk Sarè wurden mittels Extensometern ausführlichere geotechnische Messungen durchgeführt. Die folgenden zwei Figuren veranschaulichen die geologischen, geo- und bautechnischen Verhältnisse in der Kaverne Ost (Fig. 9-18) und Kaverne West (Fig. 9-19).

Die Extensometermessungen in der Kaverne Sarè Ost erfassten bis auf einige wenige Ausnahmen mehr als 80% der Verschiebungen in der Tiefe zwischen 4 und 8 m. Sie korrelieren mit den Verformungsmessungen und bestätigen eine Auflockerungstiefe weniger als der Kavernendurchmesser. Figur 9-18 und 9-19 zeigen den Unterschied der Messergebnisse zwischen den Kavernen. Während die Extensometermessungen in der Kaverne Sarè West Maximalwerte von 40 mm erreichten, waren die Werte in der Kaverne Sarè Ost Werte 20 mm nur halb so hoch. Des Weiteren verdeutlichen die Diagramme die Abnahme der Verformungen im Einspurtunnel südlich der Stirnwand Sarè, in denen nur noch 70% der Verschiebung in der Tiefe zwischen 4 und 8 m gemessen wurde. Weil in den Hosentunnel aufgrund des geringfügigen Abstandes zwischen den beiden Tunnelröhren Verformungen zu erwarten waren, wurden diese ebenfalls mit Extensometermessungen überwacht.

Beim Gegenvortrieb Vezia wurde in der Weströhre (bei km 393.500) ein Messquerschnitt mit drei Extensometern zur Überwachung der Überquerung des Strassentunnels Vedeggio – Cassarate eingebaut. Die Gesamtverschiebungen der Extensometer blieben unterhalb von 1 mm.

9.5.3 Verformungsmessungen der Sohlen

Nach dem Betonieren der Sohle wurde im Nordvortrieb Sigirino in der mittleren Ceneri-Zone (HB 15Bbis – 24+25bis) mehrere Streckenabschnitte in der Oströhre zwischen km 233.460 und 235.136 und der Weströhre km 333.049–335.608 mit fortsetzenden Verformungen festgestellt. Zur Beobachtung der Verformungen wurden 40 Messbolzen auf beiden Seiten der Sohlen eingerichtet (Fig. 9-20). Es war davon auszugehen, dass diese anhaltenden Verformungen durch den fehlenden Ringschluss verursacht wurden. Durch die Verschiebungen zwischen Sohlblöcken im Millimeterbereich war keine Beeinträchtigung der Funktionalität der Sohle und den darin verlegten Einrichtungen wie Entwässerungsleitungen oder Kabelschutzrohren zu befürchten.

Während der Durchörterung der Val-Colla-Linie wurden in den Streckenabschnitten mit hohen Verformungen Schächte mit Messbolzen im Sohlgewölbe eingebaut (Fig. 9-21). Diese blieben für die Messung über einen Schachtdeckel zugänglich. Der Messbolzen war im Fels verankert und bestand aus einer Verlängerungsstange, welche mit einer Zielmarke ausgestattet war. Die erfassten Mess-

daten sind mit denen in den nahen radialen Messstationen vergleichbar. Weil keine Anzeichen von aussergewöhnlichen Verformungen im Sohlgewölbe bestanden, waren die Messungen im Sohlgewölbe nur auf wenige Messpunkte in der Val-Colla-Linie beschränkt.

9.5.4 Überwachung der Überquerung des Strassentunnels Vedeggio – Cassarate

Im Portalbereich Vezia überquert der CBT mit einer minimalen Distanz von 4 m den Strassentunnel Vedeggio – Cassarate. Um eventuelle Verformungen nachvollziehen zu können, wurde eine Überwachung der Verformungen mit einem Messsystem aus manuellen und automatischen Instrumenten eingebaut. Das manuelle System umfasste Extensometer zur Erfassung der inkrementalen Vertikalverschiebung (Inkrex) und Inklinometer zur Erfassung der Horizontalverschiebung, während das automatische System aus Mehrfachextensometern bestand. Die Positionen der Bohrlöcher mit den Messinstrumenten sind im Situationsplan der Figur 9-22 dargestellt.

Das automatische System war mit einer permanenten Messung und einem Warnsystem ausgestattet. Die Messpunkte registrierten die Verschiebungen und Verformungen in unmittelbarer Nähe der wichtigsten Bereiche der Infrastrukturbauwerke, wie das Gewölbe und die Sohle beider Einspurtunnel, aber auch die Kalotte des darunterliegenden Strassentunnels Vedeggio – Cassarate.

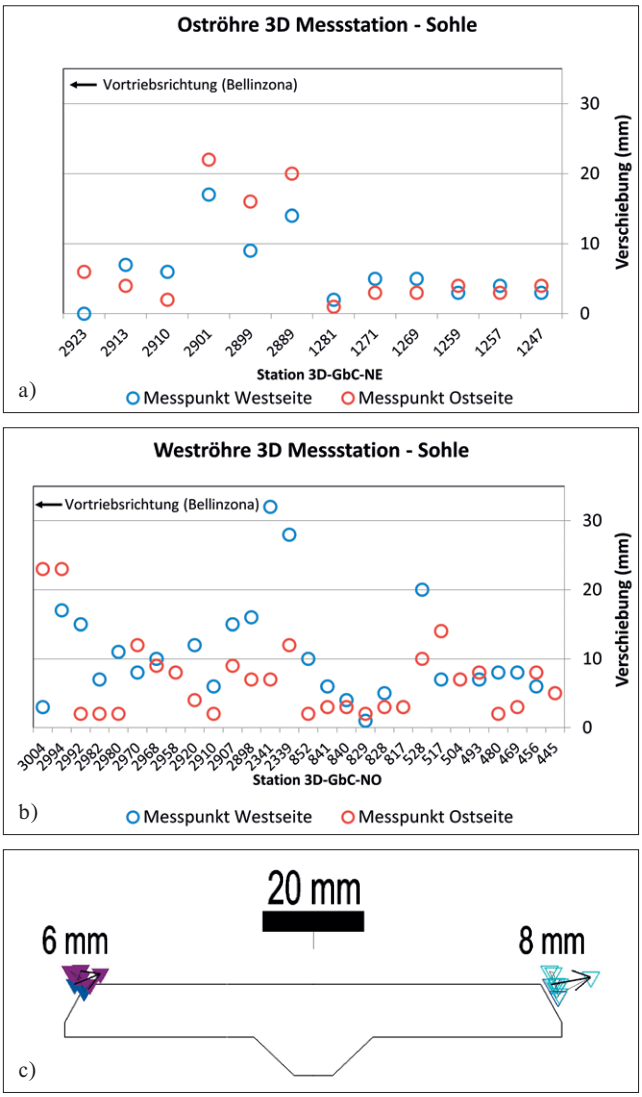


Fig. 9-20: Verformungsmessungen der einbetonierten Sohle. a) Messstationen in der Oströhre zwischen km 233.460 und 235.136 (Tm 2923–1247) und b) Weströhre km 333.049–335.608 (Tm 3004–445). c) Querschnittbezogenes Vektordiagramm der Sohle für die Messstation 3D-GbC-NW-2341 (km 333.712).

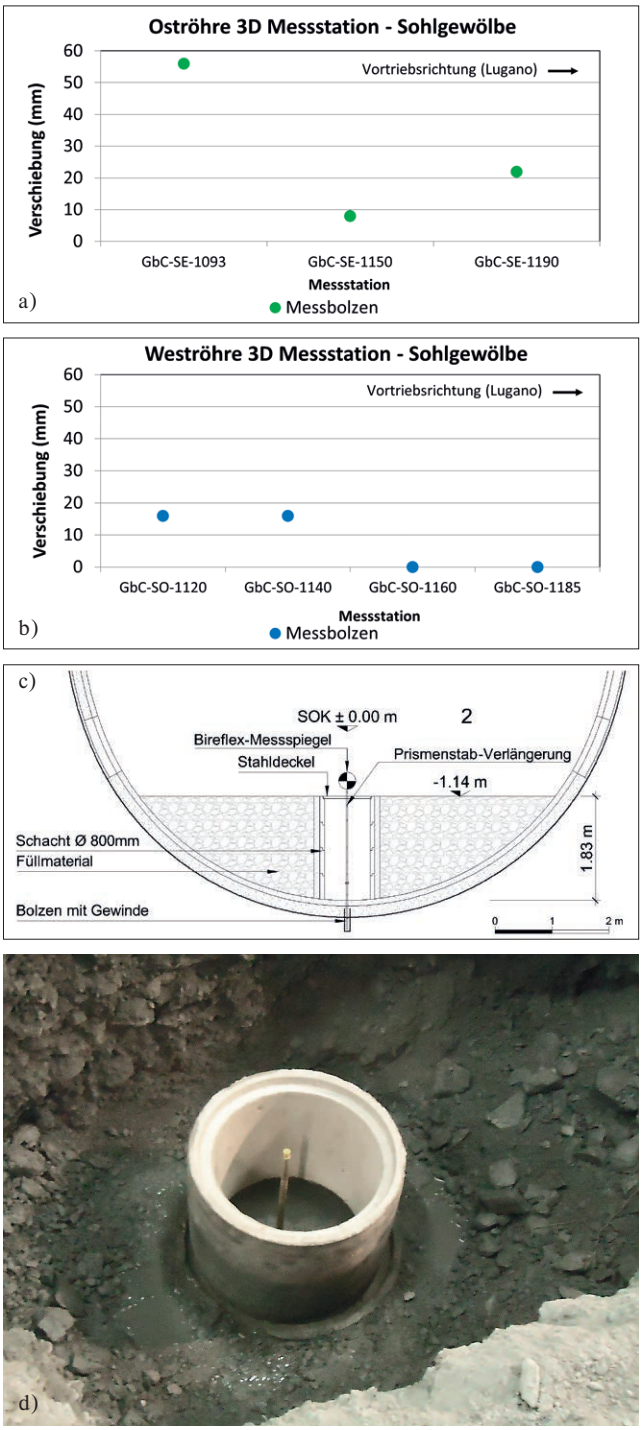


Fig. 9-21: Messwerte der Verformungsmessungen des Sohlgewölbes a) in der Oströhre und b) in der Weströhre. Die Werte entsprechen der radialen Verformungsrichtung. c) Querschnitt durch die Sohle zeigt die Bauform einer Messstelle zur Verformungsmessung im Sohlgewölbe. d) Einbau einer Messstelle in der Oströhre bei km 237.573 (Tm 1190).

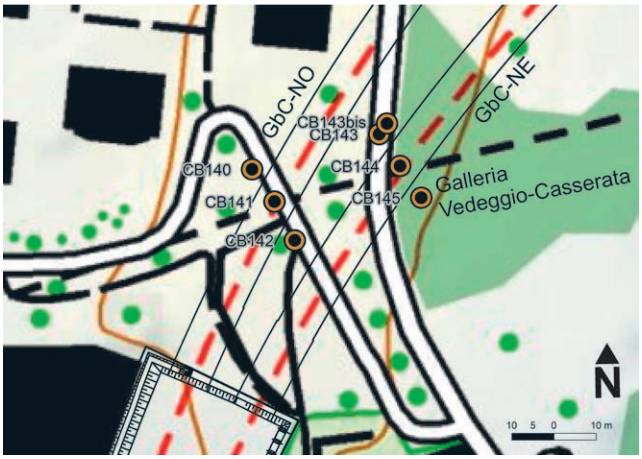


Fig. 9-22: Situation mit den Positionen der Bohrlöcher, ausgestattet mit Mehrfachextensometern. (Topographischer Hintergrund: swisstopo).

Verglichen mit der automatischen Überwachung ermöglichte die manuelle Überwachung umfangreichere richtungsbezogene Messdaten, die zu einem umfassenderen Verständnis der Verformungsmechanismen beigetragen haben.

Die Extensometermessungen seitlich des CBT und dem Strassentunnel zeigen eine leichte Verkürzung. Diese Verkürzung wird durch eine Scherbewegungen entlang von Trennflächen (Scher- oder Störungszonen) verursacht. Die Gesamtverschiebung schwankt zwischen dem Minimalwert von 3,1 mm (Bohrloch CB145) und dem Maximalwert von 7,8 mm (Bohrloch CB143) im Zeitraum von fünf Jahren. Der Grossteil der Scherspannungen konzentrierte sich in den Bereichen der Paramente im CBT und reaktivierte sich erneut während dem Ausbruch der Strosse.

Die Bohrlöcher in der Mitte zwischen CBT und dem Strassentunnel verzeichneten Dehnungen. Die gemessenen Horizontalverschiebungen fielen sehr gering aus. Die Verformungen erreichten Werte von wenigen Millimetern und sind auf leichte Scherbewegungen entlang von Trennflächen

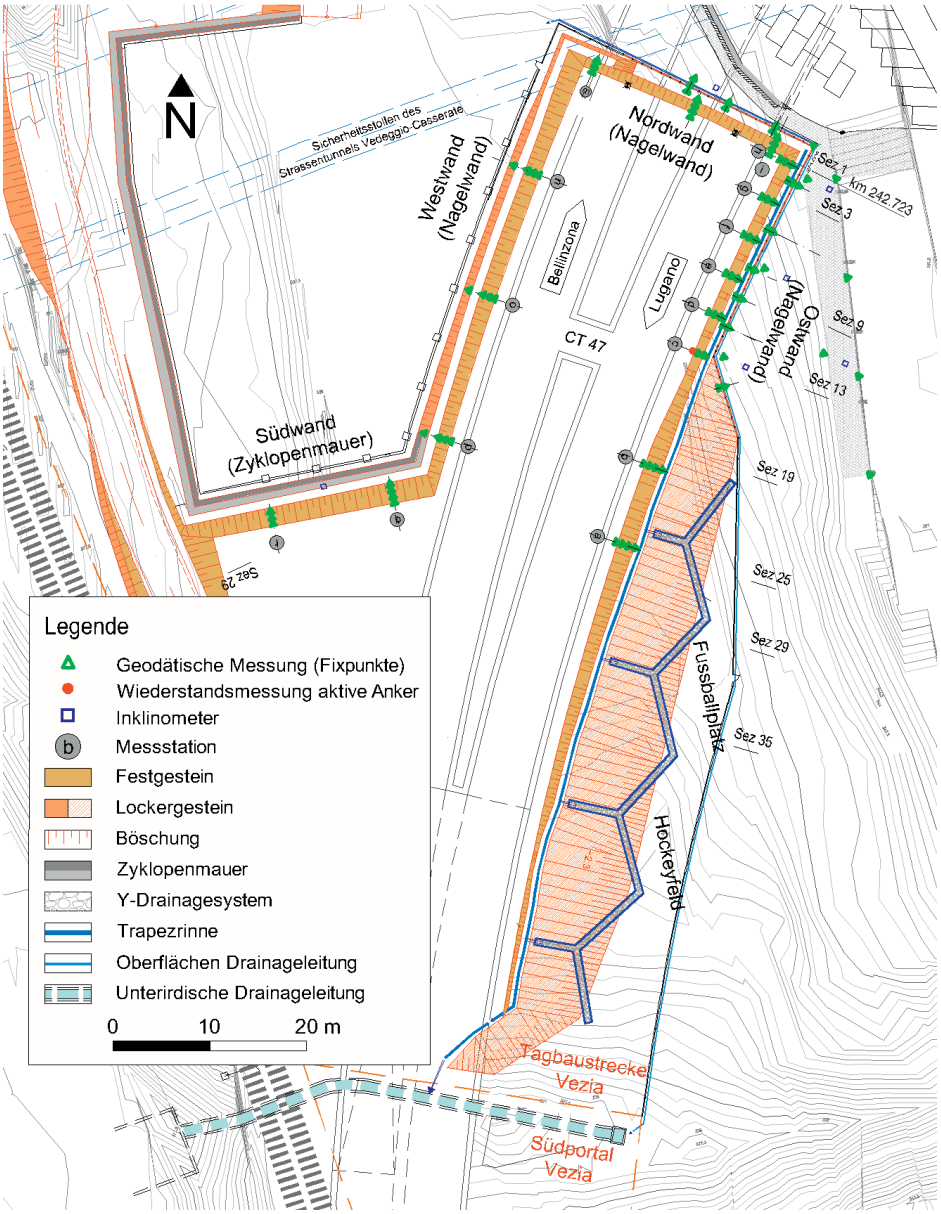


Fig. 9-23: Horizontalplan des Portaleinschnittes Vezia mit den Positionen der Inklinometer und den geodätischen Messpunkten.

sowie Auflockerungen zurückführbar. Die Warnwerte von 15 mm wurden nie erreicht.

9.5.5 Überwachung des Portaleinschnitt Vezia

Das geotechnische und geodätische Überwachungssystem am Portaleinschnitt Vezia bestand aus sieben Inklinometern und fünfzehn vertikalen Reihen ausgestattet mit jeweils zwei bis vier Messpunkten. Die Inklinometer befanden sich entlang der Oberkante der verankerten Nagelwand der Tagbaustrecke (s. blaue Quadrate, Fig. 9-23) und erfassten die Verschiebungen der Baugrube.

Der Warnwert für beide Überwachungssysteme betrug 15 mm. Ab diesem Wert sah das Überwachungskonzept den Einsatz von zusätzlichen Messungen und eine vertiefte Analyse der geotechnischen Verhältnisse vor. Für Messwerte ab 30 mm wären zusätzliche Sicherungsmassnahmen mittels Vorspannankern oder Änderungen der Sicherungsmethoden erforderlich gewesen.

Beim Bau des Voreinschnitts für die Tagbaustrecke wurden zwischen November 2008 und April 2010 bis zu 3 mm in der Nordwand, bis zu 5 mm in der Ostwand (maximale Höhe 19 m) und 12 mm im Lockergestein (Mächtigkeit der Schicht ca. 7 m) bei der Zyklopenmauer gemessen. Im Zeitraum von April 2010 bis September 2010, bei gleichzeitigem Vortrieb der Tunnelröhren kam es zu einer Zunahme der Verformungen im Pfeilerbereich zwischen den beiden Röhren. Es wurde eine Horizontalverschiebung von 8 mm in Richtung der Oströhre auf Kämpferhöhe und eine 3-mm-Verschiebung Richtung Einschnitt beobachtet. Die Ost- und Südwände wurden vom Ausbau der Röhren nicht beeinflusst. Der Messdatensatz nach Vortriebsende in Vezia bestätigt die Stabilisierung der Ostwand. Die einzige signifikante Senkung geschah in der Südwand, wo ein Gesamtwert von 14 mm gemessen wurde.

Die erfassten geodätischen Daten ergaben eine nach innen gerichteter Verschiebung der Nord-, Ost- und Westwände und eine Senkung der Nordwand. In der Letzteren, wo der Vortrieb der Tunnelröhre stattfand, hat das Messsystem Setzungen von 10–15 mm erfasst, welche dem Maximalwert dieser Messkampagne entsprechen. Die geodätischen Messergebnisse korrelieren mit den Inklinometermessungen.

9.5.6 Gegenseitige Beeinflussung beider Tunnelröhren beim Vortrieb

Bei einer mittleren Gebirgsüberlagerung von 470 m bis 810 m in der Ceneri-Zone und einem Achsenabstand bis zu 60 m zwischen den beiden Einspurtunnel stellt sich die Frage einer zweiten Spannungsumlagerung, induziert durch gegenseitige Wechselwirkung von zwei parallelen Vortrieben, insbesondere in deformationsanfälligen Lithologien, wie dem Zweiglimmerschiefer der Giumello-Gneis-Formation. Es gibt Beispiele, welche Hinweise auf eine zweite Spannungsumlagerung aufzeigen, nämlich die Störungszone 10B.1 Val d'Isone, die Störungszone 15B.1 Gola di Lago (ITZ) oder, am deutlichsten nördlich der CAOP. Die Datenauswertungen zeigen aber auch, dass nicht immer der gegenüberliegende Vortrieb die grössten zweiten Spannungsumlagerungen verursacht hat, sondern die Ausbruchsarbeiten des Sohlgewölbes, wie dies z.B. in der Störungszone der Val-Colla-Linie der Fall war.

Störungszone 10B.1 Val Mara Messstation EXT-NO-5164 Weströhre km 330.889

Bei der Extensometermessstation EXT-NO-5164 (km 330.889) in der Weströhre (Fig. 9-24) erreicht die Gebirgsüberlagerung eine Höhe von 500 m. Der Abstand zwischen beiden Achsen liegt bei 40 m. Die Mächtigkeit der Störungszone 10B.1, die hauptsächlich aus kataklastischem-kakiritischem Gestein besteht, übersteigt den Ausbruchdurchmesser des Tunnels. Während der Vortrieb der zurückliegenden Oströhre bei der Messstation ankam, war ein Verformungsanstieg von 0,5 mm für den Messpunkt in der Tiefe zwischen 4,0 m und 8,0 m beobachtbar (Fig. 9-24). Der leichte Anstieg der Verformung zeigt eine Aktivierung einer erneuten Verformung der bereits ausgebrochenen Weströhre im rückwärtigen Bereich, welche auf die Aktivitäten der benachbarten Ortsbrust zurückzuführen sind.

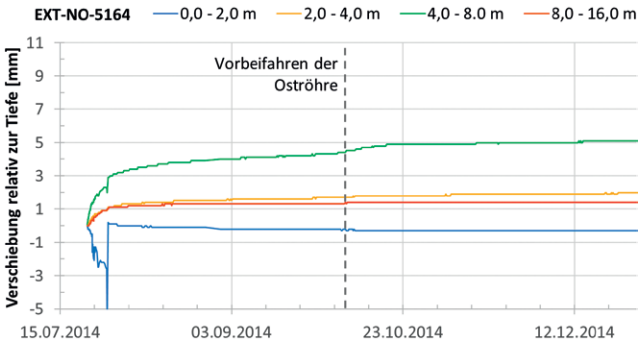


Fig. 9-24: Die Extensometermessstation bei km 330.889 (EXT-NO-5164) zeigt einen schwachen Anstieg während des Vorbeigehens der Oströhre in der Störungszone 10B.1 Val d'Isone.

Störungszone 15B.1 Gola di Lago, Messstationen in der Weströhre bei km 333.273 und 333.222

In der Störungszone Gola di Lago 15B.1 gibt es kein Vorzeigebeispiel eines Extensometers, welches die Wechselwirkung zwischen beiden Röhren anschaulich dokumentiert. Die Auswertung der Verformungsmessungen ergeben ebenfalls keine eindeutigen Hinweise, da die Auflösung der Verformungsmessreihe zu gross ist, und die Verformungen der Oströhre unterhalb der Messgenauigkeit des Theodolits liegen. Dafür illustriert dieses Beispiel das Verformungsverhalten eines Vortriebsstillstandes und den Ausbruch des Sohlgewölbes mit dem Schliessen der Stahlbögen.

In beiden Verformungsmessstellen nahmen die vertikalen Verschiebungen nach einer ersten Stabilisierungsphase aufgrund von zwei Vortriebsstillständen unmittelbar nach der Wiederaufnahme des Vortriebs um 55 mm respektive 70 mm zu, bis sich die Verformung im rückwärtigen Bereich nach sieben und elf Tagen erneut stabilisierte (Fig. 9-25). Die Ausführung des Sohlgewölbes und den Einbau des Bogenschlusses innerhalb einer Distanz hinter der Ortsbrust, die kleiner als der Ausbruchdurchmesser war, zeigte im Verformungs-Zeit-Diagramm leichte Schwankungen in der Grössenordnung von wenigen Millimetern.

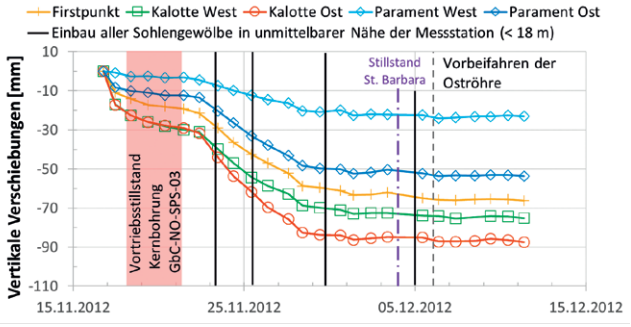


Fig. 9-25: Die Auswertung der Verformungsmessungen mit vertikaler Verschiebung illustriert in der Weströhre die Interaktion der Oströhre beim a) Messquerschnitt km 333.273 (3D-GbC-NO-2780) und b) km 333.222 (3D-GbC-NO-2831).

Weströhre nördlich der CAOP in der Giumello-Gneis-Formation km 336.044

Die Extensometermessstelle EXT-NO-09 (Fig. 9-26) km 336.044 befand sich in der Giumello-Gneis-Formation auf den ersten Metern im Einspurtunnel nördlich der CAOP.

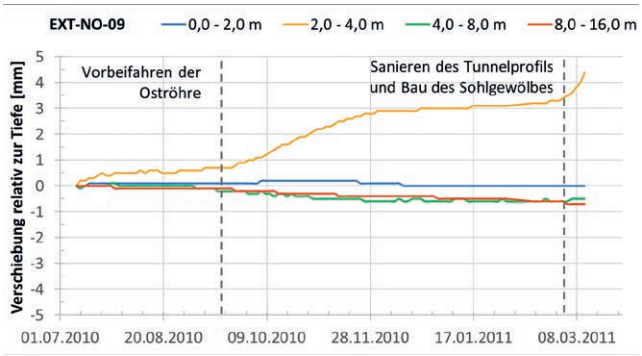


Fig. 9-26: Extensometer EXT-NO-09 in der Weströhre km 336.044 zeigt den Einfluss auf die zweiten Spannungsumlagerungen durch den Vortrieb der Oströhre und die Sanierung im Streckenabschnitt zwischen CAOP und Bypass Nord.

Die beiden Tunnelachsen des CBT liegen bei der erwähnten Messstation 60 m auseinander und die Gebirgsüberlagerung beträgt 660 m. Für den Ausbruch in den ersten 40 m des Nordvortriebes Sigirino ab der CAOP wurde ursprünglich eine Ausbruchsicherung der Typen SPV 3 und SPV 4 ohne Sohlgewölbe festgelegt. Im Nachhinein hat es sich herausgestellt, dass dieser Streckenabschnitt bautechnisch besonders empfindlich war, weil einerseits verschiedene Hohlräume mit Querschnitten von 238 m² in der CAOP auf 65,4 m² in der Weströhre ausgeführt wurden und gleichzeitig die Kreuzung mit dem Bypass Nord in unmittelbarer Nähe liegt. Anderseits sind die petrographischen und geotechnischen Voraussetzungen durch ungünstige Gesteinsbeschaffenheit vorgegeben, welche Glimmerschiefer der Giumello-Gneis-Formation und zahlreiche kataklastische verfächerte Störungszonen und mit einer spitzwinkligen Streichrichtung gegenüber der Tunnelachse enthalten.

Ähnlich wie im Beispiel der Störungszone 10B.1 lässt sich der Einfluss der Oströhre erkennen. Das Extensometer EXT-NO-09 zeichnete die Verformungen von 2,3 mm in einer Tiefe von 2,0–4,0 m auf, welche durch die Spannungsumlagerungen beim Ausbruch der Oströhre hervorgerufen wurden.

Der zweite Anstieg im Zeit-Verschiebungs-Diagramm ist auf die Sanierung und den Einbau des Ausbruchsicherungstyps SPV 6A mit Sohlgewölbe in der Weströhre zwischen CAOP und Bypass Nord zurückzuführen.

Vortrieb in der Val-Colla-Linie im Störungsbereich des Homogenbereichs 30A

Das letzte Beispiel zeigt die zweite Spannungsumlagerung in der Störungszone der Val-Colla-Linie. Während der Durchörterung des Homogenbereichs 30A hing die Zeitdauer bis zur Stabilisierungsphase der Verformungen hauptsächlich vom Gesteinstyp, der Mächtigkeit und Orientierung der Störungszone ab. Die vertikalen Verschiebungen in Figur 9-27 zeigen das Verformungsverhalten im Störungsbereich. Die Felsüberlagerung beträgt bei der Verformungsmessstelle 3D-GBC-SO-1060 (km 337.511) 410 m und die beiden Achsen der Tunnelröhren liegen 49 m auseinander. Die Stabilisierungsphase der vertikalen Verformungen wurde innerhalb von zwei Wochen erreicht (s. Kurve des Messpiegels Kalotte Ost, Fig. 9-27), mit einer Verschiebung von 105 mm. Eine Schwankung von weniger als 4 mm in der Verschiebungs-Zeit-Kurve ist auf den Bau des Sohlgewölbes hinter der Ortsbrust der Weströhre und die Vortriebsarbeiten der Oströhre zurückzuführen.

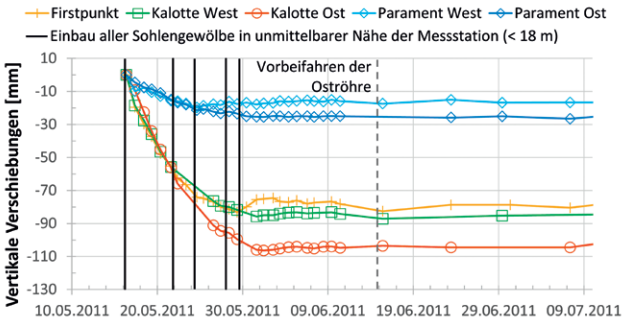


Fig. 9-27: Verformungsmessstelle 3D-GBC-SO-1060 in der Weströhre bei km 337.511 zeigt den Einfluss der Oströhre und den Bau des Sohlgewölbes hinter der Ortsbrust der Weströhre.

Zusammenfassend geht aus den Auswertungen hervor, dass die Beobachtungs des Einflusses der gegenüberliegenden Tunnelröhre, insbesondere für Verformungsmessungen in der Grössenordnung von wenigen Millimetern, an der Grenze der Messgenauigkeit lag und keine bautechnischen Auswirkungen verursachten. Es sind keine Beispiele bekannt, bei denen Spannungsumlagerung, induziert durch den gegenüberliegenden Vortrieb, zu Rissbildung oder Abplatzungen in der Aussenschale oder zu sichtbaren Verformungen der Ausbruchsicherung führten.

9.6 Überwachung von Erschütterungen und Körperschall während des Baus

9.6.1 Überwachungskonzept

Der Bauherr hat vor Baubeginn ein besonderes Augenmerk auf die Optimierung der Sprengtechnik beim Vortrieb im urbanen Gebiet gelegt, um die Erschütterungs- und Körperschallimmissionen in der Nähe bewohnter Gebiete zu

minimieren (Fig. 9-28). Dazu liess er ein Überwachungskonzept erstellen, welches zudem ein Verzeichnis mit sensiblen Infrastrukturbauten enthielt. Der Bauherr beauftragte die Firma IFEC Ingegneria SA für den Betrieb und die Auswertung der Erschütterungs- und Körperschallmessungen des CBT.

Anhand der übermittelten Ergebnisse konnte die öBL bei Erreichen des kritischen Wertes, der 80% unter dem vertraglich festgelegten Grenzwert (Tab. 9-12) lag, zusammen mit der Unternehmung die nötigen Massnahmen beim Sprengvortrieb veranlassen (Kap. 9.6.3). Die im Vertrag festgelegten Einschränkungen regelten die zugelassenen Sprengzeiten und mechanischen Arbeiten beim Vortrieb, um die Erschütterungen und den Körperschall während sensibler Tages- und Nachtzeiten (Nachtstunden, Wochenenden) innerhalb der zulässigen Grenzwerte zu hallten. Dabei waren bei allen Vortrieben die Grenzwerte der Erschütterungen und des Körperschalls auf den Fundamenten der Bauwerke einzuhalten (Tab. 9-12).

Tab. 9-12: *Vertraglich festgelegte Grenzwerte der Rayleigh-Werte VR_{max} für Gebäudefundamente (abgeminderte Werte gemäss SN 640 312a).*

	Frequenzen		
	<30 Hz	30–60 Hz	>60 Hz
	VR_{max} [mm/s]		
Normal sensible Gebäude	10	15	20
Besonders sensible Gebäude	7,5	10	15
Villa Negroni	6	8	12

Gebäude und Infrastrukturen waren in zwei Hauptgruppen unterteilt, wobei sich moderne Gebäude von schützenswerten Kulturgütern unterschieden. Moderne Gebäude sind normal sensibel und lassen höhere Schwinggeschwindigkeiten zu als alte. Für die Villa Negroni in Vezia z.B. bestand ein niedrigerer Grenzwert aufgrund der Lage, Gebäudestruktur und dem prognostizierten Baugrund.

Die Resonanzfrequenzen für Gebäudestrukturen liegen oft unterhalb von 30 Hz, wobei die Dämpfungswerte dieser Frequenzen eher niedrig sind. Die meisten Baumaschinen arbeiten in diesem Frequenzbereich, sodass aufgrund von starken Vibrationen hohe Resonanzfrequenzspitzen zu erwarten waren. In diesem letzten Fall waren die Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeiten daher niedriger (VR_{max} 10 mm/s) angelegt. Im Intervall über 60 Hz sind die natürlichen Frequenzen für Gebäudestrukturen selten. Die höheren Frequenzen stammen von gepulsten Wellen, die typischerweise durch Sprengungen beim Vortrieb verursacht werden. Die Überschreitung der Schwinggeschwindigkeit für diese Frequenzen ist seltener, so dass in diesem Bereich auch höhere Rayleigh-Werte (VR_{max} 20 mm/s) zugelassen werden konnten.

Die Beurteilung der Gebäudestruktur ist ein wichtiger Faktor zur Bestimmung der Referenzparameter. Die Definition der Rayleigh-Werte für den Baugrund in Bezug auf die verschiedenen Gebäudeempfindlichkeiten zu definieren und vorherzusagen, ist sehr schwierig. Daher hat der Bauherr als Vorsichtsmassnahme niedrigere Grenzwerte als der Standard VSS 640 312a festgelegt.

Die Daten, die während der gesamten Vortriebsphase gesammelt wurden, bestätigten die Effizienz der durchgeführten Massnahmen beim Vortrieb, welche erlaubten, die Erschütterungswerte unterhalb der festgelegten Grenzen zu halten.

Nach Beendigung der Vortriebsarbeiten wurden nur vereinzelt Gebäudeschäden reklamiert. Bestandsaufnahmen, die auf Grund der Beschwerden gemacht wurden, zeigten, dass die reklamierten Schäden nicht auf die Sprengerschütterungen zurückzuführen waren.

9.6.2 Überwachungseinrichtung

Das Überwachungseinrichtung zur Messung von Erschütterungen und Körperschall umfasste ein breites Netz mit 126 seismischen Messstationen, verteilt im dicht besiedelten Gebiet des CBT, um die Auswirkungen von Sprengungen und durch Maschinen verursachte Erschütterungen beim Vortrieb datenmässig erfassen und analysieren zu können.

Der Informationsfluss der Messwerte der Geophone erfolgte in Echtzeit, so dass alle Projektbeteiligten direkt informiert waren und entsprechend handeln konnten. Die Planung und Anpassung der Überwachung erfolgte monatlich in Abhängigkeit der Messergebnisse und Vortriebsstände.

9.6.3 Massnahmenplan

Der vom Unternehmer erarbeitete Massnahmenplan bestand aus technischen Anweisungen beim Vortrieb, die bei kritischen Ereignissen auszuführen waren.

Erwähnenswerte Massnahmen bestanden darin, problematische Ereignisse zunächst zu analysieren und zu überprüfen, damit anschliessend technische Lösungen zur Minimierung von Erschütterungen, wie zum Beispiel die Abschlagslänge, reduziert werden konnte.

Eine alternative Massnahme, um Erschütterungen zu verringern, beruhte auf «kontrollierten Sprengungen» mit einer Vergrösserung der Verzögerungszeit der Sprengzünder («Sektorzündung») und Reduktion der Sprengstoffmenge pro Sektor.

9.6.4 Ergebnisse und Interpretation

Das Netzwerk mit den seismischen Messstationen richtete sich nach dem Arbeitsprogramm und beinhaltete je nach Vortrieb bis zu 25 aktive Geophone (Fig. 9-28).

Wegen der geringen Gebirgsüberlagerung im Baulos Vigana erwiesen sich die zur Linienführung nahe gelegenen Gebäude und sensiblen Infrastrukturbauten als Hauptobjekte der Erschütterungsüberwachung.

Zu den sensiblen Infrastrukturbauten zählten die Autobahn A2 mit einer kritischen minimalen Gebirgsüberlagerung von ca. 10 m zum Tunnel und die Eisenbahnlinie der SBB Bellinzona–Lugano.

Im Baulos Vigana wurde zu keiner Zeit während der gesamten Vortriebsarbeiten ab Jet-Grouting und anschliessendem Sprengvortrieb die festgelegten Grenzwerte für Gebäude und Infrastruktur überschritten.

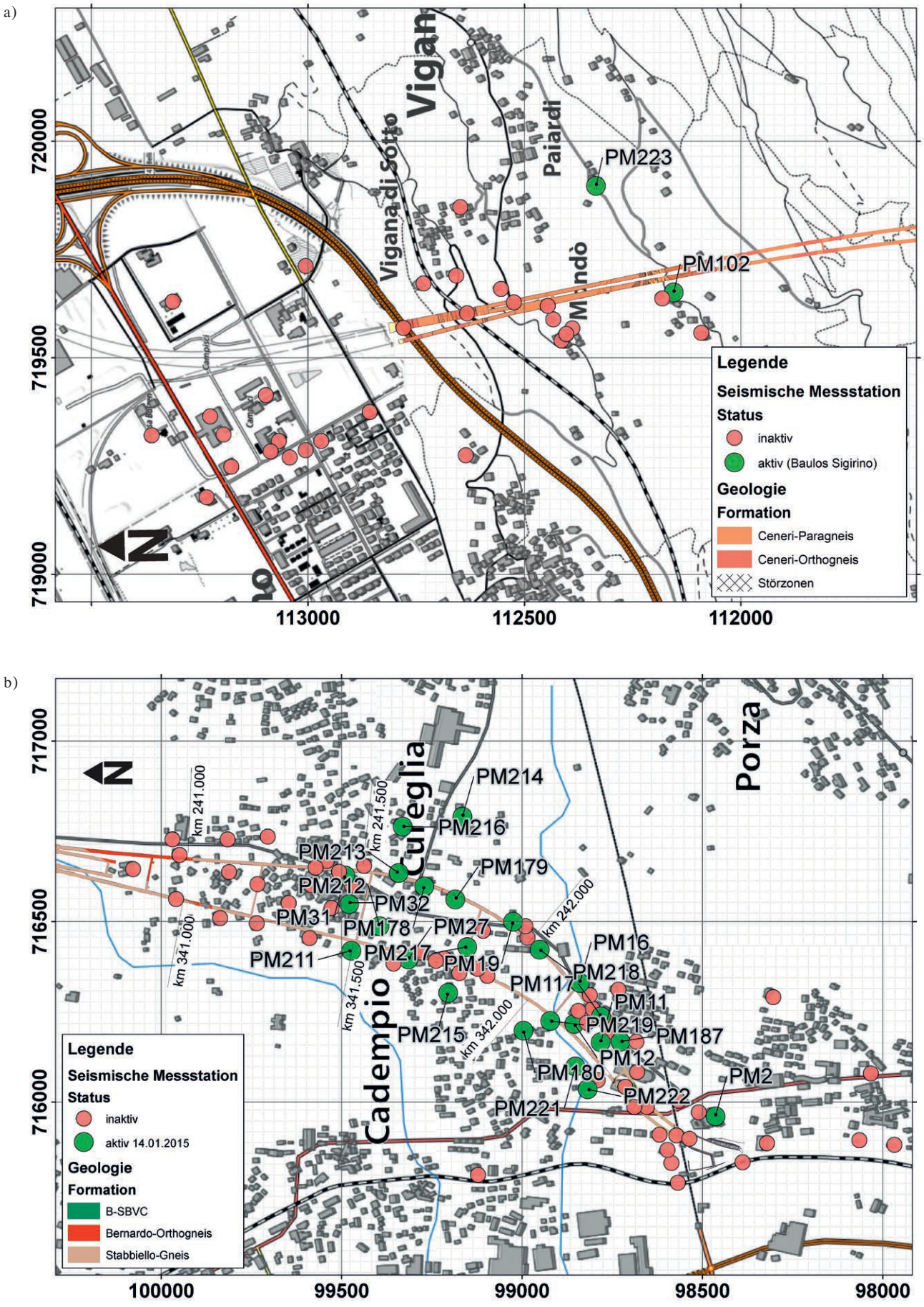


Fig. 9-28: Übersicht über die aktiven seismischen Messstationen zur Überwachung von Erschütterungen und Körperschall beim Vortrieb Baulos Sigirino. a) Am 01.12.2015 im Bereich des Nordportals Vigana und b) am 14.01.2015 im Bereich des Südportals Vezia.

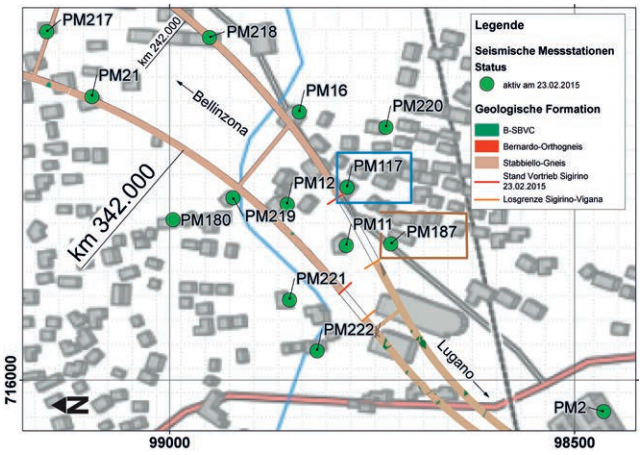


Fig. 9-29: Vortriebsstand am 23.02.2015 mit Sprengung in der Südoströhre um 08:07 Uhr (km 242.294) und Südweströhre um 08:10 Uhr (km 342.265). Diese Figur dient als Übersicht für die beiden nachfolgenden Figuren. In weisser Farbe im Horizontalplan das fehlende Teilstück bis zur Baulosgrenze Vezia.

Gleichermassen präsentierten sich die Erschütterungsmessungen im Nordvortrieb des Bauloses Sigirino, bei denen die Höchstwerte für die beiden aktiven Messstationen PM102 und PM223 (Fig. 9-28 a) VR_{max} <0,5 mm/s betrugen.

Mit der abnehmenden Gebirgsüberlagerung beim Südvortrieb des Bauloses Sigirino nach der Val-Colla-Linie ab km 237.500 (Region Bigorio und Sala–Capriasca) nahmen die Erschütterungen zu.

Angesichts der günstigen Ergebnisse der Erschütterungsmessungen im Streckenabschnitt zwischen der Val-Colla-Linie und dem Verzweigungsbauwerk Sarè, welche tiefer ausfielen als erwartet, konnten die im Vertrag festgelegten Einschränkungen gelockert werden. Es werden hier deshalb nur die Ergebnisse im Gebiet mit dem kritischsten Befund in der Region zwischen Cadempio und Vezia nahe an der Baulosgrenze Sigirino und Vezia vorgestellt.

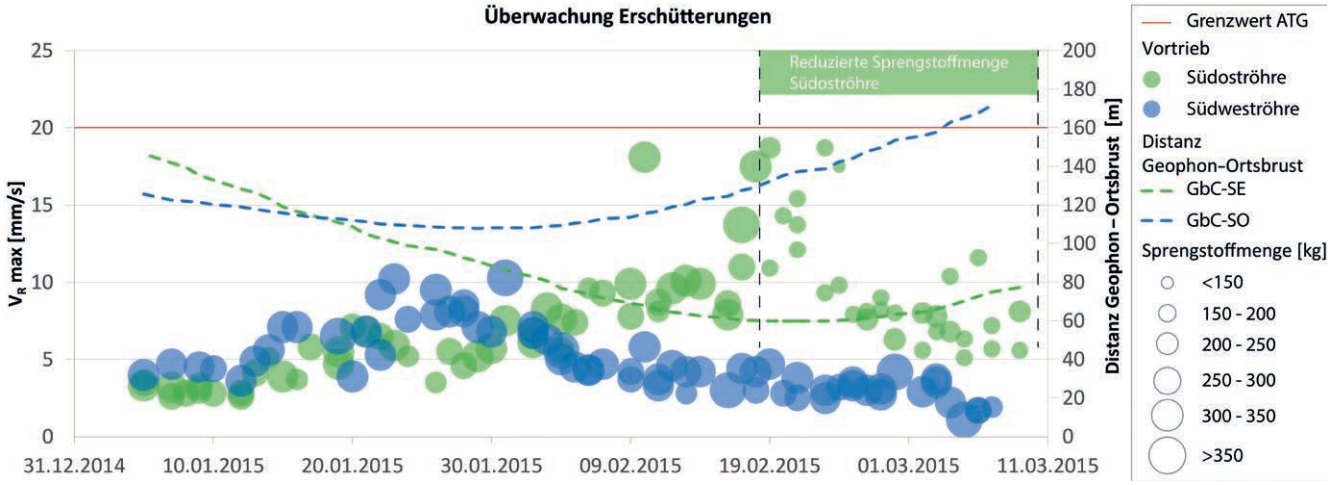


Fig. 9-30: Ergebnisse der Erschütterungsmessung (Schwinggeschwindigkeiten) für die Station PM 117 im Vergleich der Entfernung zwischen Ortsbrust und Geophon in Funktion der verwendeten Sprengstoffmenge während der Unterquerung des Val Ponteggia im Zeitraum 01.01.2015–09.03.2015.

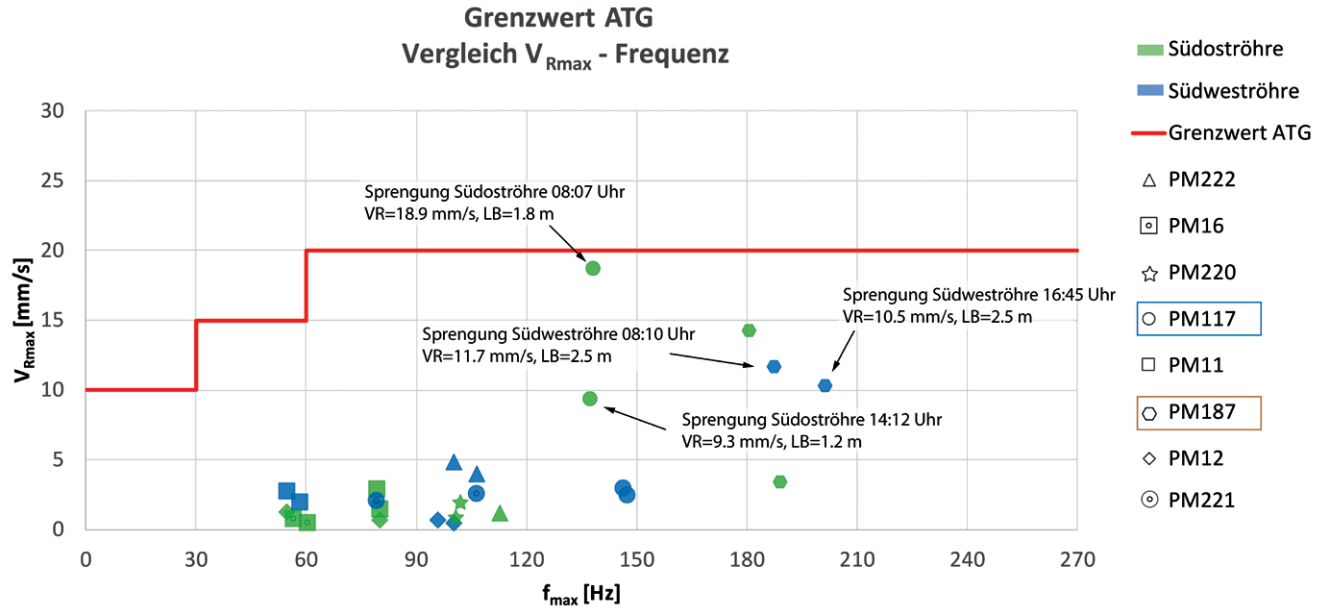


Fig. 9-31: Die im Diagramm Rayleigh-Geschwindigkeiten/Frequenz dargestellten Erschütterungsmessungen (Schwinggeschwindigkeiten) veranschaulichen die getroffenen sprengtechnischen Massnahmen am 23.02.2015 in der Südoströhre bei km 242.292.

Figur 9-29 zeigt den Bereich der Messstationen PM117 und PM187 mit den höchsten gemessenen Erschütterungswerten beim Südvortrieb.

Es wurde beobachtet, dass die Intensität der an der Oberfläche gemessenen Erschütterungen umgekehrt proportional zum Abstand zwischen Ortsbrust und Geophon an der Oberfläche war. Figur 9-30 vergleicht zudem die verwendete Sprengstoffmenge beim Abschlag mit der Entfernung zwischen Ortsbrust und Geophon. Das Beispiel der Südweströhre demonstriert, dass bei der Verwendung von konstanten Sprengstoffmengen und zunehmender Distanz zwischen Ortsbrust und Geophon-PM 117 die durch Sprengung induzierten Erschütterungen allmählich abnehmen. Bei einem Mindestabstand von 108 m zwischen dem Geophon PM 117 nahmen die durch Sprengung induzierten Erschütterungen allmählich ab. Bei einem Mindestabstand von 108 m zwischen dem Geophon PM 117 und der Ortsbrust in der gleichen Tunnelröhre erreichten die höchsten Schwinggeschwindigkeitswerte einen VR_{max}-Wert von 10 mm/s, was 50% des im Vertrag festgelegten Grenzwerts entspricht. Analog dazu erreichten bei der Annäherung der Südoströhre an das Geophon PM 117 bis auf einen Abstand von 60 m Mitte Februar 2015 die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten über 80% des Grenzwertes (VR_{max} <16 mm/s), was eine Anpassung der Sprengtechnik erforderte. Durch eine Verkürzung der Abschlagslänge auf 0,8–1,0 m und einer Verdoppelung der Sprenglöcher an der Ortsbrust (entspricht einer Halbierung der Lademenge pro Sprengloch) sanken die Schwinggeschwindigkeiten unter den Alarmwert.

Figur 9-31 zeigt den Effekt der getroffenen Massnahmen durch die Verkürzung der Abschlagslänge. Am 23.02.3015 wurde der Alarmwert bei der ersten Sprengung am Morgen um 08:07 Uhr in der Südoströhre überschritten. Während der Vortrieb in der Südweströhre ohne sprengtechnische Einschränkungen mit konstanten Abschlägen von 2,5 m weiterlief, wurde die die Abschlagslänge für die nachfolgende Sprengung am Nachmittag um 14:12 Uhr in der Südoströhre um 0,6 m auf 1,9 m verkürzt. Diese Massnahme halbierte den VR_{max}-Wert von 18,9 mm/s auf 9,3 mm/s für die Stationen PM117 und PM187.

Beim Vortrieb Vezia waren für die Überwachung der Erschütterungen im Zeitraum vom 12.04.2010 bis zum 20.05. 2011 20 aktive seismische Messstationen (Geophone) an der Oberfläche und 14 Messstationen im Strassentunnel Vedeggio – Cassarate im Einsatz.

Einzig im Jahr 2010 überschritten rund 0,7% aller Messungen im Gebiet mit minimaler Gebirgsüberlagerung und 1,3% entlang der SBB-Bahnstrecke die Grenzwerte. Die automatische Überwachung und der effektive Informationsfluss, kombiniert mit den getroffenen Massnahmen im Vortrieb, begrenzten einen höheren Anstieg der Erschütterungswerte. Die Anzahl der Überschreitungen des Grenzwertes im Vergleich zu allen gemessenen Werten ist dermassen gering, dass aufgrund der durch den Sprengvortrieb verursachten Erschütterungen keine Schäden an Gebäuden entstanden sind.

Die Schwinggeschwindigkeiten der Erschütterungen während der Überquerung des Strassentunnels Vedeggio – Cassarate erreichten den Alarmgrenzwert nie.

9.7 Überwachung der Oberflächenverformung

9.7.1 Unterquerung der Autobahn A2 in Vigana

Im Rahmen der Unterquerung der Autobahn A2 in Vigana liess der Bauherr ein Überwachungskonzept erstellen, welches gleichzeitig die Stabilität der Ortsbrust und die Oberflächenverformung überwachte (Fig. 9-32). Das Überwachungssystem bestand aus einem Netz von geodätischen Messpunkten und Inklinometern, mit denen sich eventuelle Absenkungen der Fahrbahn erkennen liessen. Die Erfassung und Verarbeitung der geodätischen Messdaten erfolgten in Echtzeit, so dass die öBL, OBL und der Autobahnbetreiber ASTRA im Falle von Überschreitung der festgelegten Früh- oder Warnwerten benachrichtigt werden konnten. Während der Überwachung erreichten die maximalen Setzungen an der Oberfläche 11 cm (Fig. 9-32). Die Auswertungen aller geodätischen Messstellen zeigen, dass im Durchschnitt etwa 30% der Verformungen während des Baus des Portaleinschnitts eintraten. 55% der Setzungen sind auf die Jet-Grouting-Phase beim Vortrieb zurückzuführen, und die restlichen 15% der Setzungen erfolgten beim Vortrieb der beiden Seitenstollen (Fig. 11-17) und des Raccordo Caverna Est. Die kritische Phase bestand daher während des Ausbruchs der beiden Seitenstollen mit durchgeführten vertikalen und horizontalen Jetting-Säulen.

9.7.2 Unterquerung der SBB-Bahnlinie in Vigana

Die Überwachung der SBB-Bahnlinie bestand während der Unterquerung des CBT in der Nähe des Nordportals Vigana aus einem geodätischen Überwachungssystem. Im Bereich der Bahnlinien waren fünf Messbolzen auf dem Fels und sieben Messbolzen an den Betonsockel der Oberleitungsmasten zur Kontrolle der Setzungen befestigt.

Im Vergleich zur Nullmessung vom 25.06.2009 verzeichneten einige Messpunkte Setzungen bis zu 10 mm beim Oberleitungsmasten oberhalb der Tunnelachse der Oströhre.

9.8 Einstufung der Standfestigkeit des Felses

Die Einstufung der Standfestigkeit erfolgte während den Ortsbrustaufnahmen auf der Basis der Tabelle 9-13. Dessen Befund ist im geologisch-bautechnischen Längenprofil in Tafel I dargestellt.

Tab. 9-13: *Einstufung der Standfestigkeit des Felsen, basiert auf der Gebirgsklassifizierung SIA 198 und* (Lauffer 1958).

Bezeichnung	Beschreibung des Gefährdungsbildes/Ereignisses	Stufe
standfest	Das Gebirge ist stabil, es sind keine oder nur vereinzelte Sicherungsmasssnahmen notwendig.	1
standfest bis leicht gebräch	Standfestigkeit des Profils nicht gefährdet, vereinzelt Kleinsteinfall vorhanden.	2
leicht gebräch	Kleinsteinfall, Auflockerung, Ablösung von Gesteinsplatten, und Kluftkörper.	3
gebräch	Ohne Sicherungsmassnahmen bleibt das Profil nicht erhalten, stark durchtrenntes Gebirge, Störungen, Auflockerung, Ablösungen, Kluftkörper und Ortsbrustinstabilität vorhanden.	4
stark gebräch	Wie oben, ungestütztes Gebirge <1 m, Standfestigkeit nur wenige Stunden gegeben.	5
druckhaft	Grössere Verformungen des Profils (plastische Verformung).	6
stark druckhaft	Starke Verformung des Profils.	7
rollig	Kohäsionsloses zerbrochenes Gebirge respektive Lockergestein ohne Kohäsion, Ortsbrust nicht standfest.	8
schwimmend, fliessend	Durchnässtes Fest- oder Lockergestein ohne Kohäsion (z.B. durchnässter siltiger und sandiger Kies fliesst in den Tunnel).	9

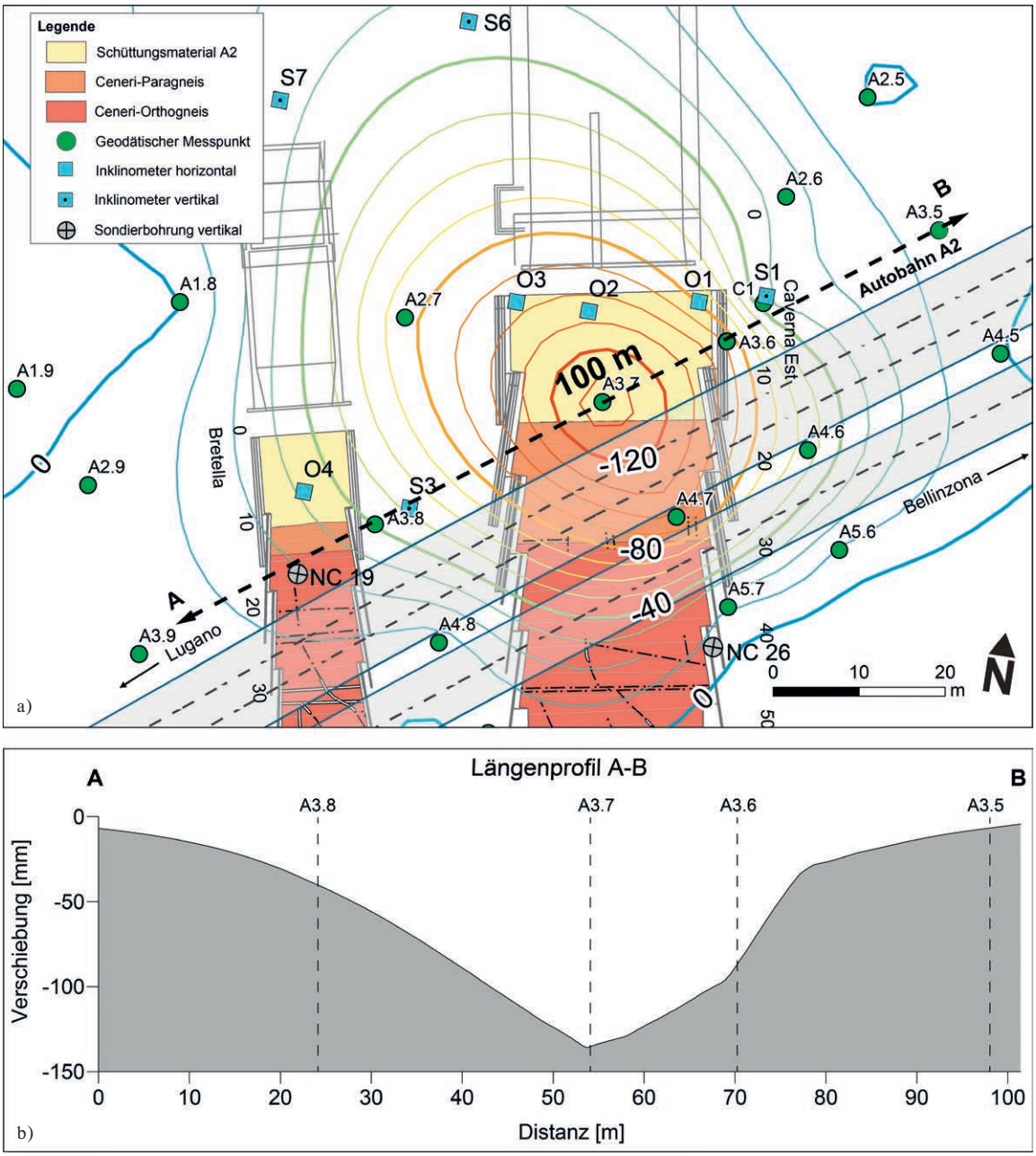


Fig. 9-32: a) Überwachung der Oberflächenverformung während der Durchörterung der Autobahn A2 beim Nordportal Vigana. b) Längenprofil A–B der Setzungs-Isolinien im Intervall von 10 mm mit maximalen Setzungen von 110 mm.

10. Gefährdungsbilder, Ereignisse und spezielle geotechnische Probleme

10.1 Definition der Gefährdungsbilder

Dieses Kapitel beschreibt die Gefährdungsbilder im Projekt und die Ereignisse beim Befund sowie die speziellen geotechnischen Probleme, die während des Tunnelbaus auftraten.

Mit dem Gefährdungsbild wird das Ausmass eines unerwünschten Ereignisses prognostiziert. Das Gefährdungsbild dient als Grundlage für die Dimensionierung und Verteilung der Ausbruchsicherung entlang des Tunnels in der Planung und für die Festlegung der Ausbruchsicherung beim Vortrieb. Der Begriff «Gefährdungsbild» im engeren Sinn wurde während der Bauausführung ausschliesslich zur Prognostizierung des bevorstehenden Vortriebes verwendet. Sobald das Gefahrenszenario nach der Sprengung oder im rückwärtigen Bereich des Tunnels eingetreten war, so wurde dieses als Ereignis bezeichnet.

Für das Projekt wurden die Gefährdungsbilder Kleinsteinfall, Auflockerung, Ablösungen, Kluftkörper, plastische Verformungen, Ortsbrustinstabilität Bergschlag und Wassereinbruch definiert (Tab. 10-1).

Die statistische Auswertung des Befundes zeigt am häufigsten trennflächengebundene Ereignisse, wie Kleinsteinfall, Kluftkörper und Ablösungen. Auflockerung oder plastische Verformung standen vorwiegend im Zusammenhang mit den Störungszonen oder Streckenabschnitten mit intensivem Durchtrennungsgrad oder ungünstiger Orientierung der Schieferung (HB 15Bbis und HB 30A).

Das Volumen der trennflächenbedingten Ablösungen im Tunnelprofil wie Kleinsteinfall und Kluftkörper berechneten sich unter der Annahme einer Pyramidenform, bzw. Plattenform für die Ablösungen nach den folgenden Pyramidenformeln:

Kluftkörper/Kleinsteinfall: $V=(A\times H)/3$ [m³]
Ablösungen: $V=A\times H$ [m³/m']

Der Parameter V entspricht dem Volumen des Gesteinskörpers, A ist die Ausbruchsfläche und H die Höhe des Gesteinskörpers, welcher über der theoretischen Ausbruchslinie liegt. Fläche und Höhe wurden während der geologischen Ortsbrustaufnahme abgeschätzt.

Die oben beschriebenen Ereignisse erfolgten in der Regel unmittelbar nach der Sprengung (Abschlag) und während der Ortsbrustreinigung. Nur sehr selten traten Kluftkörper und partielles Versagen der Ortsbrust nach abgeschlossenem Einbau der Ausbruchsicherung auf (s. Kap. 10.3).

Der Unterschied zwischen Kleinsteinfall und Kluftkörper beruht auf dem Volumen des Gesteinskörpers. Der Kleinsteinfall wurde im Projekt als Ablösung von Gesteinsteilen im dm³-Bereich bis maximal 1 m³ aus dem Felsverband bezeichnet. Wenn die Volumen diesen Wert überschritten, wurden sie als Kluftkörper bezeichnet, unabhängig davon, ob sie in kleinere Stücke zerlegt wurden. Kleinsteinfall und Kluftkörper entstehen durch den Verschnitt von ungünstig liegenden Trennflächen mit dem Tunnelprofil und der darauf wirkenden Schwerkraft. Die Grösse der Blöcke hängt von der Orientierung, dem Abstand und dem Durchtrennungsgrad ab. Je grösser der Durchtrennungsgrad, desto grösser wird die Wahrscheinlichkeit der Kluftkörperbildung. Die am stärksten ausgesetzten Bereiche im CBT lagen angrenzend an Störungszonen und entsprachen jeweils zerschertem oder intensiv geklüftetem Gestein.

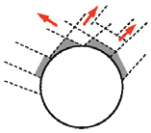
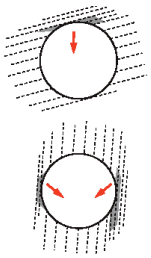
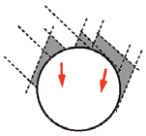
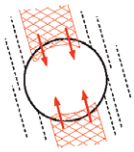
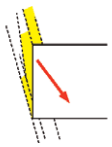
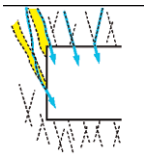
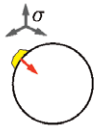
Mit dem Begriff Ablösungen (Tab. 10-1 und Fig. 10-5) werden die Ablösungen von Felsplatten definiert, die vorwiegend durch den Bruchmechanismus in Form von Zugversagen entlang der Trennflächen wie Schieferungs- oder Bruchflächen entstehen.

Entspannungs- und Bergschlag entstehen in der Regel dann, wenn die grösste Spannung am Ausbruchrand die Gebirgsfestigkeit überschreitet und die im Gestein gespeicherte Verformungsenergie in kinematischer Energie freigesetzt wird, welche Gebirgsteile schlagartig in den Hohlraum schleudert. Die freigesetzte Energie hängt von der Gebirgsüberlagerung, der Gesteinssteifigkeit und -festigkeit ab.

Beim Vortrieb Baulos Vigana wurden infolge der steilstehenden Strukturen bis zum Homogenbereich 1B nur lokal Ablösungen von geringem Ausmass (weniger als 1 m³/m') angetroffen. Bedeutend grösser war der Einfluss der Auflockerung, die in einigen Streckenabschnitten zu bedeutenden geologischen Überprofilen führte.

Beim Nordvortrieb Sigirino trat die Verteilung der trennflächenbedingten Ereignisse, mit Ausnahme von systematischem Kleinsteinfall, sehr unregelmässig auf. Insgesamt war die Verteilung der trennflächenbedingten Ereignisse zwischen den beiden Tunnelröhren ausgeglichen, auch wenn deren Anzahl in der Weströhre weniger intensiv ausfiel. Die Homogenbereiche 1Dbis–10C der nördlichen Ceneri-Zone, deren Schieferung die Tunnelachse mit einem grösseren Verschnittwinkel streicht (29–76°), waren hauptsächlich durch Kluftkörper und lokale Ablösungen geprägt. Ortsbrustinstabilitäten waren vorwiegend in den Störungszonen Val d'Isone (HB 10B) und Val Mara (HB 12Abis) anzutreffen. Die Ereignisse beim Vortrieb in der mittleren Ceneri-Zone (HB 10Cbis – 24+25bis) zeigen dagegen ein ganz anderes Bild mit einer progressiven Zunahme von Ablösungen im östlichen Kämpferbereich und Parament. Diese Zunahme verläuft gleichzeitig mit der zunehmenden Parallelität der Streichrichtung der Schieferung. Ortsbrustinstabilitäten waren gebunden an die Störungszonen im Homogenbereich 15Bbis. Zusätzlich zu den prognostizierten Gefährdungsbil-

Tab. 10-1: *Im Ausführungsprojekt definierte Gefährdungsbilder.*

Kleinsteinfall		Ablösen kleinerer Gesteinsteile aus dem Felsverband (Grössenordnung dm^3).
Auflockerung		Auflockerung des Gebirges durch Entspannung bei hohem Zerlegungs- und Durchtrennungsgrad. Dadurch werden schwerkraftbedingte Lasten von einigen Metern auf den Ausbau ausgelöst.
Ablösungen		Ablösen von Felsplatten oder Schalen in gneisig-schiefrigem Gebirge mit besonders hohem Glimmergehalt und glatt ausgebildeten Schieferungsebenen. Diese Ablösungen sind insbesondere an Ausbruchflächen parallel zur Schieferung zu erwarten und erreichen Stärken bis ein Meter.
Kluftkörper		Trennflächenbedingte Ausbildung von Bruchkörpern, welche sich aus dem Gebirgsverband lösen. Das Gefährdungspotenzial ist abhängig von der Anzahl und Orientierung der Trennflächensysteme, dem Abstand der einzelnen Trennflächen und deren Eigenschaften (Grössenordnung m^3).
Plastische Verformungen		Plastische Verformungen am Ausbruchrand, bedingt durch spannungsbedingte Entfestigung bzw Plastifizierung des Gebirges.
Ortsbrustinstabilität		Partielles oder vollständiges Versagen der Ortsbrust infolge Kluftkörper oder gestörtem Gebirge.
Wassereinbruch		a) Wassereinbruch in den Tunnel aus Klüften oder aufgelockertem Gebirge. b) Wassereinbruch in den Tunnel mit Erosion von Material (Schlammeinbruch), z.B. in Störungszonen.
Entspannungs- und Bergschlag		Schlagartige, durch Sprödbruch entstehende Ablösungen in massigem Gebirge infolge hoher Primärspannungen (z.B. bei hoher Gebirgsüberlagerung). Während der Ausführungsphase wurde für den CBT ein Konzept zur Dokumentation und Massnahemnplanung von Entspannungs- und Bergschlägen erstellt, welches Entspannungschläge mit unterschiedlicher Intensität (Stufe D0–D2) und Bergschläge (Stufe D3) unterscheidet (Kap. 11.4.1 und Tab. 11-3).

dern wurde in Streckenabschnitten mit einer Gebirgsüberlagerung von mehr als 500 m eine Vielzahl von Entspannungsschlägen, vorwiegend im Ceneri-Ortho- und -Paragneis mit isotroperem Gefüge, festgestellt.

Die Ereignisse in der südlichen Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie (HB 26A – HB 30B) waren ebenfalls geprägt durch die typischen Ereignisse im «Subparallelismus», mit Ablösungen im östlichen Kämpferbereich und Parament. Bedingt durch die ungünstigen geotechnischen Eigenschaften des Zweiglimmergneises und Glimmerschiefers der Giumello-Gneis-Formation, bewirkte die Auflockerung im Verhältnis zum Ceneri-Paragneis höhere Verformungen. Das Phänomen der Entfestigung entstand durch das «Aufblättern» der glimmerreichen Lagen entlang der Schieferung im Gestein mit zunehmender tangentialer Gebirgsspannung; es konnte lokal durch das Ausknicken der steilstehenden Schieferung im Parament beobachtet werden (Fig. 10-1).

Fig. 10-1: Auflockerung im östlichen Parament in der Sanierungsstrecke nördlich der CAOP, Weströhre km 336.033 (Foto IG ITC).

Während den Vortriebsarbeiten der Logistikkaverne CAOP waren ebenfalls die Trennflächen (Störungen und Schieferung) massgebend für die Entstehung der jeweiligen Ereignisse.

Zusätzlich zu den trennflächenbedingten Ereignissen traten Auflockerungen begleitet von plastischen Verformungen auf, welche sich in einer sekundären Phase als langzeitanhaltende Verformung bemerkbar machten (s. Kap. 9.5.3, 10.3.6, 10.3.7).

Die Durchörterung der Val-Colla-Linie stand in Zusammenhang mit den Strukturen und petrographischen Eigenschaften des Gebirges. So erzeugten Ablösungen und Kluftkörper im Randbereich des Homogenbereichs 30A grössere geologische Überprofile vorwiegend im östlichen Parament und Kämpfer. Im Störungsbereich nahmen Auflockerung und lokal plastische Verformung intensiv zu.

Verformungen infolge Gebirgsdrucks hatten ab dem Homogenbereich 31 in der Val-Colla-Zone mit Ausnahme im Verzweigungsbauwerk Sarè keine bautechnische Relevanz. Systematischer Kleinsteinfall, Kluftkörper und Ablösungen, festgestellt in Abhängigkeit der Schieferungsorientierung, waren die bedeutendsten Ereignisse ausserhalb von Sarè. Mit zunehmendem Ausbruchquerschnitt wurden insbesondere in Scher- und Störungszonen zunehmende Verformungen gemessen. Die Auflockerung begünstigte aber auch die Bildung von Überprofilen im Kalottenbereich und in der Ortsbrust (s. Kap. 10.3.11 und 11.4.7–11.4.9). Wegen der flach orientierten und welligen oder leicht gefalteten Schieferung war die Profilerhaltung beim grösseren Ausbruchquerschnitt in den Kavernen Sarè oft schwierig und begünstigte Ablösungen oder sargdeckelförmige Kluftkörper (Fig. 10-2).

Beim Vortrieb Vezia (HB 45A) traten systematisch Kleinsteinfall und lokal Kluftkörper im Profil auf. Auf Streckenabschnitten mit bergwärts ausfallender Schieferung traten lokale Ortsbrustinstabilitäten mit Herausgleiten von kleinvolumigen Kluftkörpern auf. Ablösungen in der Kalotte waren selten und traten nur im Zusammenhang mit flachen Störungen und Schieferung auf.

10.2 Ereignisse beim Tunnelvortrieb

Das folgende Kapitel beschreibt einzelne angetroffene Ereignisse anhand von Fallbeispielen.

10.2.1 Kleinsteinfall und Kluftkörper

Kleinsteinfall (Fig. 10-2) trat beim Vortrieb systematisch auf, und dessen Intensität hing mit dem jeweiligen Arbeitsschritt des Arbeitszyklus zusammen. Die Einstufung von Kleinsteinfall und Kluftkörper erfolgte nach Möglichkeit immer nach der Felsreinigung.

Fig. 10-2: a) Ortsbrust im Stabbiello-Gneis mit Kleinsteinfall in der Kalotte unmittelbar nach dem Abschlag, Oströhre km 240.256. b) Sargdeckelförmiger Kluftkörper im Stabbiello-Gneis km 242.192, Auflockerung im östlichen Parament in der Sanierungsstrecke nördlich der CAOP, Weströhre km 336.033, H = 0,9 m, V = 3 m³, mit Schieferungsorientierung 270/20 (Fotos IG ITC).

Figur 10-3 fasst alle angetroffenen Kluftkörper nach Geometrie und Position im Tunnelprofil zusammen.

Beim Vortrieb Vigana lagen die Volumen der Kluftkörper, mit Ausnahme eines Ereignisses in der Kaverne Ost, im Streubereich zwischen 1–10 m³ und hatten Höhen von 0,2–1,0 m. Die Kluftkörper in den Homogenbereichen 1Abis, 1B, 1D und 1Dbis hatten mit bis zu 15 m³ etwas höhere Volumen. Die Höhen hatten eine Streubreite von 0,5–2 m. In der Kaverne Ost bei km 227.609 ereignete sich in der Kalotte entlang von Trennflächen ein pyramidenförmiger grossflächi-

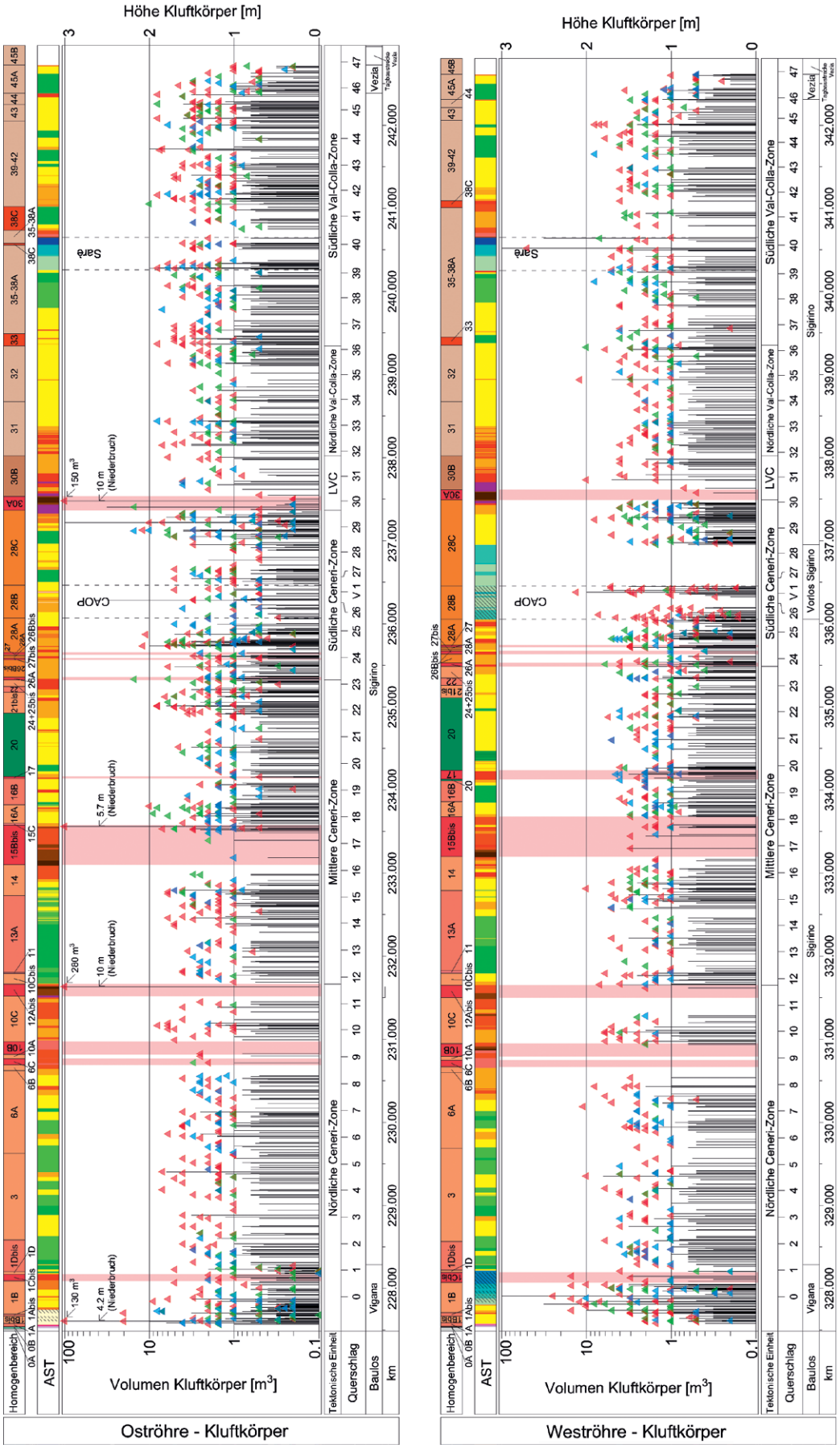


Fig. 10-3: Verteilung der beobachteten Kluftkörper entlang der beiden Tunnelröhren nach Position im Tunnelprofil mit Gegenüberstellung der geologischen Formationen und eingebauter Ausbruchsicherung. Die Farben der Homogenbereiche und der Ausbruchsicherung entsprechen der allgemeinen Legende im Anhang 13-a und 13-c.

ger Niederbruch mit einer Höhe von 4,2 m und einem Volumen von 130 m³. Dieser ist dem Bereich gehäufter Störungszonen im Homogenbereich 1Bbis zuzuordnen.

Die Analyse der Kluftkörper beim Nordvortrieb Sigirino zeigte einen Streubereich mit Volumen bis zu 10 m³ (Niederbrüche ausgeschlossen). Im Normalfall betrugen die Volumen zwischen 1–4 m³ mit Höhen unter 1 m.

Beim Südvortrieb liegt der Trend der Kluftkörpervolumen im Bereich zwischen 1–2 m³, vereinzelt in Störungszonen bis 8 m³ (Niederbruch Val-Colla-Linie ausgeschlossen). Es fällt auf, dass die Volumen der Kluftkörper beim Südvortrieb kleiner als beim Nordvortrieb ausfielen. In der Kaverne Sarè West liess sich ein Trend zu zunehmenden Volumen mit der Aufweitung des Tunnelquerschnittes beobachten, wonach im Anschluss eines 50 m³ grossen, pyramidenförmigen Niederbruchs (10.3.11) der Kalottenvortrieb unterteilt wurde (11.4.7).

Für die Kluftkörper beim Gegenvortrieb Vezia zeigte sich ein ähnliches Bild wie beim Südvortrieb Sigirino. Die Volumen betrugen 1–2 m³ mit Höhen von 0,2–1 m.

Aus der Verteilung der Kluftkörper in Figur 10-3 geht hervor, dass besonderes im Portalbereich Vigana sowie in den Störungszonen die Kluftkörpervolumen höhere Werte erreichten, als in den übrigen Streckenabschnitten. In Vigana traten die grösseren Kluftkörpervolumen dort auf, wo der Ausbruchquerschnitt der Kavernen und die Wasserzutritte zunahmen. Die Gebirgszerklüftung, die durch den Gletscherrückzug und der damit verbundenen Entlastung an den Talflanken der Magadinoebene geprägt wurde, wirkte sich ebenfalls stark auf die Bildung von Kluftkörpern beim Vortrieb aus. Da keine erkennbare Korrelation zwischen Kluftkörpern und den unterschiedlichen Lithologien besteht, lassen sich keine Kluftkörpervolumen ableiten. Die systematisch gemessenen und vergüteten geologischen Überprofile (Totalvolumen von Kluftkörpern und Ablösungen) im geologischen-bautechnischen Längenprofil (Taf. I) bestätigen die oben beschriebenen Beobachtungen. Werden die Ablösungen mit einem geschätzten durchschnittlichen Volumen von 0,5 m³ (Erfahrungswert aus den Ortsbrustaufnahmen im «Subparallelismus», dargestellt in Fig. 10-6) im Streckenabschnitt der Homogenbereiche 20–28C vom geologischen Überprofil abgezogen, so resultieren Kluftkörpervolumen, die sich vom restlichen Trend in der Ceneri-Zone kaum unterscheiden lassen.

10.2.2 Auflockerung, Ablösungen und plastische Verformungen

Die Auswertung der Verformungs- und Extensometermessungen beim Vortrieb Vigana gaben trotz des hohen Zerklüftungsgrades des Gebirges, das stellenweise von einer hohen Wasserdurchlässigkeit geprägt war, keine Anzeichen für grössere Auflockerungen um den Hohlraum.

Die Auflockerungstiefe lässt sich ohne Extensometermessung nicht exakt ermitteln. Sie kann aber anhand der Verformungsmessungen in Zusammenhang mit den Gebirgseigenschaften abgeschätzt werden. Extensometermessstellen wurden nur in Störungszonen oder in Streckenabschnitten mit geotechnischen Schwierigkeiten, wie z.B. in der Logistikkaverne CAOP oder im Verzweigungsbauwerk Sarè, eingebaut. Aus diesem Grund konnte die Auflockerung entlang beider Tunnelröhren nur qualitativ beschrieben werden.

Die Erfahrungen aus den 3D-Verformungsmessungen im Tunnel zeigten, dass die Entfestigung des Gesteins nicht nur vom Zerscherungs- und Durchtrennungsgrad, sondern auch von der zur Tunnelachse schleifenden Schieferungsorientierung («Subparallelismus») zusammenhing (s. Gegenüberstellung 3D-Verformung und Zerscherungsgrad in Taf. I, sowie die Themen über die asymmetrische Verformung in Kap. 9.5 und 11.4.4). Daraus lässt sich indirekt folgern, dass die Auflockerung ausserhalb des «Subparallelismus» in der Ceneri-Zone und der Val-Colla-Zone im intakten Gestein bautechnisch keine Relevanz hatte.

Beim Vortrieb der CAOP ereigneten sich, im Vergleich zur restlichen Strecke, grössere Ablösungen in der südlichen Ceneri-Zone. Es handelte sich um lokale Ereignisse, bei denen sich Gesteinspakete mit einem hohen Zerscherungs- und Durchtrennungsgrad häufig in Zusammenhang mit Störungszonen ablösten. Zwischen Januar und Februar 2008 konnte beim Ausbruch des Kreuzungsbereiches zwischen CPS und RA eine relevante 2 m hohe Ablösung mit einem Volumen von 15–20 m³ beobachtet werden. Die Ursachen waren hauptsächlich auf die fortschreitende Auflockerung und damit einhergehende Entfestigung der stark durchtrennten Gesteinsmasse zurückzuführen. Die zur Schieferung subparallel und zur Tunnelachse tangential verlaufende Störungszonen verschlechterten die Felsverhältnisse genau auf dem Streckenabschnitt mit grossem Ausbruchquerschnitt in der CAOP. Durch den etappenweisen Ausbruch in Kalotte und Strosse stellte sich erst im Nachhinein heraus, dass eine Ankerlänge von 8 m der Auflockerung im Kreuzungsbereich zu wenig entgegenhielt und bis nach Abschluss der Sanierungs- und Verstärkungsmassnahmen lang anhaltende Verformungen verursachte, bei der die Ausbruchsicherung lokal beschädigt wurde.

Ein gleiches Ereignis mit einer Gesteinsablösung von 60 m³ zeigte sich im Verlaufe des Ausbruchs der Kaverne für die Betonherstellung (CPC), beim Tm 33 im westlichen Parament.

Im Verzweigungsbauwerk Sarè, ab einem Ausbruchquerschnitt grösser als 178 m² (Kavernendurchmesser 18 m), reichte die Auflockerung, hergeleitet aus den Ergebnissen der Extensometermessungen, mehr als 12 m in das Gebirge hinein (Fig. 10-4). Die Auflockerung wurde auf Streckenabschnitten mit Glimmergneis und -schiefer, flach orientierter und welliger Schieferung und höherem Zerscherungsgrad begünstigt. Nach dem Abschlag der Kalotte fanden vorerst im Firstgewölbe Ablösungen parallel zur flachen Schieferung statt, die im stark anisotropen Gebirge zu Verformungen durch Biegung führten. Diese Verformungen genügten bereits bei zerschertem Gestein (kataklastische oder kakiritische Störung) mit Zugfestigkeiten von weniger als 1 MPa, um eine Entfestigung des Gebirges zu generieren.

Ablösungen traten häufig und intensiv an der Stelle auf, wo die Schieferung eine tangentiale Streichrichtung zum Ausbruchprofil aufweist, wie z.B. zwischen Kalotte und östlichem Kämpferbereich (Fig. 10-5). Die Ereignisse wurden mit Ortsbrustaufnahmen erfasst und sind in Figur 10-6 dargestellt. Die Volumen der Ablösungen sind im Diagramm

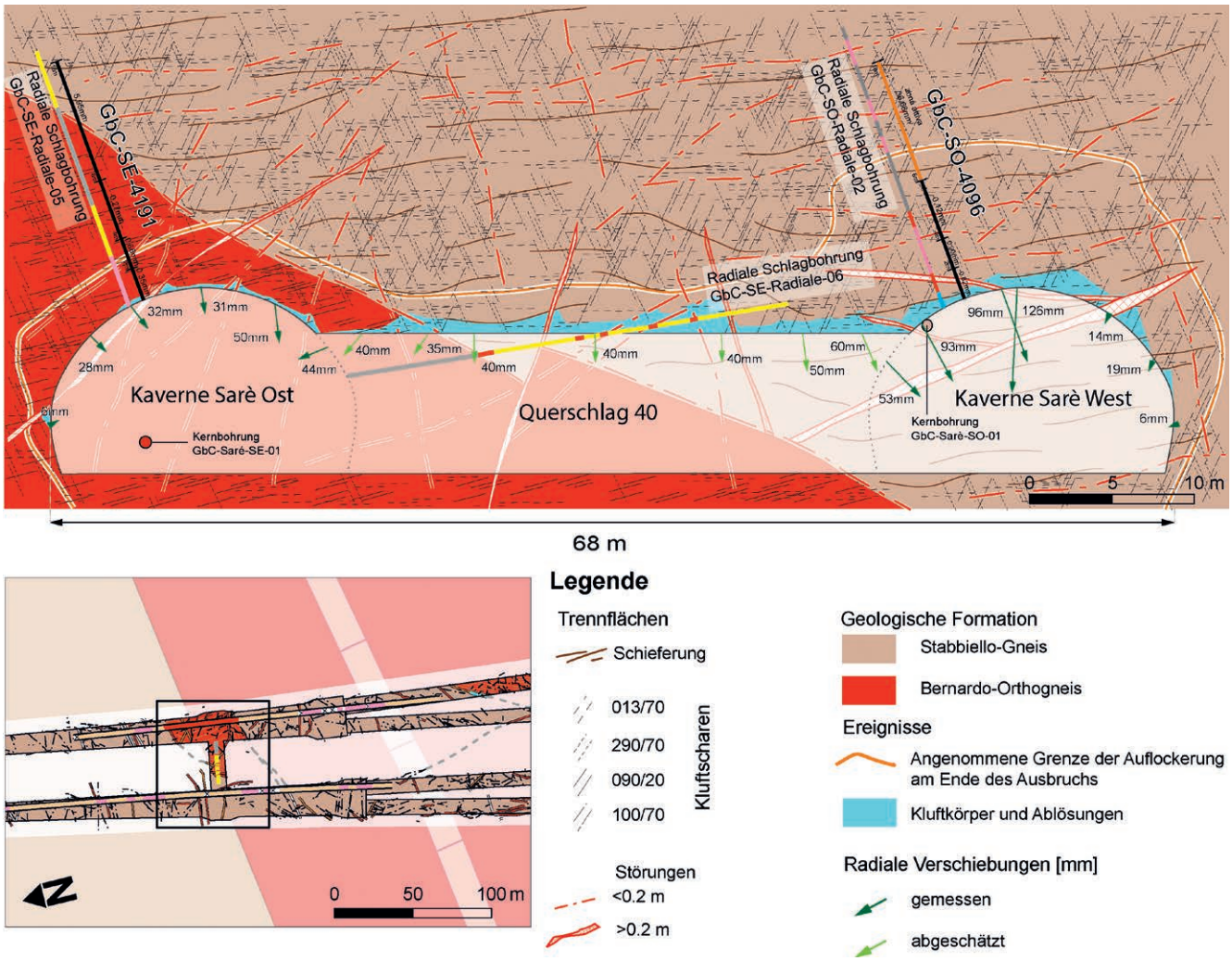


Fig. 10-4: Das geologisch-geotechnische Modell im Kreuzungsbereich des Querschlags 40 im Verzweigungsbauwerk Sarè zeigt mittels Extensometermessungen die Entfestigung des Gebirges in Abhängigkeit der Gesteinsanisotropie, welche von unterschiedlichen Gesteinsformationen, wie Stabbiello-Gneis und Bernardo-Orthogneis beeinflusst ist.

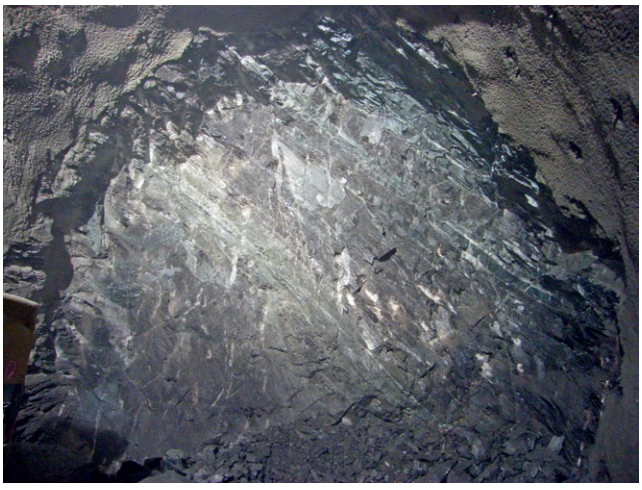


Fig. 10-5: Ablösung von 1 m³/m' Gestein im östlichen Kämpferbereich der Oströhre bei km 234.743 mit Bänderamphiboliten in der Ortsbrust (Foto IG ITC).

in Kubikmeter pro Laufmeter (m³/m') ausgedrückt, was ermöglichte, auf der Baustelle die Intensität der Ablösungen quantitativ besser einzuschätzen.

Ablösungen erfolgten ausschliesslich in Streckenabschnitten mit tangentialer Streichrichtung der Schieferung zum Vortrieb zwischen der Ceneri-Zone und in der südlichen Val-Colla-Zone mit subhorizontaler Schieferung. Die Volumen der Ablösungen schwankten zwischen 1–15 m³/m' und erreichten Höhen zwischen 0,2–1,0 m. Die Verteilung in Figur 10-6 zeigt eine leicht grössere Häufigkeit in der Weströhre als in der Oströhre.

Die Homogenbereiche 1B–1D waren beim Vortrieb Vigana in beiden Tunnelröhren von Ablösungen im Firstgewölbe geprägt, mit Volumen zwischen 1,2–15 m³/m'.

Ebenfalls im östlichen Kämpferbereich, aber mit kleineren Volumen bis zu 5 m³/m', traten Ablösungen in der nördlichen und mittleren Ceneri-Zone beim Nordvortrieb Sigirino auf. In der Umgebung der Störungszone Gola di Lago waren zwischen den Homogenbereichen 14 und 16A regelmässig Ablösungen im östlichen Kämpferbereich zu erkennen. Während die Volumen ab dem «Subparallelismus» in der südlichen Ceneri-Zone bis zu 10 m³/m' gegenüber dem vorherigen Streckenabschnitt der Ceneri-Zone deutlich zu-

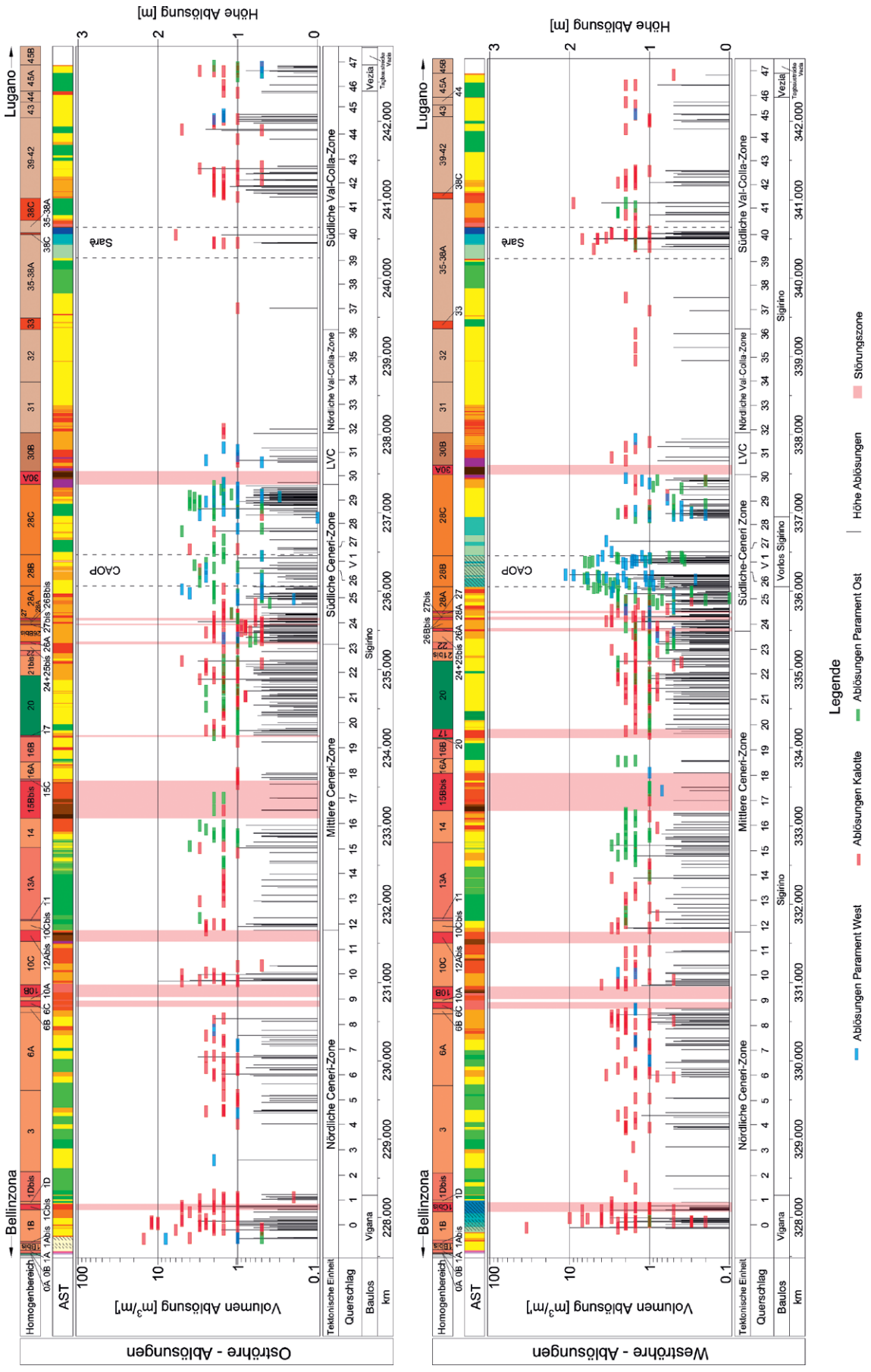


Fig. 10-6: Verteilung der beobachteten Ablösungen entlang der beiden Tunnelröhren nach Position im Tunnelprofil mit Gegenüberstellung der geologischen Formationen und eingebauter Ausbruchsicherung. Die Farben der Homogenbereiche und Ausbruchsicherung entsprechen der allgemeinen Legende im Anhang 13-a und 13-c.

nahmen, waren Ablösungen in der Val-Colla-Zone zwischen dem Homogenbereich 31 und dem Verzweigungsbauwerk Sarè selten anzutreffen. Mit Eintreten der flachen und welligen Schieferung ab dem Homogenbereich 33 erreichten die Ablösungen in der Kalotte der Kavernen Sarè Volumen bis zu 10 m³/m'.

Plastische Verformung war gemäss Prognose am häufigsten im Bereich von Störungszonen mit ungünstigen geomechanischen Eigenschaften (Tab. 10-1) zu erwarten. Anhand einzelner Extensometern und den systematischen 3D-Verformungsmessungen konnten in den Störungszonen der Ceneri-Zone und Val-Colla-Linie sowie im «Subparallelismus» zeitlich lang anhaltende Verformungen (Kap. 9.5, 11.4.6) nachgewiesen werden, die durch die langsame Entfestigung des Gebirges um den Hohlraum erzeugt wurden. Die Verformungen werden durch die geomechanischen Eigenschaften des Gebirges im Verhältnis zu den vorhandenen Spannungen bestimmt. Beim Vortrieb des Zwischenangriffsdispositivs zeigten die sieben Extensometer, verteilt in den Logistikkavernen und der Kaverne, für die Betonanlage minimale plastische Verformungen zwischen 5 und 30 mm.

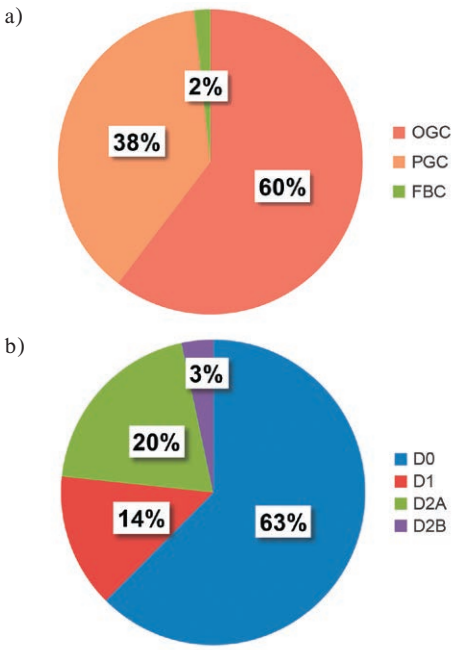


Fig. 10-7: a) Statistische Verteilung der Entspannungsschläge nach Gesteinsformation und b) nach Intensität.

10.2.3 Entspannungsschläge

Zwischen dem 09.07.2012 und dem 28.07.2014 kam es bei den Vortriebsarbeiten Sigirino in Richtung Norden regelmässig zu bergschlagähnlichen Erscheinungen und Entspannungsschlägen mit geräuschvollen Entlastungen oder Ablösen von kleinen Gesteinsplatten (s. Sprachregelung CBT Kap. 11.4.1).

Entspannungsschläge der Stufe D0-D2B traten vorwiegend ab einer minimalen Gebirgsüberlagerung von 500 m und hauptsächlich im Ceneri-Orthogneis und Ceneri-Paragneis, ab Ende der nördlichen Ceneri-Zone bis Anfang der mittleren Ceneri-Zone (HB 10C–15C, Fig. 10-8) auf. Die Energie der erfassten Ereignisse war gering bis mittel bei Stufe leichter bis starker Entspannungsschlag (Stufe D0-D2B). Die Abstufung D2A/D2B definiert den Übergang zu Entspannungsschlägen mit bautechnischer Relevanz (Verbiegen der Ankerplatten, Rissbildung und Abplatzungen im Spritzbeton, s. Tab. 11-3). Am häufigsten ereigneten sich Entspannungsschläge der Stufe D0 (Fig. 10-7). Statistisch konnte keine direkte Korrelation zwischen der Gebirgsüberlagerung und der Intensität von bergschlagähnlichen Erscheinungen festgestellt werden. Anhand Figur 10-8 ist zu erkennen, dass in der Weströhre die Entspannungen insge-

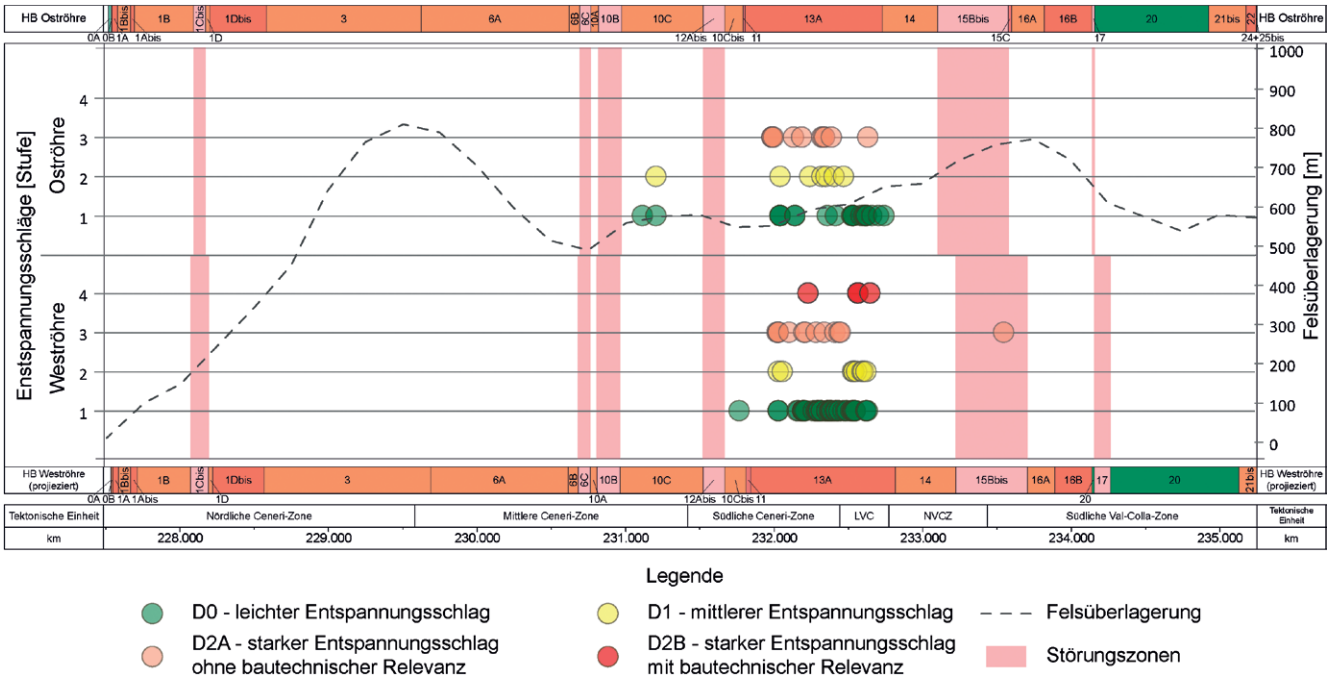


Fig. 10-8: Übersicht der dokumentierten Entspannungsschläge im Nordvortrieb Sigirino, der Felsüberlagerung und den angetroffenen Lithologien gegenübergestellt.

samt etwas häufiger und intensiver auftraten. Die Weströhre liegt in diesem Streckenabschnitt hangseitig, was erfahrungsgemäss tendenziell zu geringeren Entspannungen des Gebirges führt. Es kann sein, dass das Gebirge durch den vorauseilenden Vortrieb der Weströhre weniger gestört war und dies deshalb zu häufigeren Entspannungsschlägen führte.

Das Gefährdungsbild/Ereignis Entspannungsschlag war in der Prognose nicht enthalten. Basierend auf den Erkenntnissen des Gotthard-Basistunnels (GBT), erarbeitete die öBL ein Konzept mit einer Abstufung der Entspannungsschläge zur entsprechenden Festlegung von Massnahmen (Kap. 11.4.1).

10.2.4 Ortsbrustinstabilität

Die Ortsbrustinstabilität wird als das partielle oder vollständige Versagen der Ortsbrust zufolge des entfestigten Gebirges definiert. Beim Vortrieb im CBT liessen sich drei Mechanismen von Ortsbrustversagen unterscheiden (Fig. 10-12): Abgleiten von Gesteinsplatten und -blöcken, Kluftkörper und Nachbrechen von kohäsionslosem Gestein (Fig. 10-9, 10-11).

Fig. 10-9: Abgleiten von Gesteinsplatten (V=10 m³) im Zweiglimmergneis der Ceneri-Paragneis-Formation, Oströhre km 229.172 (Foto IG ITC).

Abgleitende Gesteinsplatten und -blöcke traten vor allem beim Vortrieb mit bergwärts ausfallender Schieferung auf, wie in der nördlichen Ceneri-Zone, im Südteil der Val-Colla-Linie und im Homogenbereich 31 der nördlichen Val-Colla-Zone.

Kluftkörper in der Ortsbrust waren im Ceneri-Orthogneis kaum anzutreffen. Allgemein trat in dieser Formation selten eine Ortsbrustinstabilität auf.

Das gravitationsbedingte Nachbrechen der Ortsbrust geschah meistens in Störungszonen in einem kohäsionslosen und zerbrochenen/zerklüfteten Gebirge (Fig. 10-11), das wegen den ungünstigen Verhältnissen maschinell mit dem Abbauhammer vorgetrieben wurde. Gebirgsverformung, Gesteinsgefüge und -festigkeit bestimmen das Ablösen. Es wurde durch die Porenwasserspannung bei Bergwasserzutritten oder Vortriebsarbeiten (Bohren oder Benetzen der Ortsbrust) begünstigt (Fig. 3-34 b). Das Nachbrechen der Ortsbrust begann entlang von vorhandenen Schwachstellen, meistens im Firstbereich oder entlang von Trennflächen in der Ortsbrust, und erfolgte schubweise (s. dazu auch die Ereignisse Niederbrüche Kap. 10.3).

Fig. 10-10: Kluftkörper (V=10 m³) im Zweiglimmerschiefer (Ceneri-Paragneis), Oströhre km 229.706. Bergwärts aussfallende Schieferung 190/40 (Foto IG ITC).

Fig. 10-11: Nachbrechen von kohäsionslosem Gestein in der kataklastisch-kakiritischen Störungszone Val Mara (HB 10B), Weströhre km 330.911 (Foto IG ITC).

Beim Vortrieb Vigana war die Ortsbrust auf Streckenabschnitten mit bergwärts ausfallender Schieferung häufig durch die Bildung von platten- bis tafelförmigen Gleitkörpern geprägt und beeinflusste dadurch die Stabilität der Ortsbrust in den Homogenbereichen 0B, 1A, 1Abis, 1Bbis. Die Gleitkörper hatten Volumen von bis zu 3 m³, in der Kaverne Ost lokal von bis 15 m³. Die durch Kluftscharen begünstigten Mehrausbrüche in der Ortsbrust waren kleiner und erreichten Volumen zwischen 0,5 und 4 m³. Die Ortsbrust brach in kakiritschen Störungszonen bei Vorhandensein von Bergwasser häufiger nach. Die grössten Nachbrüche erreichten Volumen bis zu 30 m³.

Im Streckenabschnitt Nordvortrieb Sigirino kam es in beiden Röhren zu einer ähnlichen Verteilung der Ereignisse. Ein Nachbrechen der Ortsbrust war während der Durchörterung von Störungszonen auf die Homogenbereiche 6C, 10B, 12Abis, 15Bbis und 17 beschränkt. Abgleiten von Gesteinsplatten aus der Ortsbrust ereignete sich im Zusammenhang mit bergwärts ausfallender Schieferung in der nördlichen Ceneri-Zone. Die Volumen der Gleitkörper lagen zwischen 1 und 5 m³. Im Randbereich der Störungszonen der Homo-

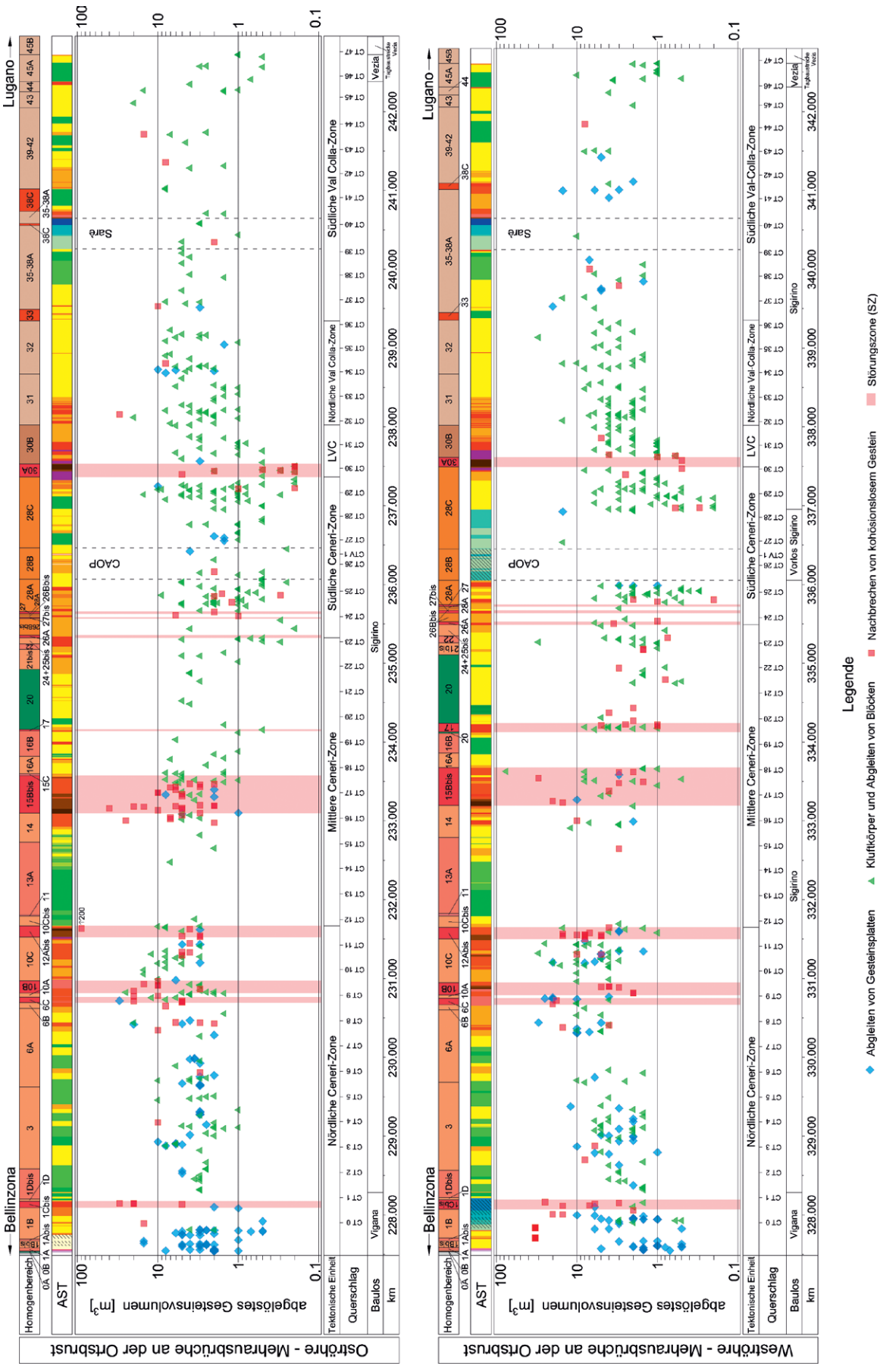


Fig. 10-12: Verteilung der beobachteten Ortsbrustinstabilitäten entlang der beiden Tunnelröhren, mit Gegenüberstellung der geologischen Formationen und eingebauter Ausbruchsicherung. Die Farben der Homogenbereiche und Ausbruchsicherung entsprechen der allgemeinen Legende im Anhang 13-a und 13-c.

genbereiche 6B – 12Abis war eine Volumenzunahme mit Volumen bis 10–30 m³ feststellbar.

Nachbrechen durch Kohäsionsverlust mit maximalen Volumen bis 30 m³ fand in den Tunnelabschnitten mit Störungszonen von Homogenbereich 10bis bis 15Bbis statt. Ab der mittleren Ceneri-Zone, Richtung Süden, nahm das Nachbrechen deutlich ab. Die durch Nachbrechen entstandenen Volumen wurden deutlich kleiner und betrugen 2 bis 5 m³.

Ab der südlichen Ceneri-Zone bis zum Portal Vezia waren Ortsbrustinstabilitäten, hervorgerufen durch Nachbrechen oder Gleitkörper, selten. Dafür traten hauptsächlich Kluftkörper auf. Diese Erkenntnis lässt sich mit der zur Tunnelachse parallellen Streichrichtung des Giumello-Gneis und den Störungszonen mit geringeren Mächtigkeiten erklären. Während der Ausbrucharbeiten der Logistikkavernen CAOP wurden keine besonderen Ortsbrustinstabilitäten festgestellt.

Das durchschnittliche Volumen der Kluftkörper in der Ortsbrust beim Südvortrieb Sigirino lag bei 3,5 m³, z.T. wurden Höchstwerte von 30 m³ erreicht. Die lokal aufgetretenen Gleitkörper korrelieren mit der bergwärts ausfallenden Schieferung in der Val-Colla-Linie und -Zone. In der Val-Colla-Linie begünstigten beim Vortrieb kakiritische Störungszonen des Homogenbereichs 20A die Nachbrüchigkeit der Ortsbrust. Das für Ankerbohrungen und zur Staubbekämpfung verwendete Wasser verringerte in einigen Fällen die Gesteinsfestigkeit des Felsverbandes, was zu einem erleichterten Nachbrechen führte. Deshalb wurde der Gebrauch von Wasser beim Vortrieb auf das Notwendigste reduziert. Das Volumen der Nachbrüche variierte zwischen 1–10 m³.

Im Tunnelabschnitt Vezia kam es gelegentlich zu keilförmigen Kluftkörpern in Bereichen mit in Vortriebsrichtung einfallenden Scherzonen mit Volumen zwischen 1 und 2 m³.

10.2.5 Wassereinbruch

Das Ereignis Wassereinbruch, welches in der Prognose als «Wassereinbruch in den Tunnel aus Klüften oder aufgelockertem Gebirge» definiert war, hat sich nicht ereignet. Beim Vortrieb im Portalbereich Vigana hingegen erfolgten zahlreiche Wasserzutritte (Kap. 5.1), die teilweise den Einbau der Ausbruchsicherung behinderten, indem das vorhandene Bergwasser das Aushärten des Mörtels der Mörtelanker und des Spritzbetons verzögerten. Darüber hinaus reduzierte das Bergwasser die Kohäsion der Trennflächen und begünstigte zusätzlich ein Herausgleiten von Kluftkörpern. In Störungszonen verringerte das eingesickerte Wasser die Scherfestigkeit des feinkörnigen Materials zusätzlich, wodurch das Versagen der Ortsbrust begünstigt wurde (Fig. 3-34b).

10.2.6 Vergleich zwischen Prognose und Befund

Der Befund zeigt, dass die Ereignisse Kleinsteinfall, Kluftkörper, Ablösungen und Auflockerung sowohl im ungestörten Fels als auch in Störungszonen hauptsächlich auf Strukturen des Gebirges und dessen Durchtrennungsgrad zurückzuführen waren. Es wurden nur lokal plastische Verformungen im Bereich von Störungszonen beobachtet. Insgesamt entspricht der Befund mehrheitlich der Prognose mit Ausnahme der Randbereiche der Störungszonen. In der Prognose wurden für die Randbereiche Kleinsteinfall, Ablösungen und Auflockerung deutlich unterschätzt.

Spannungsbedingtes Versagen des Gebirges trat nur auf kurzen Streckenabschnitten im Ceneri-Paragneis oder im Ceneri-Orthogneis in Form von Entspannungsschlägen auf und war bautechnisch wenig bedeutend. Die Entspannungsschläge, welche nicht prognostiziert waren, verursachten während der Vortriebsphase einen Mehraufwand für die Erarbeitung eines Konzeptes, welches die Dokumentation, zu treffende Massnahmen und die Schulung der Belegschaft beinhaltete, damit die Sicherheit beim Vortrieb zu jeder Zeit gewährleistet war.

Kleinsteinfall wurde systematisch in allen Bereichen des CBT angetroffen. Die Intensität hing von der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins, der Gebirgsdurchtrennung und der Vortriebsrichtung gegenüber den Trennflächen ab. Wie prognostiziert, war die Häufigkeit von Kleinsteinfall in den Störungszonen mittel bis hoch, ausserhalb mittel. Die Häufigkeit war in den Randbereichen der Störungszonen höher als prognostiziert.

Der höchste Auflockerungsgrad von mittel bis hoch wurde in den Homogenbereichen mit Störungszonen angetroffen, was die Prognose widerspiegelt. In den übrigen Streckenabschnitten variierte der Grad der Auflockerung je nach strukturellem Bereich zwischen gering und mittel.

In der nördlichen Ceneri-Zone war die Häufigkeit der Ablösungen teilweise höher als in der Prognose, während im «Subparallelismus» in der mittleren Ceneri-Zone und in den Störungszonen eine kleinere Häufigkeit eingetreten ist.

Kluftkörper in den Störungszonen wurden in der Prognose (hoher Grad) überschätzt, denn im Befund waren sie insignifikant bis gering. Im Allgemeinen entsprach die Verteilung der Kluftkörper über die gesamte restliche Strecke einer kleineren Häufigkeit als prognostiziert.

Plastische Verformung trat vorwiegend in den bautechnisch relevantesten Störungszonen (s. HB 12Abis, ITZ und Val-Colla-Linie) oder in stark aufgelockerten Streckenabschnitten (Randbereiche von Störungszonen) auf. Der angetroffene Grad der plastischen Verformung war kleiner als prognostiziert wurde. Verformungen über längere Zeitabschnitte waren ein Hinweis auf aufgelockerte Bereiche mit plastischer Verformung und damit einhergehender Gebirgsentfestigung und Auflockerung. Die Quantifizierung der Auflockerungstiefe und plastischen Verformung war nur mit Hilfe von Extensometermessstellen möglich.

In der Prognose wurde die Ortsbrustinstabilität für die Homogenbereiche mit Störungszonen überschätzt, während sie für die übrigen Abschnitte, vor allem für den Streckenabschnitt der nördlichen Ceneri-Zone und teilweise in der südlichen Ceneri-Zone im «Subparallelismus», leicht unterschätzt wurde.

Das Gefährdungsbild Entspannungs- und Bergschlag war im ganzen Vortrieb des CBT als insignifikant eingestuft worden. Aufgrund der relativ kleinen Gebirgsüberlagerung und der vorhandenen Anisotropie des Ceneri-Orthogneises, waren während der Erkundung im Vorfeld der Prognose ins-

besondere für die mittlere Ceneri-Zone, keine Kriterien für dieses Gefährdungsbild erkennbar gewesen.

Die grössten Bergwasserzutritte mit Schüttungen von 11,4–17,1 l/s/km respektive 10 l/s/km wurden in den Störungszonen der Homogenbereiche 7 und 12A erwartet. Sie wurden während der Durchörterung nicht erreicht, Wassereinbrüche wurden keine angetroffen.

10.3 Spezielle geotechnische Probleme und Ereignisse

Dieses Kapitel beschreibt die grössten geo- und bautechnischen Ereignisse, die den Vortrieb beeinträchtigten. Zudem werden jeweils die angewendeten lösungsorientierten Bauhilfsmassnahmen aus geologisch-geotechnischer Sicht erläutert. Während der Vortriebsarbeiten im CBT traten insgesamt drei Niederbrüche auf, welche zu einem Unterbruch des Vortriebes führten. Diese befanden sich alle in der Oströhre des Bauloses Sigirino.

10.3.1 Niederbruch Val Mara Oströhre km 231.633 (02.02.2014)

Mit den Erfahrungen der vorauseilenden Weströhre beim Nordvortrieb in der Val-Mara-Störungszone (HB 12Abis, Fig. 11-23) wurde die Ausbruchsicherung in der gegenüberliegenden Oströhre in der gleichen Lithologie bei km 231.662 von SPV 4 auf SPV 6A mit TH-Stahlbögen verstärkt. Nach der Verschlechterung der Felsverhältnisse bis km 231.626 (01.02.2014) folgten zusätzliche Bauhilfsmassnahmen mit Spiessschirm über der Kalotte und einer Unterteilung der Ortsbrust in drei Etappen. Am 02.02.2014 begann sich das Gestein in der dritten Etappe kontinuierlich zu lösen, bis sich innerhalb von zehn Minuten ein 280 m³ grosses Haufwerk ansammelte (Fig. 10-13).

In Figur 11-23 kann der Beginn der 145 m mächtigen Val Mara Störungszone erkannt werden, die ab km 231.666 das Tunnelprofil erreicht, und mehrere verfächerte tektonisierte Streckenabschnitte in der Ceneri-Paragneis-Formation mit sich bringt. Diese tektonisierten Streckenabschnitte bestanden aus steil einfallenden kataklastischen Störungszonen mit einer Neuausrichtung der Hauptschieferung von 170–190/75–85 in der nördlichen Ceneri-Zone. Zum Zeitpunkt des Niederbruchs befand sich die Ortsbrust in einer dieser verfächerten 5 m mächtigen Störungszonen mit einer Orientierung von 180/75.

Fig. 10-13: Haufwerk des Niederbruchs in der Oströhre bei km 231.633 (Foto IG ITC).

Das Haufwerk des Niederbruchs enthielt bis einem halben Kubikmeter grosse Blöcke hauptsächlich aus dunkelfarbigem kataklastischem Störungszonenmaterial.

Nach Einstellen des Vortriebes folgten am gleichen Tag zur Erkundung des rückwärtigen Bereiches fünf radiale Schlagbohrungen mit einer Länge von 5 m. In einer zweiten Etappe (06.02.2014) wurde die Ortsbrust mit sieben 10–20 m langen Schlagbohrungen erkundet, um das Ausmass des Hohlraums und dessen Geometrie zusammen mit der aufgelockerten Zone im Gebirge einzuschätzen.

Das erstellte geologisch-geotechnische Modell (Fig. 10-14) zeigt den mehrmaligen Wechsel von gestörtem und intaktem Gestein bis km 231.638. Im Zentrum des Niederbruchs befanden sich zwei kataklastische, 1–2 m mächtige und bergwärts einfallende Störungszonen. Die erste Störungszone wurde mit dem Vortrieb angeschnitten und die zweite folgte 3 m nach der Ortsbrust. Das Gestein, welches dazwischenlag, war schwach kohäsiv und entfestigt. Die beige Zone zeigt das aufgelockerte Gebirge, während hellblau die Hohlräume dargestellt.

Zusätzliche Verformungsmessstellen überwachten die Entwicklung der Verformung während der Konsolidierungsphase mit dem Verfüllen des Verbruchskörpers sowie der Verstärkung der Ausbruchsicherung. Der nächstliegende Messquerschnitt lag in der Nähe des Niederbruchs bei km 231.649 und zeigte die Entfestigung im rückwärtigen Bereich mit einer leichten Verformungsbeschleunigung. Nach dem Niederbruch erreichten die weiteren Setzungen dort 30 mm im Firstgewölbe. 11 Tage nach dem Niederbruch konnte der Vortrieb wieder aufgenommen werden. Die Setzungen der neuen Verformungsmessstelle erreichten in der Stabilisierungsphase 12 mm (Fig. 10-15).

10.3.2 Niederbruch Gola di Lago Oströhre km 233.559 (14.07.2017)

Mit der Verschlechterung der Gebirgsverhältnisse am Südrand der Störungszone Gola di Lago (HB 15Bbis, ITZ) beim Nordvortrieb Sigirino wurde ab km 233.264 die Ausbruchsicherung auf Stahlbögen umgestellt (ST-SPV 6A) und der Vortrieb mittels Abbauhammers weitergeführt. Bei km 233.559 in der Oströhre begann sich am 14.07.2012 nach abgeschlossenem Ausbruch während der Felsreinigung das aufgelockerte Gebirge im Firstgewölbe zu lösen. In den darauffolgenden sieben Stunden entstand im Tunnel ein Haufwerk von ca. 330 m³ mit einem entsprechenden offenen Kamin von 150 m³ und 5,4 m Tiefe (Fig. 10-16, 10-17 und 10-18).

Die Störungszone Gola di Lago (15Bbis.4) hatte eine Mächtigkeit von 10 m und bestand hauptsächlich aus schwarz gefärbtem kataklastisch-kakiritischem Störungszonenmaterial, das wechsellagernd zu den Kakiriten der Typen «fault breccia» und «fault gouge» und Lagen mit mehr oder weniger intaktem Gestein aus Chlorit führen-

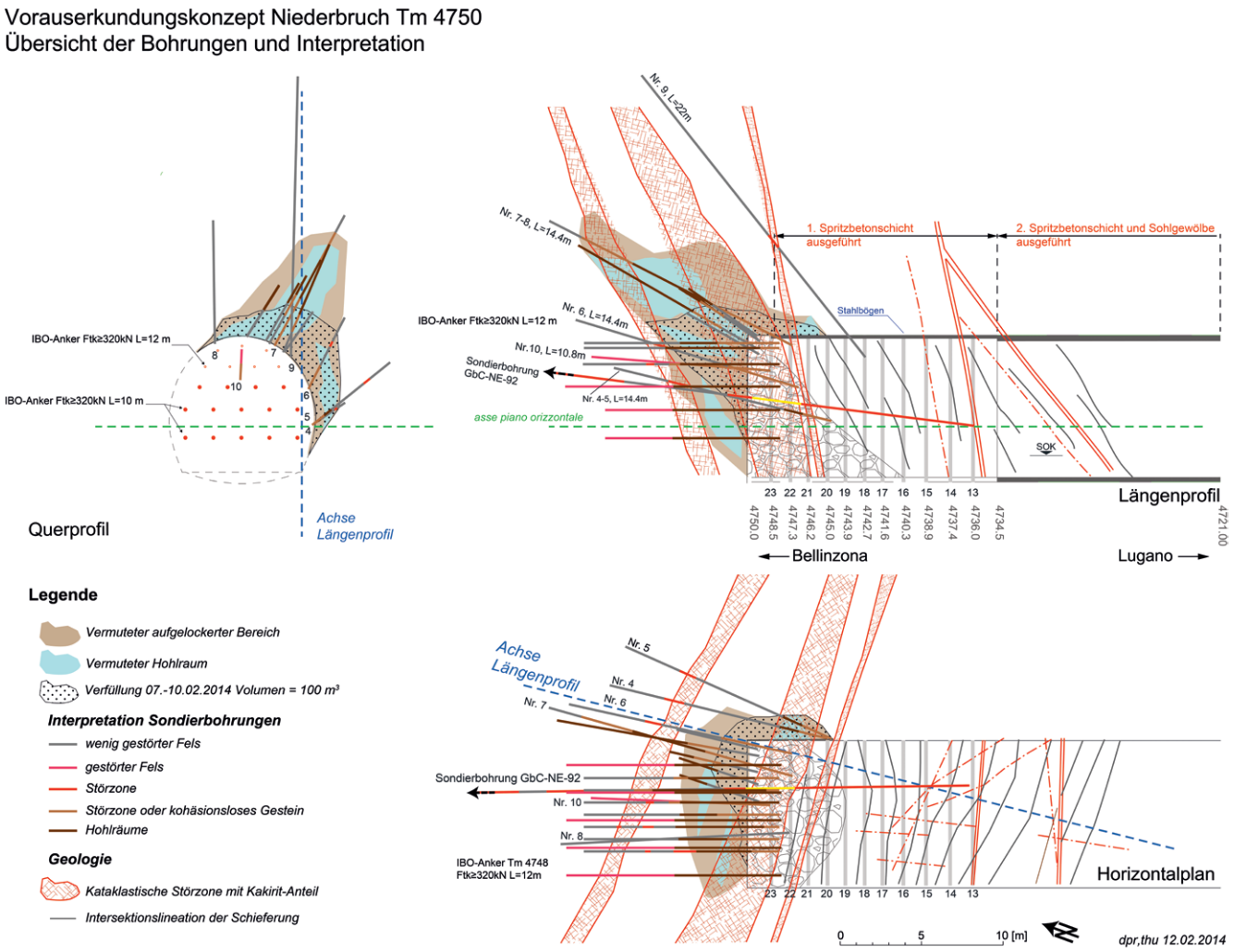


Fig. 10-14: Längsschnitt und Horizontalschnitt des geologisch-geotechnischen Modells zeigen den Befund mit den Ergebnissen, den Erkundungs- und Ankerbohrungen im Bereich des Niederbuchs in der Oströhre bei km 231.633.

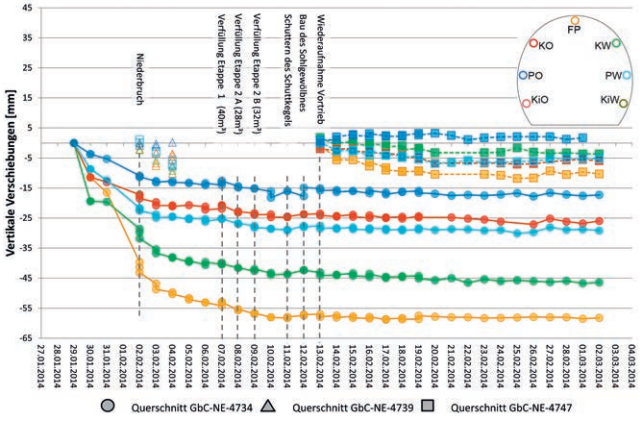


Fig. 10-15: Die Verformungsmessungen der Station km 231.649 zeigen die Entwicklung der Setzungen während dem Niederbruch und der anschliessenden Konsolidierungsphase.

Fig. 10-16: Haufwerk des Niederbruchs in der Oströhre bei km 233.559 (Foto IG ITC).

dem Zweiglimmergneis der Hornfels-Formation bestand. Die Störungszone fällt 75–80° nach SE ein und schneidet die Tunnelachse spitzwinklig (15–25°) bei km 233.575 in der Oströhre bzw. km 333.672 in der Weströhre.

Weil der Kamin des Niederbruchs offenstand, war die Berechnung des Hohlraums mittels Vermessung (Fig. 10-18) einfacher als beim vorherigen Niederbruch. Das Verbruchsmaterial bestand aus dezimeter bis viertelkubikmetergrossen Blöcken mit dunkelfarbigem kataklastischem Störungs-

zonenmaterial. Zahlreiche Kluftflächen waren glattpoliert und hatten oft Rutschharnische.

Die zusätzlichen Erkundungsbohrungen mit einer Länge von 8 m erfolgten anhand von ausgewählten IBO-Anker-Bohrungen im Tunnelprofil und in der Ortsbrust. Die Interpretation der IBO-Anker-Bohrungen ist in Figur 10-17 dargestellt und zeigte den Verlauf der nördlichen Grenze bei km 233.543.

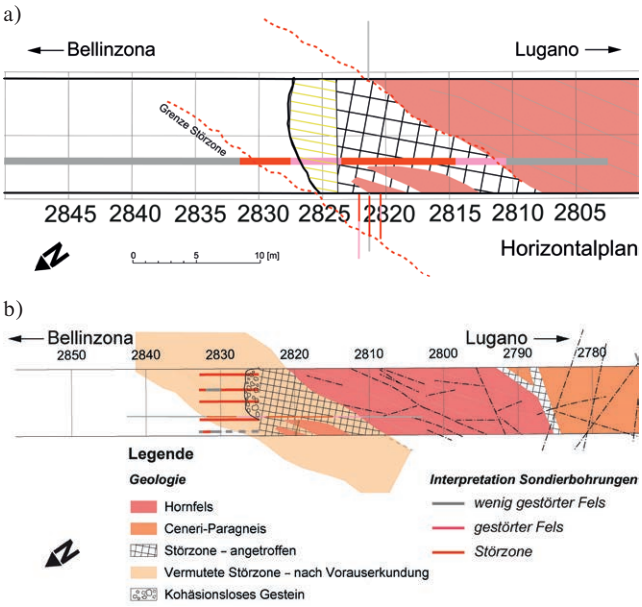


Fig. 10-17: a) Horizontalplan der Oströhre km 233.583–233.533 im Bereich der Störungszone 15Bbis, mit bestehender systematischer Schlagbohrung in Vortriebsrichtung und Interpretation von 3 radialen IBO-Anker-Bohrungen im Parament West. b) Horizontalplan km 233.573–233.558 mit Interpretation der IBO-Anker-Bohrungen an der Ortsbrust.

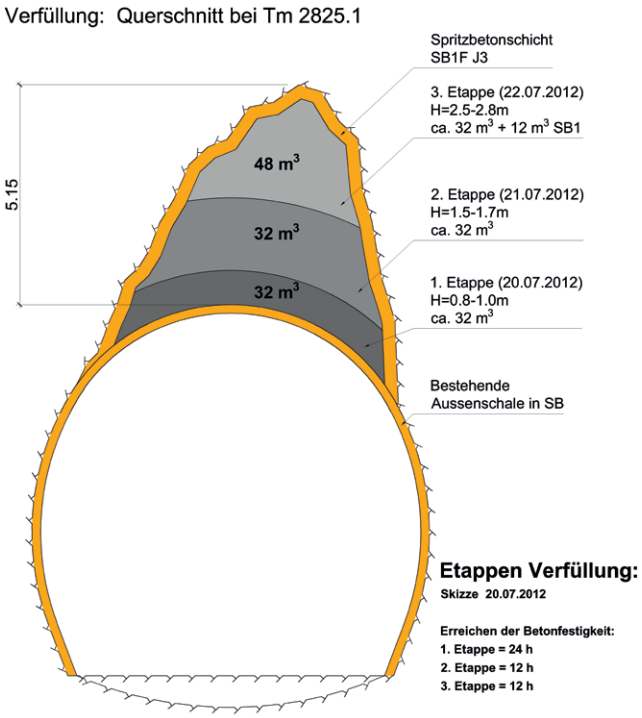


Fig. 10-18: Etappen für die Verfüllung des Hohlraumes.

Es dauerte 11 Tage, bis nach dem Verfüllen des Hohlraumes (Fig. 10-18) und der Verstärkung der Ausbruchsicherung, der Vortrieb wieder aufgenommen werden konnte. Für die Überwachung während des Verfüllens installierte man zusätzliche Messquerschnitte am Fels und an den Stahlbögen. Die erfassten Daten zeigten radiale Verschiebungen von rund 10 mm (Fig. 10-19).

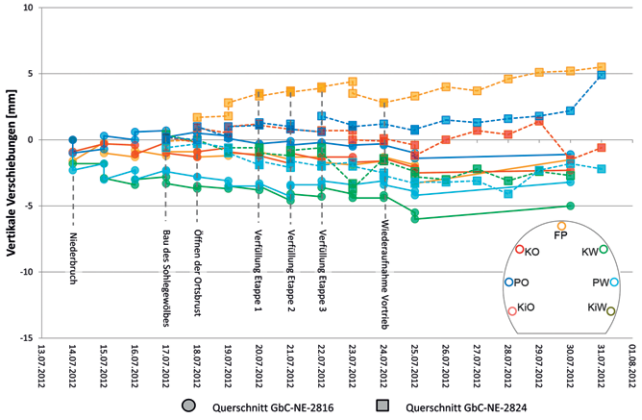


Fig. 10-19: Die Verformungsmessungen zeigen das Verformungsverhalten nach der Wiederaufnahme des Vortriebs und der Verfüllung des Hohlraumes.

10.3.3 Entspannungsschlag im Ceneri-Orthogneis Weströhre km 333.557 (09.07.2012)

Ungefähr fünf Minuten nach der Sprengung in der benachbarten Oströhre, trat in der Ortsbrust der Weströhre bei km 333.557 noch während der Felsreinigung ein Entspannungsschlag mit Stufe D2A ein. Diese Gebirgsentspannung, welche von einem intensiven Knall begleitet war, führte zur sofortigen Ablösung von Gesteinsbruchstücken mit einem Volumen von total 8 m³ (Fig. 10-20). Im Anschluss waren im Laufe der Ortsbrustaufnahmen kontinuierliche dumpfe Entspannungsgeräusche sowohl von der Ortsbrust als auch aus dem Tunnelprofil zu hören. Der betroffene Bereich wurde mit dem Abbauhammer bis auf eine zusätzliche Tiefe von 1,8 m abgetragen. Die Ortsbrust bestand aus Hornblende führendem Biotitgneis des Ceneri-Orthogneises.

Die getroffenen Sofortmassnahmen beinhalteten eine zusätzliche gründliche Reinigung der gesamten Ortsbrust, vollständiges Einspritzen der Ortsbrust mit Stahlfaserspritzbeton (7 cm dick) und eine Verkürzung der Abschlagslänge auf 2,0 m). Während der nachfolgenden Sprenglochbohrungen führten die Erschütterungen des Bohrhammers und das Spülwasser zu einer erneuten Ablösung im Gestein, worauf man beschloss, die Dicke der Stahlfaserspritzbetonschicht an der Ortsbrust von 7 auf 10 cm zu erhöhen und für den Kopfschutz mit J3 Spritzbeton die Frühfestigkeit zu erhöhen.

10.3.4 Ereignis im Ceneri-Orthogneis Weströhre km 332.664 (08.05.2013)

Am 08.05.2013 verursachte ein Entspannungsschlag 2DB in der Weströhre bei km 332.655 ein Ablösen von rund 5 m³ Gestein im westlichen Parament. Dies hatte ein Versagen

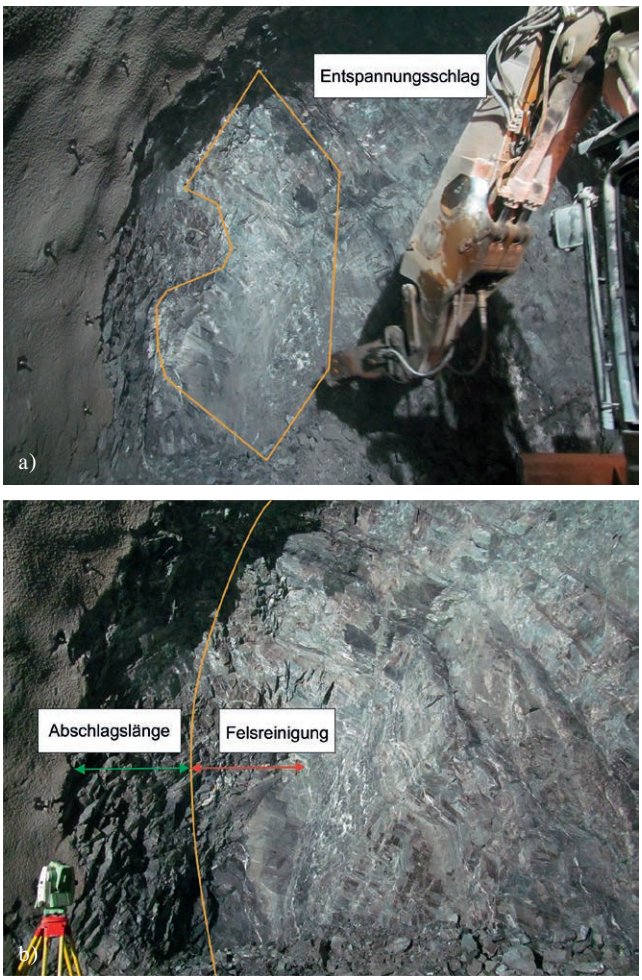


Fig. 10-20: Bereich der Ablösung nach der Reinigung bei 338.947 (Fotos IG ITC), a) vor und b) nach der Felsreinigung.

der Ausbruchsicherung im Brustbereich L1 zur Folge, welche aus einem Kopfschutz, radialen Reibungsankern und einer 15 cm dicken Spritzbetonschicht bestand. Das Gestein besteht aus Biotitgneis des Ceneri-Orthogneises. Beim vorherigen Abschlag km 332.661–332.658 gab es keine Anzeichen für eine Veränderung der bestehenden Gefährdungsbilder. Das Tunnelprofil hatte keine besonderen geologischen Überprofile und der Zerklüftungsgrad hatte nicht zugenommen (Fig. 10-21 a). Zwei Stunden nach dem Auftragen der Spritzbetonschicht erfolgte ein starker Entspannungsschlag und löste Gestein aus dem westlichen Parament. Es kam durch dieses Ereignis niemand zu Schaden. Mit der anschliessenden Felsreinigung entstand ein 1,8 m tiefes und 5,5 m langes Überprofil (Fig. 10-21 a).

Als Sofortmassnahmen nach der Felsreinigung erfolgten die Wiederherstellung der Ausbruchsicherung mit Spritzbeton und Ankern und eine Verkürzung der Abschlagslänge auf 2,0 m. Mit dem Wechsel der Ausbruchsicherung auf einen SPV 4 erfolgten Bauhilfsmassnahmen mit einer Erhöhung der Systemankerung mittels Mörtelanker l=6 m im Parament und Paramentfuss, einer Verdichtung des Ankerrasters mit Reibungsankern, einer Erhöhung der Spritzbetonschicht im Brustbereich L1 auf 10 cm als Kopfschutz und einer zweiten 7 cm dicken Schicht sowie einer Verkürzung der Abschlagslänge auf 2,5 m.

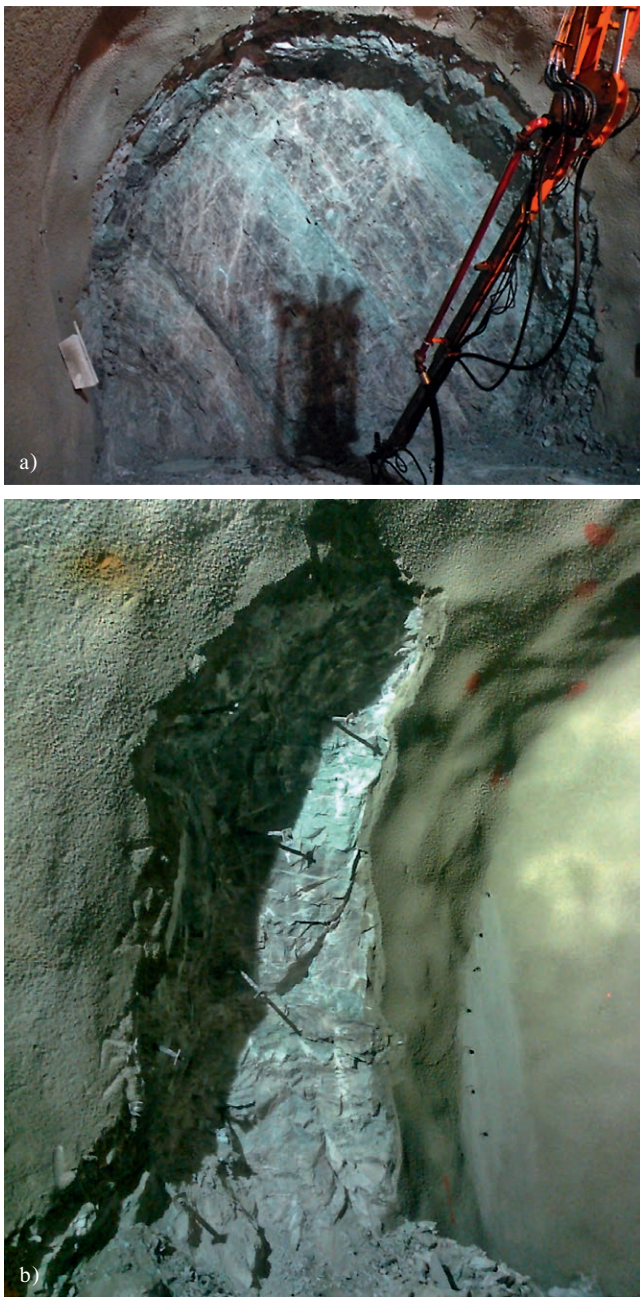


Fig. 10-21: a) Ortsbrust der Weströhre bei km 332.658 nach der Felsreinigung. b) Ablösung des entfestigten Gesteins im Parament West der Weströhre bei km 332.655 nach starkem Entspannungsschlag (Fotos IG ITC).

Beim darauffolgenden Abschlag km 332.658–332.656 trat eine Störungszone ins Tunnelprofil. Es kann angenommen werden, dass der ungünstige Verschnittwinkel mit dem Tunnelprofil und den angetroffenen Kluftscharen zusammen das Lösen des Gebirges begünstigten.

Das Auftreten starker Entspannungen, bzw. von Entspannungsschlägen ist örtlich nicht genau vorhersehbar. An dieser Stelle wird auf das während der Bauausführung erstellte Konzept «Entspannungsschläge» und den Massnahmenplan verwiesen, welches Grundlage für die Festlegung der zu treffenden Bauhilfsmassnahmen war.

10.3.5 Ereignis im Ceneri-Orthogneis Oströhre km 234.030 (14.04.2012)

Am 14.04.2012, während der Ortsbrustaufnahmen, hörte man knallartige Geräusche und entschied sich, zur Sicherung der Ortsbrust eine 5 cm dicke Spritzbetonschicht aufzutragen. Während der Bohrung der Radialanker und den Sprenglochbohrungen konnte eine fortschreitende Rissbildung des Spritzbetons an der Ortsbrust beobachtet werden, die nach etwa zehn Minuten zu einem Nachbruch mit einem Volumen von 5–6 m³ führte (Fig. 10-22). Gebirgsentspannungen begünstigten dieses Ereignis zusammen mit den verschnittenen Scherzonen und Kluftscharen. An der Ortsbrust war ein leukokrater Zweiglimmergneis des Ceneri-Orthogneises aufgeschlossen.

Die Sofortmassnahmen waren Fertigstellen der Radialanker, Ortsbrustreinigung und Auftragen von 7 cm mit Stahlfasern verstärktem Spritzbeton. Nach einem ähnlichen Ereignis 40 Stunden später, bei dem nur der Spritzbeton an der Ortsbrust riss, verkürzte man als Massnahme die Abschlagslänge von 3,0 auf 2,5 m und erhöhte die Spritzbetonschicht an der Ortsbrust von 5 auf 10 cm. Da sich in den nachfolgenden Tagen keine weiteren Ereignisse in der Ortsbrust ereigneten, konnte die Abschlagslänge wieder schrittweise erhöht und die Spritzbetonstärke an der Ortsbrust auf 5 cm verringert werden.

Fig. 10-22: Nachbruch an der Ortsbrust der Oströhre bei km 234.030 (Foto IG ITC).

10.3.6 Strecke im Giumello-Gneis mit asymmetrischen Verformungen im Bereich des Bypass Nord

Die anisotrope Spannungsumlagerung, welche im Bereich des Bypass Nord zu asymmetrischer Verformung im Giumello-Gneis führte, erforderte für den Zeitraum 2010–2016 eine Verstärkung der Ausbruchsicherung während der Vortriebsarbeiten und insgesamt drei Eingriffe im rückwärtigen Bereich (Fig. 10-23 a). Die Verformungen stabilisierten sich im Streckenabschnitt km 335.974–336.053 erst nach zehn Monaten (Fig. 10-23 b) und verursachten Risse und Abplatzungen an verschiedenen Stellen der Aussenschale im Bereich des Gewölbes und der Paramente im

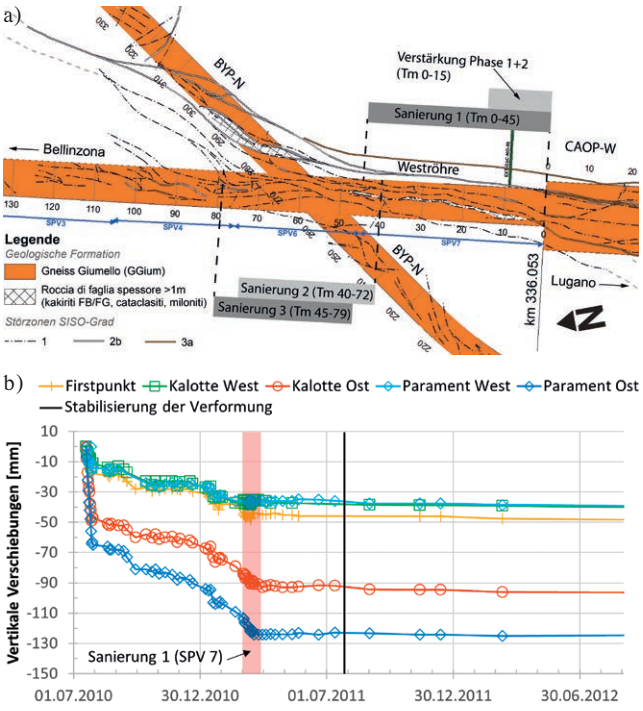


Fig. 10-23: a) Horizontalplan mit geologischem Befund beim Kreuzungsbereich Bypass Nord und Weströhre nördlich der CAOP. Er zeigt die durchgeführten Sanierungs- und Verstärkungsmassnahme. b) Verformungsmessstelle in der Weströhre bei km 336.009 zeigt anhand der Setzungen das Verformungsverhalten.

Kreuzungsbereich sowie im Übergangsbereich der Logistikkaverne und dem Einspurtunnel (Fig. 10-24).

Bereits während des Vortriebs im Jahr 2010 war der rückwärtige Bereich mit eingebautem AST SPV 4 zwischen km 336.038 und 336.053 (Tm 15–0) mit IBO-Ankern (Ftk ≥ 460 kN, L = 12,0 m) in beiden Paramenten punktuell verstärkt worden. Nach den fortschreitenden Verformungen erforderte der Abschnitt von km 336.007–336.053 im März 2011 eine erste Sanierungsmassnahme im Übergangsbereich der Logistikkaverne CAOP und dem Einspurtunnel durch eine Nachprofilierung und dem Einbau der Ausbruchsicherung des Typs SPV 7 mit Sohlgewölbe. Im gleichen Jahr erfolgte im Kreuzungsbereich Bypass Nord und Weströhre eine Verstärkung durch IBO-Ankern (Ftk ≥ 320 kN, L = 8,0 m) und mit der Verlegung von Bewehrungsnetz und Spritzbeton eine zweite Sanierung (Fig. 10-24). Der letzte Eingriff fand im Jahre 2016 vor dem Einbau der Innenschale statt und beinhaltete im Streckenabschnitt nördlich des Kreuzungsbereichs zwischen km 335.974 und 335.008 (Tm 79–45) die Entfernung des Unterprofils zusammen mit den Stahlbögen und das Einbohren von durchgehenden Ankern im Pfeiler.

10.3.7 Geotechnische Ereignisse beim Bau der Logistikkavernen CAOP

Das gleiche Phänomen, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, war auch in den Logistikkavernen hauptverantwortlich für die Erzeugung von asymmetrischen, lange anhaltenden Verformungen, die zum Teilversagen der Aussenschale in den Logistikkavernen führten. Zusätzlich konnte Rissbildung der Aussenschale in Verbindung mit der Unterteilung des Vortriebes in Etappen (Kalotten- und Stros-

senvortrieb) beobachtet werden. Die parallele Streichrichtung der Strukturen zur Kavernenachse und die ungünstige Beschaffenheit des Gebirges, bestehend aus Glimmerschiefer und verfächerten Scher- und Störungszonen, schwächten das Gebirge zusätzlich, sodass bereits während des Baus die Aussenschale mehrmals verstärkt und saniert werden musste.

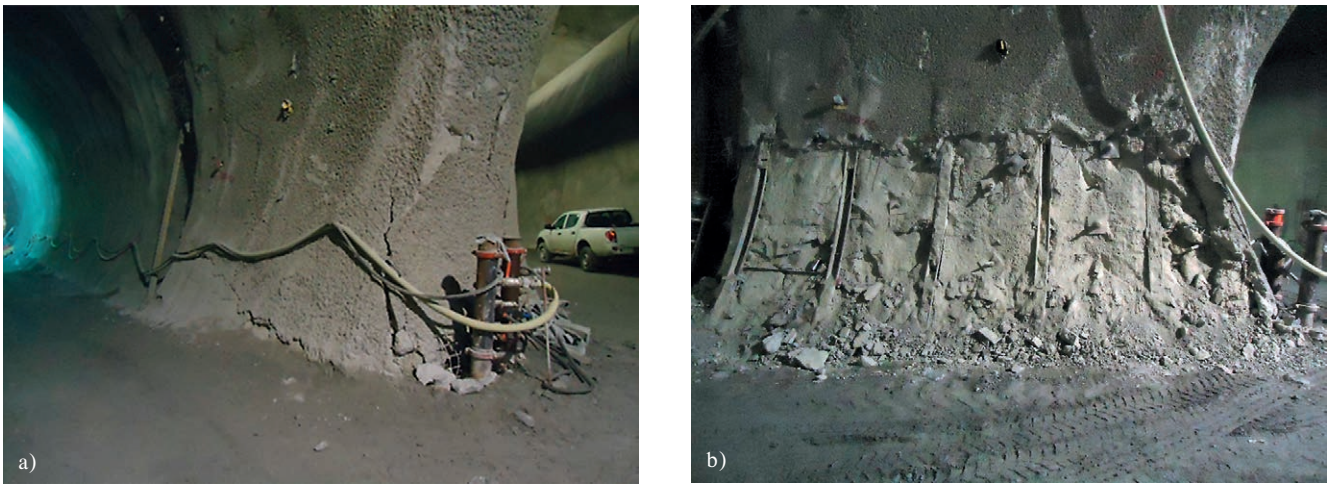


Fig. 10-24: a) Pfeiler im Kreuzungsbereich Bypass Nord und Weströhre km 335.978–335.983 (Tm 75–70) zeigt die Risse. b) Bogenstrecke beim Pfeiler nach dem Entfernen der Aussenschale während der zweiten Sanierung (Fotos IG ITC).

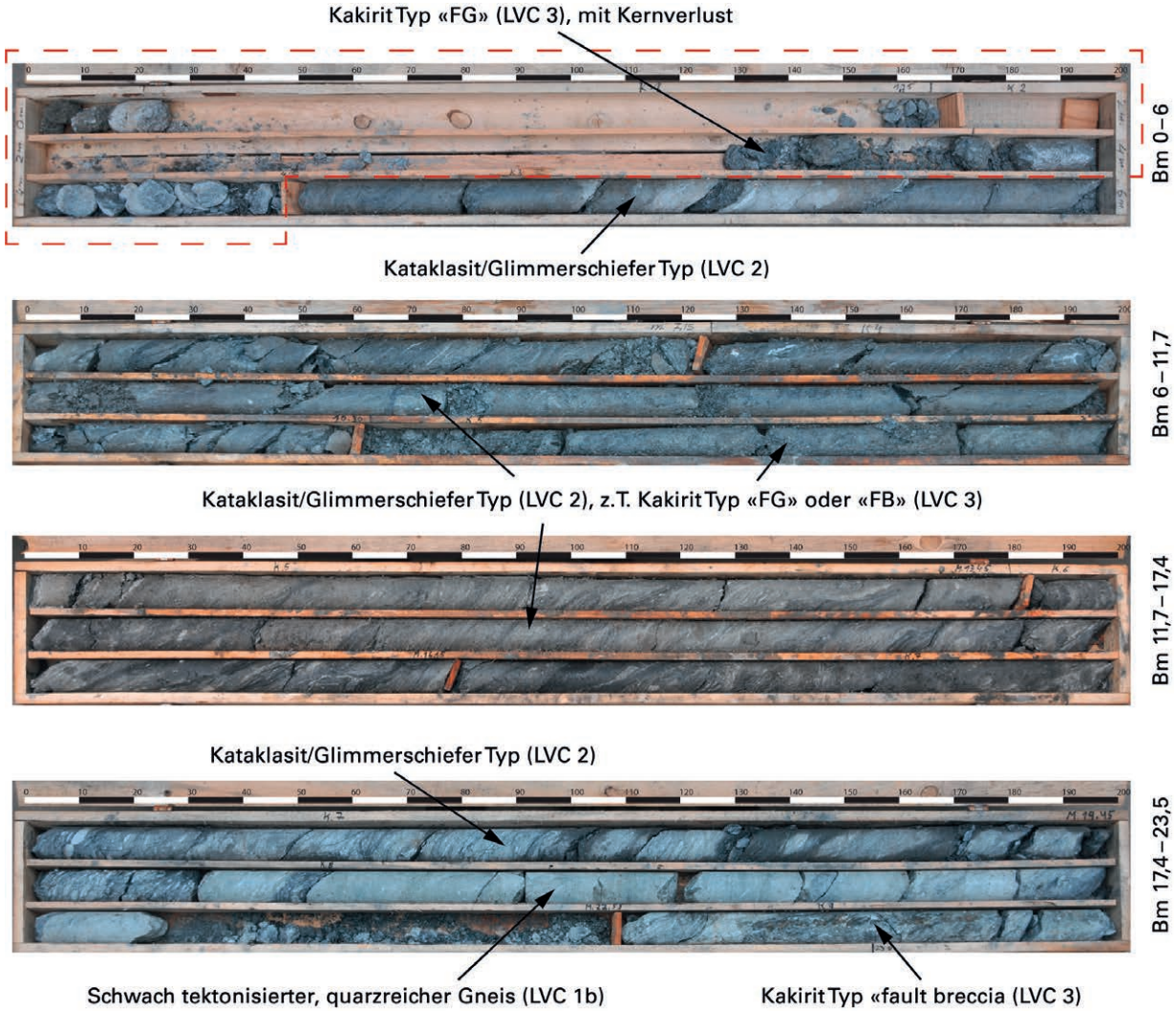


Fig. 10-25: Kernbohrung GbC-SE-LVC-01 schräg zur Vortriebsrichtung, Oströhre km 237.478 (s. Lage der Kernbohrung in Fig. 10-27). FG = Kakirit Typ «fault gouge», FB = Kakirit Typ «fault breccia» (Foto IG ITC).

10.3.8 Niederbruch Val-Colla-Linie Oströhre km 237.478 (03.05.2011)

Die Zeit des Vortriebsstillstandes während der Osterferien (19.–27.04.2011) wurde in der Oströhre des Südvortriebs Sigirino für die Vorauserkundung der Val-Colla-Linie mittels Kernbohrung GbC-SE-LVC-01 (27.04–01.05.2011, Fig. 10-25) genutzt. Unmittelbar nach der Wiederaufnahme des Vortriebes ereignete sich am 03.05.2011 ein Niederbruch bei km 237.478 in der Ortsbrust. Die Ortsbrust befand sich zum Zeitpunkt des Ereignisses in unmittelbarer Höhe der westlichen Einmündung des Querschlags 30. Der Querschlag 30 war von der Weströhre ausgehend bis zum Tm 40 ausgebrochen, so dass die beiden Bauwerke nur noch durch 6 m Fels getrennt waren (Fig. 10-27). Die Ortsbrust der vorauseilenden Weströhre befand sich 27,5 m südlich.

Aufgrund der steigenden Verformungen war als Ausbruchsicherung bereits ab km 237.477 ein SPV 10 mit Verformungsschlitzen und Ortsbrustanker eingebaut worden. Am 02.05.2011 um 14:00 Uhr wurde die Ortsbrust mit dem Abbauhammer geöffnet, um danach den folgenden Stahlbogen einzubauen. Im darauffolgenden Vortriebszyklus am 03.05.2011 um 02:00 Uhr begannen beim Vortrieb mittels Abbauhammers kontinuierlich Steine aus dem Firstgewölbe herauszurieseln. Der eigentliche Niederbruch ereignete sich um 04:00 Uhr und führte in wenigen Minuten zur Bildung von einem 150 m³ grossen Haufwerk.

Das Gebirge im Bereich des Niederbruchs umfasste eine heterogene Verteilung von Kakiriten hauptsächlich des Typs «fault breccia», kataklastischen Störungen (Mächtigkeit <1 m) und Kakiriten des Typs «fault gouge» (<0,1 m) umgeben von Glimmerschiefer und -gneisen (weitere Einzelheiten sind im Kap. 3.1.3 beschrieben).

Als Sofortmassnahme wurde das Haufwerk, welches aus 2–3 m³ grossen Blöcken bestand, zur Konsolidierung im oberen Teil mit Spritzbeton eingespritzt (Fig. 10-26). Das Verbruchsmaterial bestand hauptsächlich aus dunkelfarbigem kakiritischem Gestein des Typs «fault breccia» und Kataklasiten aus dem Kern der Störungszone. Die Oberflächen zeigten häufig Harnischflächen.

Die Geometrie und räumliche Lage des Verbruchskörpers wurde mittels Schlagbohrungen aus der Oströhre und der Ortsbrust des Querschlags 30 erkundet (Fig. 10-28). Die anschliessende Interpretation der Erkundungsbohrungen ergab einen länglichen Hohlraum, der leicht schräg ansteigend in Vortriebsrichtung verlief. Die maximale Höhe und der Durchmesser betrugen 10 und 4 m (Fig. 10-28). Um den Hohlraum herum befand sich ein entfestigtes Gestein mit offenen Klüften und stellenweise abgetrennten Gesteinsblöcken, welche bis auf 13 m über den Firstpunkt reichten.

Während des Einbaus des Spiessschirms wurde der Verbruchskörper anhand von ausgewählten Ankerbohrungen erkundet. Die unterschiedlichen Bohrgeschwindigkeiten erlaubten zwischen Hohlraum, intaktem und aufgelockertem

Fig. 10-26: Haufwerk des Niederbruchs in der Oströhre bei km 237.478 mit einem Volumen von 150 m³ (Foto IG ITC).

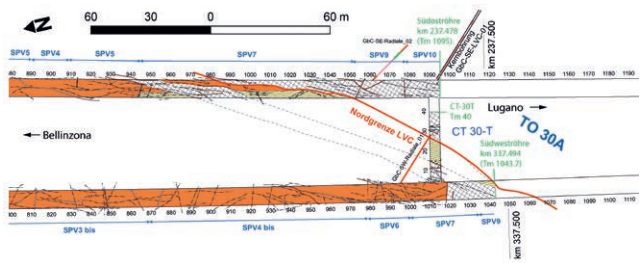


Fig. 10-27: Der Horizontalschnitt Schienenoberkante veranschaulicht den Vortriebsstand, bei dem es zum Niederbruch kam und die Hauptstörungszonen und Lithologien der Homogenbereiche 28C und 30A.

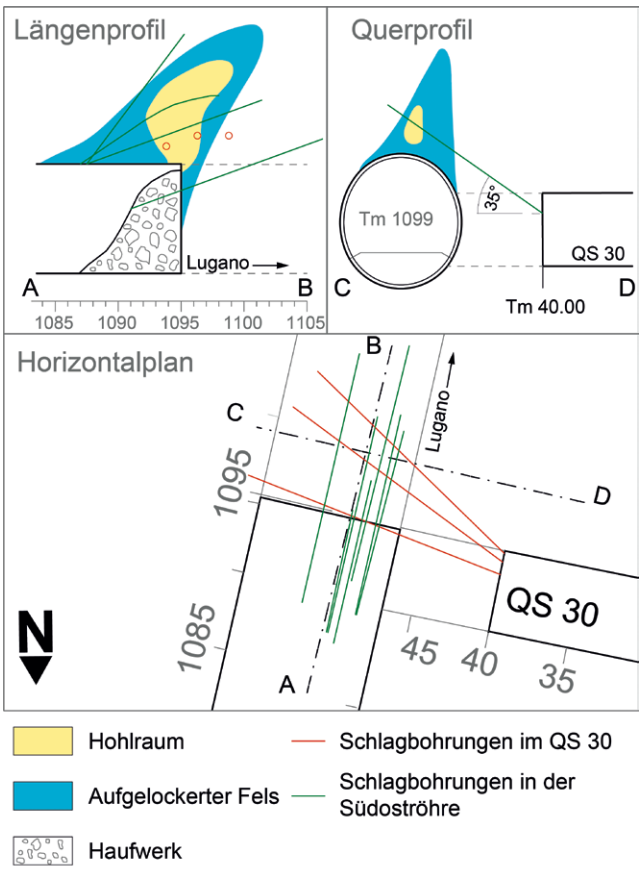


Fig. 10-28: Quer- und Längenprofil mit Ausschnitt des Horizontalplans im Kreuzungsbereich des Querschlags 30 und der Südoströhre.

Gebirge zu unterscheiden und dessen Ausdehnung in Südrichtung abzugrenzen.

In den Messquerschnitten bei km 237.444, 237.453 und 237.465 wurde eine Beschleunigung der Setzungen sowie der Horizontalverschiebungen gemessen. Diese waren ausgeprägter im Bereich des Gewölbes und der Kämpfer. Der der Ortsbrust am nächsten eingesetzte Messquerschnitt bei km 237.465 ergab eine maximale Setzung von 50 mm innerhalb weniger Stunden nach dem Ereignis. Mit den Verformungsmessstellen konnten Spannungsumlagerungen bis zu mehr als drei Durchmesser im rückwärtigen Bereich festgestellt werden.

Die Bauhilfs- und Konsolidierungsmassnahmen durch Verfüllung des Hohlraumes und Testbohrungen zur Prüfung der Hohlraumverfüllung dauerten bis zur Wiederaufnahme des Vortriebs 15 Tage.

10.3.9 Wassereintritt beim Auffahren des Bohrlochs CB83 km 239.299

Am 16.09.2012 kreuzte der Vortrieb der Oströhre bei km 239.299 das Bohrloch der Kernbohrung CB83, welches während der Erkundungsbohrungen im Jahr 2002 ausgeführt wurde. Der Bohransatzpunkt lag vertikal darüber in Origlio/Altragno. Bei der Sprengung kam es unmittelbar zum Wassereintritt im östlichen Kämpfer mit einer initialen Schüttungsmenge von 3,5 bis 4 l/s (Fig. 10-29). Die chemisch-physikalischen Analysen bestätigten, dass es sich dabei um Oberflächenwasser handelte (Fig. 5-9). Mit einem Packer stoppte man den Wassereintritt provisorisch. Das Bohrloch wurde anschliessend von der Oberfläche her bis in eine Höhe von 25–30 m über den Tunnel mit Zementmörtel verschlossen.

Als Vorsichtsmassnahme erfolgte im Januar 2013 der Verschluss von weiteren Kernbohrungen (CB60, CB82, CB114, CB115) in der Nähe des bevorstehenden Südvortriebes nur bis zur Hälfte, damit die Überwachung des Grundwasserspiegels und der nächstliegenden Quellen weiterhin möglich war. Im April 2014 wurden die betreffenden Kernbohrungen ganz verfüllt.

Fig. 10-29: Wassereintritt aus dem Bohrloch der Kernbohrung CB83 im östlichen Kämpfer (links im Bild) bei km 239.299. Als Sofortmassnahme wurde das Bohrloch mit einem Packer provisorisch verschlossen (Foto IG ITC).

Fig. 10-30: Rissbildung und Abplatzungen in der Spritzbetonschale in der Kaverne West im Streckenabschnitt km 340.401–340.431 a) Reinigung der Spritzbetonabplatzungen unter dem Nachläufer. b) Im deformierten Bereich besteht die Gefahr von herunterfallenden Spritzbetonplatten. c) Die Verkleidung der Hängebrücke des Nachläufers mit Holzbrettern diene als provisorische Schutzmassnahme für die Belegschaft (Fotos IG ITC).

10.3.10 Lange anhaltende Verformungen im Verzweigungsbauwerk Sarè West

Beim Streckenabschnitt km 340.331–340.481 in der Kaverne West des Verzweigungsbauwerkes Sarè wurde beim Vortrieb ein ansteigender Trend der Verformungen bemerkbar (Kap. 9.5.1 und 9.5.2). Im östlichen Gewölbe und Parament erreichten die Verformungen Werte von 50–80 mm. Diese Verformungen waren ein Anzeichen für intensivere Auflockerung des Gebirges um den Hohlraum. Gleichzeitig war die Auflockerungstiefe proportional zum Ausbruchquerschnitt des Verzweigungsbauwerks.

Mit zunehmender Spannweite der Kaverne liessen sich auch zunehmende Verformungen beobachten. Die Daten der Extensometerstation EXT-SO-3994 km 337.445 in der Kaverne West, bei einem Kavernendurchmesser von 15 m, bestätigen eine Entfestigung des Gebirges im Firstgewölbe bis in eine Tiefe von 8 m (Kap. 9.5.2). Dementsprechend wurde die Spritzbetonschale im Vortriebsbereich L2 beansprucht (Fig. 10-30). Die Verstärkungs- und Sanierungsmassnahmen gestalteten sich logistisch aufwendig, weil aufgrund der Unterteilung der Ortsbrust in drei Vortriebsphasen der Brecher und, damit verbunden, der Nachläufer nicht nach Süden verschoben werden konnte, sodass der Sanierungsbereich für die Maschinen nicht zugänglich war. Infolgedessen wurden die Sanierungsarbeiten in mehrere Phasen unterteilt (s. Fig. 10-31). Das führte zu den Sicherheitsmassnahmen, bzw. zur Teilbeschränkung des Zugangs des Baustellenpersonals, und zur Ummantelung des Gerüsts des Förderbandes (Fig. 10-30 c).

Die beschädigte Aussenschale wurde mit dem Abbauhammer und, falls nicht zugänglich, von Hand etappenwei-

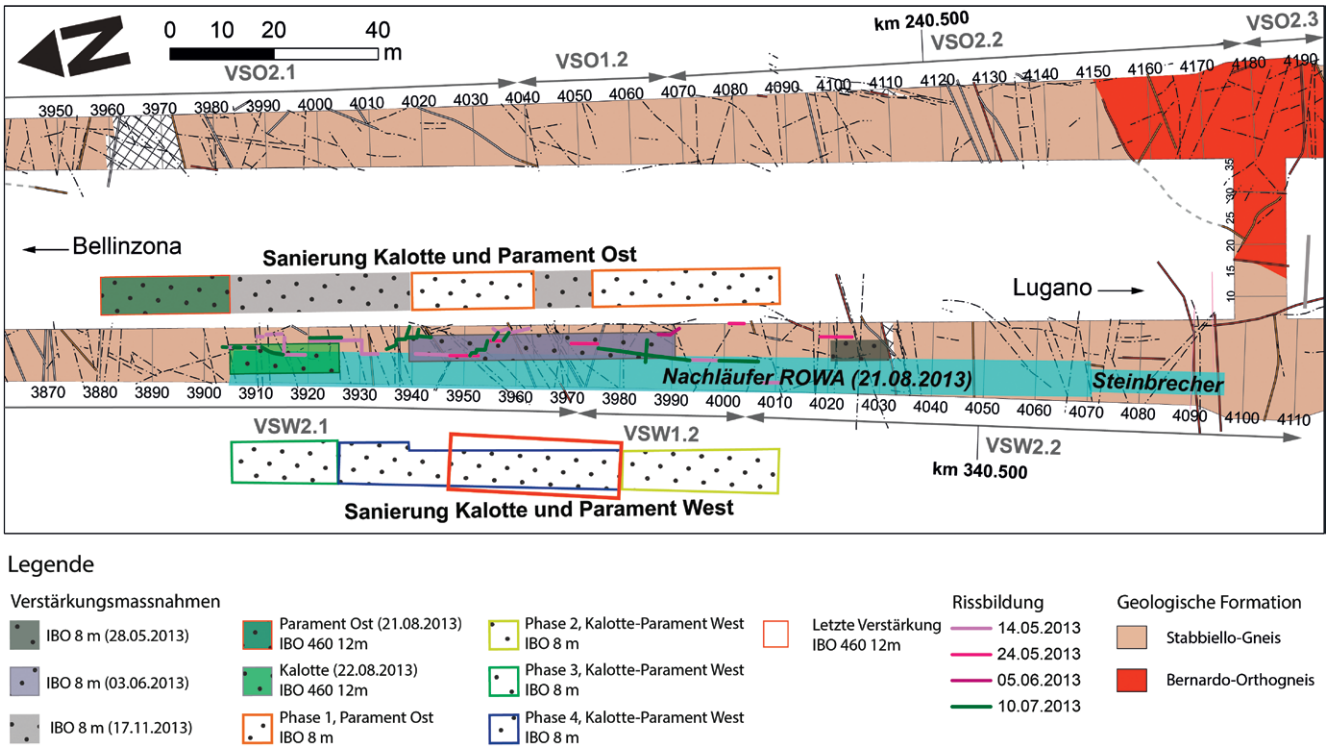


Fig. 10-31: Horizontalplan mit dem Verzweigungsbauwerk Sarè; mit Geologie im Befund, den festgelegten Ausbruchsicherungstypen und den mehrphasigen Sanierungs- und Bauhilfsmassnahmen im Streckenabschnitt km 340.331–340.481.

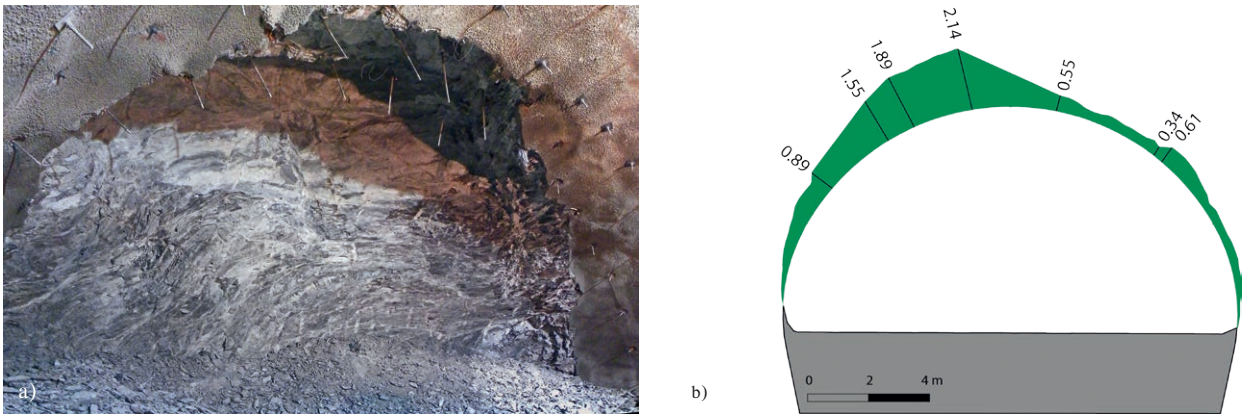


Fig. 10-32: a) Eine Ablösung des aufgelockerten Gebirges im Firstgewölbe in der Kaverne West bei km 340.520 führt zu einem geologischen Überprofil von 10 m³ und einer Höhe von 2,1 m (Foto IG ITC). b) Querschnitt des gemessenen geologischen Überprofils.

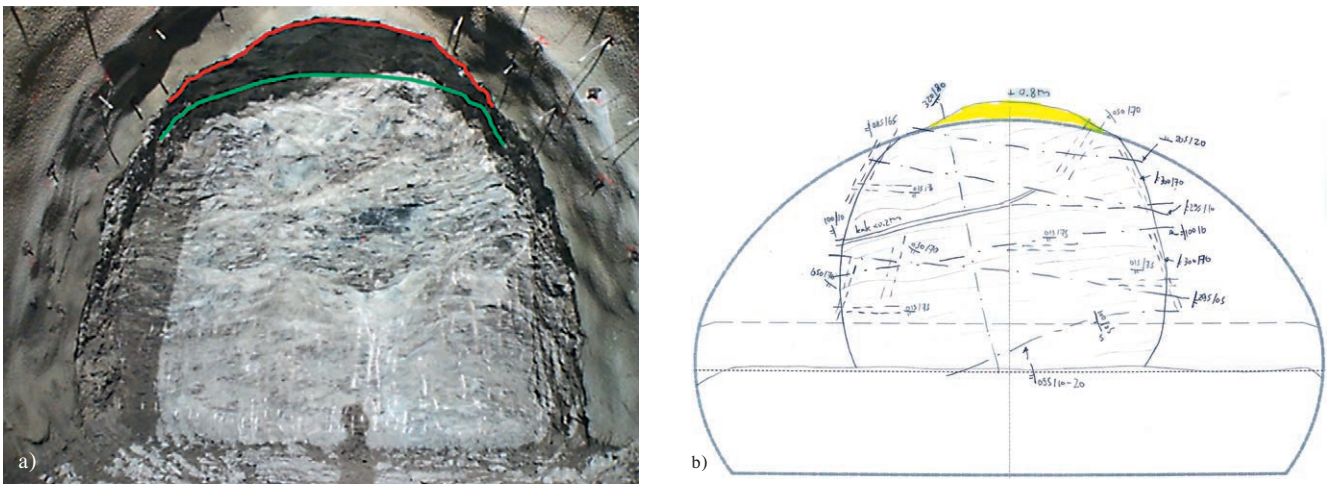


Fig. 10-33: a) Eine Ablösung des aufgelockerten Gebirges im Firstgewölbe des Kalottenstollens bei km 340.573 verursachte ein geologisches Überprofil von 3 m³ und einer Höhe von 0,8 m. Grüne Linie = festgelegte Ausbruchslinie, rote Linie = effektive Ausbruchslinie des geologischen Überprofils (Foto IG ITC) b) Darstellung des geologischen Überprofils in der Ortsbrustaufnahme mit festgelegtem Ausbruchquerschnitt.

se weggespitzt und anschliessend mit Spritzbeton versiegelt. Die Verstärkung der Aussenschale bestand aus zusätzlichen IBO-Ankern (Ftk ≥ 320 kN, L = 8,0 m) und einer 12 cm dicken Schicht Spritzbeton (SB3). In drei Abschnitten war es notwendig IBO-Anker (Ftk ≥ 460 kN, L = 12,0 m) einzusetzen.

10.3.11 Nachbrüche im Verzweigungsbauwerks Sarè

Die Beobachtungen bestätigten einen zunehmenden Trend der Kluftkörperbildung, überwiegend in der Kaverne West des Verzweigungsbauwerks Sarè. Im Vergleich mit dem Einspurtunnel waren die geologischen Überprofile in der Kaverne West um rund das Dreifache grösser (s. Verteilung geologische Überprofile, Kap. 9.1.4). Der folgende Abschnitt dokumentiert zwei aussergewöhnliche Ereignisse, die zu bemerkenswerten geologischen Überprofilen geführt haben und eine Anpassung der Vortriebsmethode und Ausbruchsicherung erforderlich machten.

Die Kombination von Ablösungen und Auflockerung aufgrund subhorizontaler Schieferung und kataklastisch-kakiritischer Störung im Firstbereich verursachte bei km 340.520 im östlichen Gewölbe bis Kämpfer ein geologisches Überprofil von 10 m³ und einer Höhe von 2 m infolge einer Ablösung bis in den gesicherten Bereich des vorherigen Abschlags (Fig. 10-32). Durch dieses Ereignis fiel die Entscheidung für eine Unterteilung des Kalottenvortriebs mit einem Kalottenstollen. Ohne Unterteilung der Kalotte wäre die Sicherheit der Belegschaft während dem Einbau von Gitterbögen und Spiesschirm im Sicherungstyp VSW 2 nicht mehr gewährleistet gewesen.

Mit der Aufteilung der Kalotte der Kaverne West in drei Vortriebsphasen gelang es, die Intensität der Ereignisse Ablösungen und Auflockerung im Firstgewölbe zu verringern. Beim Vortrieb des Kalottenstollens verringerten sich die geologischen Überprofile auf weniger als 6 m³. Zusammen mit den beiden Kalottenaufweitungen der 2. und 3. Phase blieb das Volumen des gesamten geologischen Überprofils unterhalb von 10 m³. Trotz eines kleinen Ausbruchquerschnittes des Kalottenstollens war es z.T. schwierig, bedingt durch die Beschaffenheit des Stabbiello-Gneises, das reguläre Profil nach dem Abschlag und der Felsreinigung geometrisch zu erhalten. Dies erschwerte es, das flache Ausbruchsprofil im Firstbereich des Kalottenstollens (Kap. 11.4.7) beizubehalten (s. grüne Linie in der Fig. 10-33). Wie in der Ortsbrust des Kalottenstollens in der Kaverne West bei km 340.573 überschnitt das durch Ablösungen verursachte geologische Überprofil (rote Linie) die festgelegte Ausbruchslinie. Die subhorizontale Schieferung verschnitt den Ausbruchsrand ungünstig. Auf Streckenabschnitten mit ungünstigen geologisch-geotechnischen Verhältnissen konnte mittels partieller Sprengung durch Weglassen der Sprengladungen in der oberen Kalotte das geologische Überprofil deutlich verringert werden, sodass das Ausbruchsprofil gemäss Festlegung flach gehalten werden konnte.

10.3.12 Geothermiebohrungen in der Gemeinde Cureglia (Querschlag 43)

Im Juli 2014 erreichte man mit dem Ausbruch des Querschlags 43 die ungefähre Position der drei Geothermiebohrungen für Erdwärmesonden einer privaten Liegenschaft in der Gemeinde Cureglia (Fig. 10-34). Gemäss Prognose waren die Geothermiebohrungen mit einer Bohrlänge von ca. 137 m bis unter den Firstpunkt des Querschlags abgeteuft.

Zwei Wochen vor dem Ausbruch der betroffenen Strecke, informierte der Bauherr den Eigentümer der Geothermieanlage, um diese während der Vortriebsarbeiten ausser Betrieb zu setzen. Um das Risiko einer Beschädigung der Erdwärmesonden zu verringern, wurde der betreffende Abschnitt mittels Abbauhammers ausgebrochen und die radiale Systemankerung im nördlichen Parament ausgedünnt.

Die Erdwärmesonden wurden bei der Durchörterung nicht angetroffen, und es wurde bei Bauende keine Beschädigung an der Geothermieanlage festgestellt.

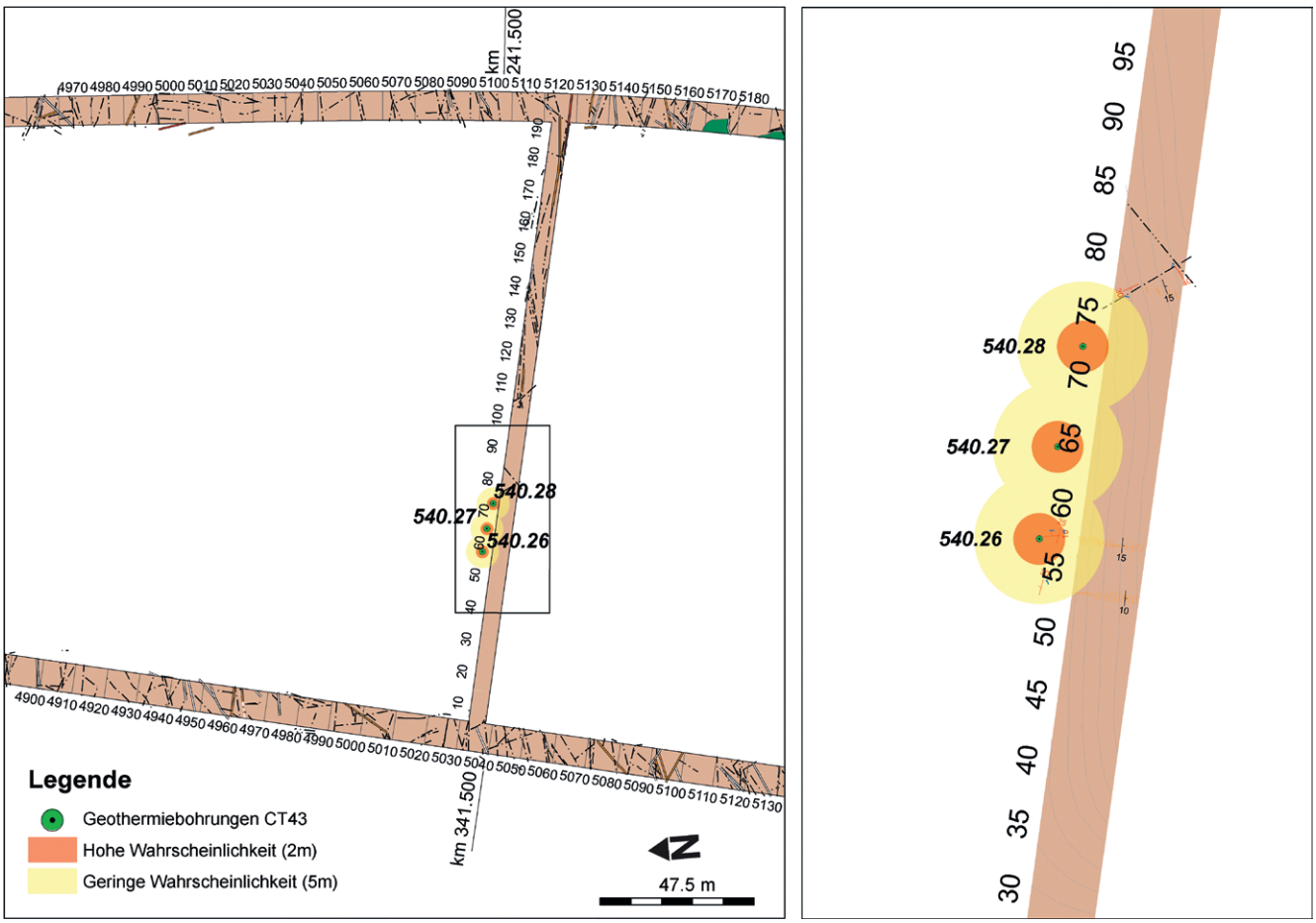


Fig. 10-34: Geothermiebohrungen beim Querschlag 43 im Südvortrieb Sigirino. Der Streubereich zeigt die radiale Abweichungen der bestehenden Bohrungen und die damit verbundene Wahrscheinlichkeit, diese beim Vortrieb anzutreffen.

11. Bauprozesse und Bautechnik beim Tunnelvortrieb

Dieses Kapitel beschreibt die angewendete Bautechnik beim Tunnelvortrieb anhand von Beispielen und analysiert den Bauprozess, die eingebauten Sicherungsmittel sowie deren Anpassungen und Optimierungen im Hinblick auf die angetroffenen geologischen und geotechnischen Verhältnisse.

11.1 Bauprozess im Allgemeinen

11.1.1 Vortriebsleistung

Die Vortriebsleistung hing von verschiedenen Faktoren ab. Neben der geologischen und geotechnischen Beschaffenheit des Gebirges, welche die Abschlagslänge beim Vortrieb bestimmte und eine Haupteinflussgrösse für die Vortriebsleistung darstellte, spielten andere technische Faktoren, wie die Ausbruchart oder allfällige Einschränkungen des Vortriebs, ebenfalls eine wichtige Rolle. In Streckenabschnitten, in denen die Ortsbrust mit grossen Ausbruchsflächen in Kalotte und Strosse unterteilt wurde, wie die Anschlusskavernen Vigana, die CAOP, der Vortrieb Vezia oder das Verzweigungsbauwerk Sarè, dessen letzten Streckenabschnitt mittels Kalottenstollens ausgebrochen wurde, fiel die Vortriebsleistung im Vergleich zum regulären Vollausbruch deutlich tiefer aus (Fig. 11-1).

Die Abschlagslängen, welche in den Ausführungsplänen definiert waren, wurden für die Festlegung der Ausbruchsicherung verwendet und jeweils in den Festlegeblättern als Richtwert an den Unternehmer weitergegeben. Nach jedem Vortriebszyklus wurde der Vortriebstand vom Unternehmer gemessen und zusammen mit den Sprengdaten täglich an die öBL übergeben.

Die sprengtechnischen und zeitlichen Einschränkungen beim Vortrieb in Vigana ermöglichten pro Arbeitstag einen Abschlag in den Kavernen und bis zu zwei Abschläge in den anderen Profilen mit Vollausbruch. In den Kavernen betrug die Vortriebsleistung 1,1–1,3 m/AT (Ost- und Weströhre) und in den Einspurtunnel 2,1–3,5 m/AT (Fig. 11-1). Die höhere Vortriebsleistung ist auf den kleineren Ausbruchquerschnitt (Anschluss Weströhre) zurückzuführen.

Beim Nordvortrieb Sigirino wurden bei zwei bis drei Sprengungen pro Arbeitstag und Röhre regelmässig Vortriebsleistungen von bis zu 12 m/AT pro Tag erreicht und bis zu 16 m während der Beschleunigungsmassnahme Nordvortrieb mit gleichzeitig drei Vortrieben. Aus der Kurve des Fortschrittsdiagramms (Fig. 11-1) lässt sich die niedrige Vortriebsleistung im Bereich von Störungszonen in den Homogenbereichen 6C, 10B, 12Abis und 15Bbis nachvollziehen, welche durch ungünstige geomechanische Felseigenschaften gekennzeichnet waren und daher schwerere Ausbruchsicherungstypen erforderten. Umgekehrt ermöglichten die geologischen Formationen Ceneri-Orthogneis, Basite und Ultrabasite der Ceneri-Zone durch den Einbau von leichteren Ausbruchsicherungstypen höhere Vortriebsleistungen.

Eine Steigerung der Vortriebsleistung wurde durch die nachträgliche Einführung der Ausbruchsicherungstypen «accelerato» (SPV-3A und SPV-6A) erzielt, welche grössere Abschlagslängen aufwiesen (Kap. 11.3). Eine weitere Steigerung der Vortriebsleistungen konnte durch den Ersatz der vertraglich vorgesehenen Netzbewehrung der Spritzbetonschale mit stahlfaserverstärktem Spritzbeton erzielt werden. Auf dem Streckenabschnitt im Giumello-Gneis in der südlichen Ceneri-Zone fallen unregelmässige niedrigere Vortriebsleistungen von 1–7 m/AT auf. Diese korrelieren mit dem wechselhaften Gestein, welches hauptsächlich aus Glimmerschiefer und zahlreichen Scher- und Störungszonen besteht, die in subparalleler Streichrichtung gegenüber der Tunnelachse verlaufen. Die für diesen Fels typischen Gefährdungsbilder, wie Ablösungen und Auflockerung, verursachten einerseits im östlichen Kämpferbereich regelmässig geologische Überprofile und im Profil asymmetrische, durch die Schieferung beeinflusste, Verformungen. Die Verformungen führten zu lokaler Rissbildung im Spritzbeton der Aussenschale und es musste deshalb nachträglich mehrmals gereinigt bzw. saniert werden.

Mit zwei bis drei Abschlägen pro Arbeitstag konnte im Südvortrieb bis am Ende des Vortriebs der südlichen Ceneri-Zone im Bereich des Giumello-Gneises eine maximale Tagesleistung von 9 m/AT erzielt werden. Mit dem Eintritt in den nördlichen Bereich der Val-Colla-Linie, der dem Homogenbereich 30 entspricht (km 237.364–237.530), sank die Vortriebsleistung wegen dem Einbau von schwereren Ausbruchsicherungstypen (SPV 6 – SPV 10) auf 1,5 m/AT. Im südlichen Teil der Val-Colla-Linie (km 237.530–238.022), welcher überwiegend aus intaktem Fels bestand, erhöhten sich die mittleren Tagesleistungen auf 3,3–3,6 m/AT. Die reduzierten sprengtechnischen und zeitlichen Einschränkungen aufgrund der geringeren Erschütterungs- und Körperschallmesswerten beim Vortrieb bis zum 01.09.2014 (km 241.804) ermöglichten es, mit Ausnahme vom Verzweigungsbauwerk Sarè, Tagesleistungen zwischen 3,7 m/AT in der Oströhre und 4,3 m/AT in der Weströhre zu realisieren. Während der Unterquerung des Val Ponteggia in unmittelbarer Nähe zur Baulosgrenze Sigirino–Vezia, zwischen km 242.285 und 242.315, mussten kurzzeitig die Abschlagslängen in der Oströhre verkürzt werden, weil die Erschütterungen den kritischen Wert erreichten (s. Kap. 11.1.3). Grund war die geringe Gebirgsüberlagerung sowie die darüberliegende Bebauung.

Im Verzweigungsbauwerk Sarè realisierte man den Ausbruch der Kaverne Sarè Ost in 165 Tagen, jenen der Kaver-

ne Sarè West in 214 Tagen. Diese Differenz der Vortriebszeit lässt sich auf die ungünstigeren Felsverhältnisse in der Kaverne Sarè West zurückführen. Wiederholte Sanierungen und Verstärkungen der Aussenschale im rückwärtigen Bereich, die durch die Verformungen in den durchörterten Störungszonen verursacht wurden, gestalteten sich wegen der Position des Nachläufers und den daraus resultierenden engen Platzverhältnissen als besondere logistische Herausforderungen (s. Kap. 11.4.7). Als zusätzliche bautechnische Massnahmen, um die schwierigen Felsverhältnisse zu bewältigen beschloss man, den Ausbruch des grossen Profilquerschnittes gegen das Ende der Kaverne des Verzweigungsbauwerkes mit einem Kalottenstollen auszubrechen und im rückwärtigen Bereich auf das definitive Profil aufzuweiten. Die Produktion beim Vortrieb des Verzweigungsbauwerkes Sarè ergab somit im Mittelwert eine Tagesleistung von 2,5 m/AT für die Kaverne West und 3,6 m/AT für die Kaverne Ost.

11.1.2 Beschleunigungsmassnahmen

Im Zeitraum vom 28.03.2015–29.05.2015 bestellte der Bauherr in der Oströhre auf dem Streckenabschnitt km 230.145–229.498 eine Beschleunigungsmassnahme für den Nordvortrieb (Fig. 11-2) mit dem Ziel, den Rückstand der Oströhre von 369 m gegenüber der Weströhre aufzuholen. In der Weströhre startete auf der Höhe des Querschlags QS 6 ein Zwischenangriff mit einer dritten Ortsbrust. Zum Zwischenangriffsdispositiv gehörte der Bau eines baulogistischen Querschlags parallel zum Querschlag QS 6 für die

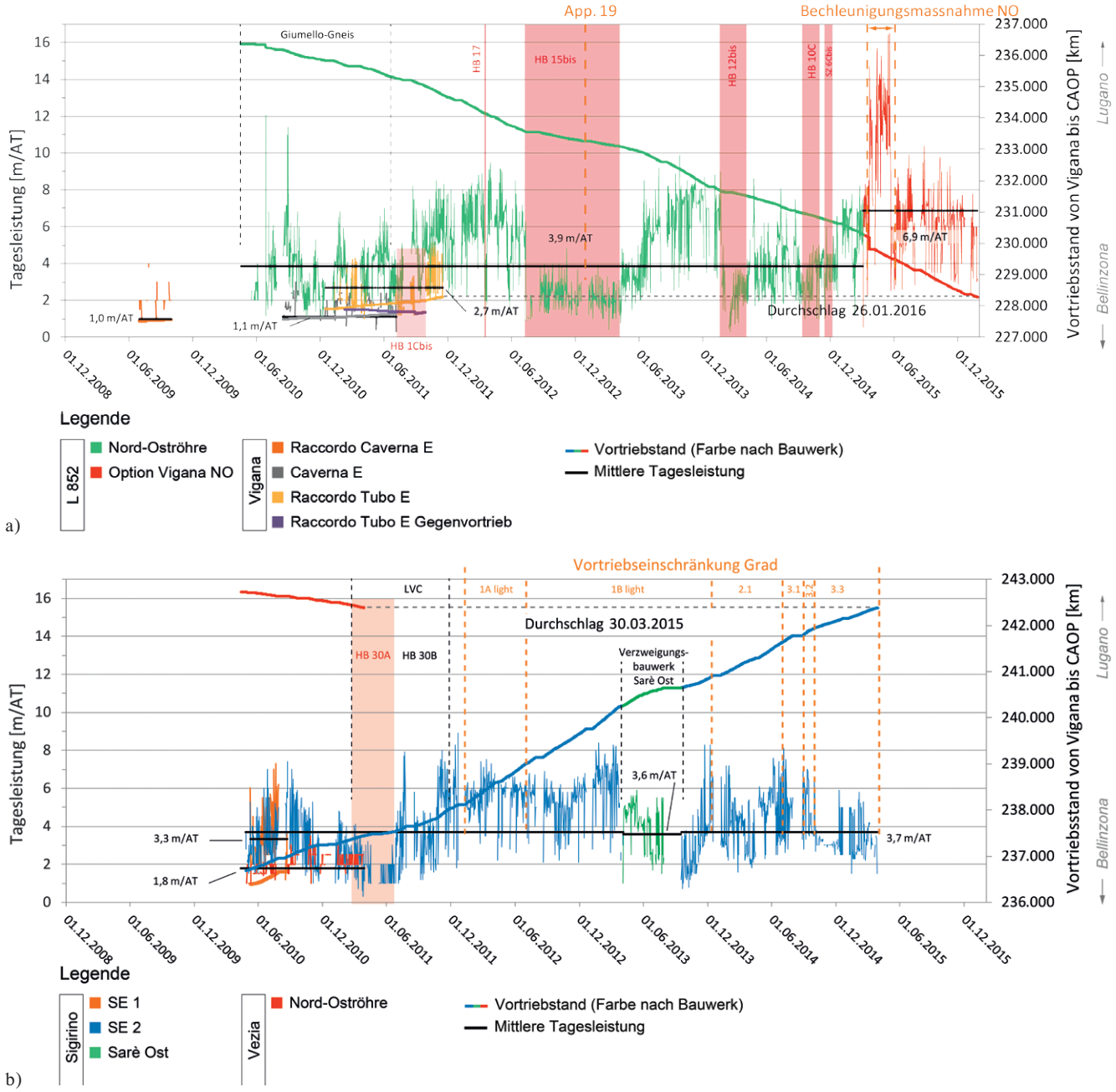


Fig. 11-1: Übersicht der Vortriebsleistungen der einzelnen Bauwerke in der Oströhre mit Weg-Zeitdiagramm. a) Streckenabschnitt Vigana–CAOP. b) Streckenabschnitt CAOP–Vezia.

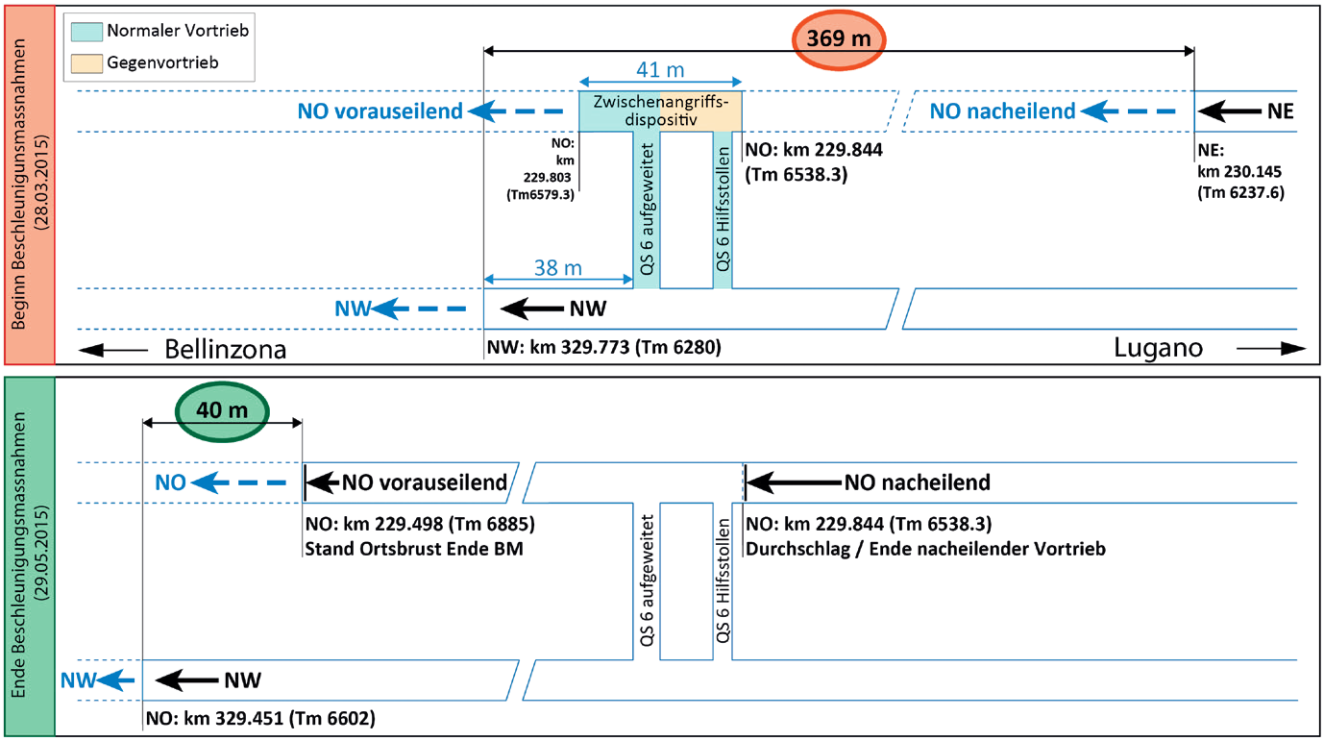


Fig. 11-2: Schematische Darstellung der Beschleunigungsmassnahme Nordvortrieb Sigirino mit Zwischenangriffsdispositiv beim Querschlag QS 6 von der Weströhre ausgehend.

Lüftung. Die Ver- und Entsorgung der Baustelle erfolgte über den Querschlag CT6 und die Weströhre. Am Ende der Beschleunigungsmassnahme reduzierte sich der Rückstand der Oströhre, welcher während der Durchörterung der beiden Störungszonen Val Mara und Val d'Isone aufgelaufen war, wieder auf 40 m.

11.1.3 Einschränkungen für den Tunnelbau beim Vortrieb

Gegeben durch die Topographie des Monte Ceneri und der Linienführung des CBT durch Siedlungsgebiete, in denen sich mehrere sensible und historische Bauwerke in der Umgebung der Portale befinden, wurden in der Ausführungsphase für die Durchörterung der nördlichen Ceneri-Zone und der Val-Colla-Zone eine Überwachung der Erschütterungen mit Massnahmen zur Reduzierung von Erschütterungen und Körperschall erarbeitet. Zum Überwachungskonzept zählte ein Netz von Geophonen verteilt an kritischen Stellen und ein dazugehöriger Massnahmenplan mit Einschränkungen, welcher sich nach dem Befund richtete und gegebenenfalls mit zusätzlichen Massnahmen angepasst werden konnte (Kap. 9.6). Die Einschränkungen waren im Werkvertrag festgehalten (Tab. 11-1).

Mit der Autobahn A2 und der SBB-Bahnlinie in Vigana, dem Umfahrungstunnel Vedeggio – Cassarate und der SBB-Bahnlinie in Vezia lagen wichtige Infrastrukturbauwerke im Einflussbereich der Bauarbeiten des CBT vor, weshalb der Bauherr die Vortriebsarbeiten und ihre Auswirkungen überwachte und mit SBB und ASTRA koordinierte. So wurde z.B. im Nahbereich der SBB-Linien jede Sprengung mit dem Fahrdienst der SBB koordiniert, da Sprengungen nicht während Zugsdurchfahrten durchgeführt werden durften.

Tab. 11-1: *Vertraglich vorgesehene Einschränkungen von Spreng- und mechanischen Arbeiten im CBT. Auf Streckenabschnitten, die sich ausserhalb der Angaben in der Tabelle befinden, gelten keine Einschränkungen.*

Teilabschnitt	Beschreibung der erlaubten Arbeiten und Sprengungen
Vigana	Nur an Arbeitstagen zwischen 06:00 und 22:00 Uhr. Mechanische Arbeiten die nicht besonders laut sind, dürfen ausserhalb der Zeiten durchgeführt werden. Die Sprengladungen sind begrenzt auf 20 kg pro Bohrloch für Gebirgsüberlagerungen zwischen 100 und 150 m; 10 kg unterhalb 100 m. Zusätzlich müssen die Sprengungen während des Unterfahres der SBB-Linie mit den Zugsfahrten koordiniert werden.
Sigirino, Nordvortrieb	Zwischen Baulosgrenze Vigana und km 238.785 Sprengungen an allen Wochentagen mit Ausnahme Sonntag nur zwischen 08:00 und 20:00 Uhr erlaubt.
Sigirino, Südvortrieb	Schrittweise Verschärfung der Einschränkungen ab der LVC. Die höchste Stufe gilt ab km 241.633 bis zur Baulosgrenze. Dabei sind Sprengungen nur an allen Wochentagen ausschliesslich sonntags von 08:00–12:00 und von 13:30–18:00 Uhr erlaubt. Mechanische Arbeiten dürfen bis 23:00 Uhr durchgeführt werden (Bohrarbeiten, Räumen mit Bagger).
Vezia	Sprengungen und mechanische Arbeiten nur an Wochentagen von 08:00–12:00 Uhr und von 13:30–18:00 Uhr erlaubt, mit maximaler Sprengladung bis 2 kg pro Bohrloch und Sektorenzündung erlaubt.
Tagbaustrecke Vezia	Arbeitszeiten für Sprengungen und mechanische Arbeiten analog zum Tunnelvortrieb Vezia. Zusätzlich müssen die Sprengungen mit den Zugfahrten auf der SBB-Linie koordiniert werden.

In jedem Abschnitt, in dem Erschütterungsmessungen durchgeführt wurden, konnte mit einer Anpassung der Sprengtechnik an die lokalen Verhältnisse (Gebirgsüberlagerung, Lithologie und Querschnittsgrösse des Bauwerkes) eine Verringerung der seismischen Wellen erreicht werden, so dass die festgelegten Grenzwerte für die Erschütterungen an den Fundamenten sensibler Gebäude mit Ausnahme weniger Einzelfälle (s. Kap. 9.6) eingehalten werden konnten.

Der Vortrieb in Vigana erforderte keine zusätzlichen Massnahmen hinsichtlich Erschütterungen und Körperschall, weil die Messergebnisse niedriger als erwartet ausfielen (Kap. 9.6).

Beim Nordvortrieb in Sigirino waren die gemessenen Werte der Erschütterungen durch Sprengarbeiten vergleichbar tief (wie in Vigana), sodass für die Vortriebsarbeiten bis zur Baulosgrenze beider Tunnelröhren keine Einschränkungen notwendig waren.

Tiefere Messwerte für Erschütterungen und Körperschall bei den Messstationen im Süden sowie Umfragen bei der Bevölkerung trugen zu einer Reduzierung der Vortriebseinschränkungen bei. So konnte der Unternehmer auf dem Streckenabschnitt bis am 31. Oktober 2014 (km 241.804) mit einer Einschränkung «light» zu längeren Zeiten und an Sonntagen arbeiten und sprengen. Ab diesem Datum galten wegen der geringen Felsüberlagerung und den Erschütterungen, welche die festgelegten Grenzwerte erreichten, Arbeits- und Sprengzeiten gemäss den vertraglichen Einschränkungen.

In Vezia und Cureglia führte der Bau der beiden Einspurtunnel durch dicht bewohnte Siedlungsgebiete, in denen mehrere erschütterungsempfindliche Industriebauten, private Gebäude und insbesondere das Centro Studi Bancari mit Sitz in der historischen Villa Negroni in unmittelbarer Nähe der Tunnelachse lagen. Ausserdem führte der Tunnel mit einer minimalen Distanz von 4 m über den damals noch im Bau befindlichen Strassentunnel Vedeggio – Cassarate. Deshalb verordnete der Bauherr alle erforderlichen Massnahmen zur Reduzierung von Erschütterungen und Körperschall, was Einschränkungen beim Sprengvortrieb und den Abbauarbeiten voraussetzte. Dabei wurde der Ausbruch der Ortsbrust beim Vortrieb Vezia, deren Fläche rund 80 m² beträgt, mit vorlaufendem Kalottenvortrieb und nachfolgendem Ausbruch der Strosse realisiert.

11.2 Ausbruchsicherung im Ausführungsprojekt

11.2.1 Vorgeschichte zur Planung der Ausbruchsicherung

Eine Besonderheit im Ausführungsprojekt des CBT ist die Anzahl von zehn Ausbruchsicherungstypen beim Vortrieb Baulos Sigirino (Fig. 11-5). In den Projektgrundlagen für die Ausführung wurden ursprünglich, analog zum Gotthard-Basistunnel (GBT), sieben Ausbruchsicherungstypen festgelegt. Als Grundlage für die Ausbruchsicherungstypen beim Vortrieb Baulos Sigirino dienten die Erfahrungen des GBT, insbesondere die aus dem Sprengvortrieb des Teilabschnittes Sedrun. Der Vortrieb in Sedrun zeigte, dass die Verformungen in der Sohle meist geringer waren als im Gewölbe. Daraufhin folgte im Rahmen der Ausschreibungsprojektierung eine Anpassung der Ausbruchsicherungstypen. Dabei wurde die Profilform an die geo- und bautechnischen Voraussetzungen des CBT angepasst. Nach dem Wegfall der Schmutzwasserleitung (Umstellung von Trenn- auf Mischsystem) wurde das flache Sohlgewölbe in den niedrigen Ausbruchsicherungstypen durch eine flache Sohle ersetzt.

Des Weiteren folgte eine feinere Abstufung der Ausbruchsicherungstypen ausgehend vom ursprünglichen Typ SPV 4.

Mit der Erhöhung der Anzahl der Ausbruchsicherungstypen von sieben auf zehn konnten die Grundlagen und die Ausgangssituation für Ausschreibung, Offertkalkulation der Unternehmungen, Offertvergleich und Vergabe, vor allem aber auch für die spätere Vertragsabwicklung auf der Baustelle des Hauptloses wesentlich verbessert werden. Beim Vortrieb des Einspurtunnels im Portalbereich Vigana wurden sieben Ausbruchsicherungstypen festgelegt und beim Portalbereich Vezia fünf. In den Kavernen Vigana, CAOP und im Verzweigungsbauwerk Sarè kamen besondere, an den Ausbruchquerschnitt und an die lokalen geologischen Verhältnisse angepasste, Ausbruchsicherungstypen zum Einsatz.

11.2.2 Beschreibung der Ausbruchsicherungstypen

Das Konzept der Ausbruchsicherung stützte sich auf die Gefährdungsbilder (Tab. 10-1) und auf die prognostizierten Verformungen im Tunnelprofil (s. Kurve vertragliche Verformung im Abschnitt Verformungsmessungen in der Taf. I und Kap. 9.5.1). Im gesamten CBT wurde ein zweischaliges System mit Ausbruchsicherung (Aussenschale) und Verkleidung (Innenschale) eingesetzt. Die Ausbruchsicherung bestand aus Spritzbeton, Ankern, Bewehrungsnetzen und bei Bedarf aus Stahlbögen. An Stelle eines netzbewehrten Spritzbetons wurde in den leichteren Ausbruchsicherungstypen stahlfaserbewehrter Spritzbeton verwendet. Die Stabilität des Hohlraumes hing von der Beschaffenheit des Gebirges ab, das sich je nach Homogenbereich unterschiedlich verhielt.

Das Modell der Homogenbereiche (Kap. 2.4) umfasste in den Projektgrundlagen eine Beschreibung der Verteilung der Gebirgsbeschaffenheit entlang des CBT zusammen mit den erwarteten Intensitäten der Gefährdungsbilder. Die Intensität, mit der die Gefährdungsbilder beim Vortrieb auftraten (Ereignisse), war abhängig von der Gesteinsfestigkeit, der Orientierung und Position der Trennflächen im Verhältnis zum Bauwerk und der Vortriebsrichtung gegenüber der Schieferungsorientierung und wurde bei der Wahl des Ausbruchsicherungstyps berücksichtigt. Die Ereignisse sind im geologischen Befundprofil (Taf. I) dargestellt.

11.2.2.1 Portalbereich Vigana

Die Heterogenität des Baugrundes und die unterschiedlichen Grössen der Ausbruchquerschnitte beim Vortrieb im Portalbereich Vigana führten dazu, dass für das Ausführungsprojekt zahlreiche und unterschiedliche Ausbruchsicherungstypen definiert wurden (Fig. 11-3).

Im folgenden Abschnitt und in Figur 11-4 werden die

Ausburchsicherungstypen der Kaverne und dem Einspurtunnel erklärt. Der Ausbruch der Kavernen erfolgte unterteilt in Kalotte und Strosse. Für die Kaverne Ost war ein Ausbruchsicherungstyp (KVa) mit drei unterschiedlichen Ausbruchswiderständen (KVa.1-3) mit flacher Sohle vorgesehen. Der Ausbruchsicherungstyp KVa.1 enthielt im Gegensatz zu den beiden anderen keine Gitterbögen und hatte die kürzesten Ankerlängen im Tunnelprofil (4–6 m). Für die Ausbruchsicherungstypen KVa.2 und KVa.3 waren Ankerlängen von 5–7 m respektive 6–7 m geplant. Die Spritzbetonstärke der Aussenschale betrug in den drei Ausbruchsicherungstypen aufsteigend 25 cm, 30 cm und 35 cm.

Die Ausbruchsicherungstypen für die Kaverne West (KVb-e) bezogen sich auf die Grösse des Ausbruchquerschnittes und hatten ebenfalls drei Ausbruchswiderstände. Die Ausbruchsicherungstypen KVc–e.1 beinhalteten ein hufeisenförmiges Profil ohne Gitterbögen. Bei den KVc–d.2 kamen Gitterbögen und längere Systemanker (5–7 m) dazu und die KVc–d waren zusätzlich mit einem Sohlgewölbe ausgestattet. Die Spritzbetonstärken der Ausbruchsicherungstypen KVb.1-3 waren identisch mit den KVa.1-3. Für die kleineren Ausbruchquerschnitte (KVc–d.1-3) wurde die Spritzbetonstärke jeweils um 5 cm reduziert.

Die leichten Ausbruchsicherungstypen GV 1–4 des Einspurtunnels im Portalbereich Vigana wiesen ein hufeisenförmiges Profil mit einer Aussenschale von 15 cm Spritzbeton in den GV 1–2, 20 cm im GV 3 und 25 cm im GV 4 auf. Die Ankerlängen betrugen für alle vier Ausbruchsicherungstypen 4 m, sie hatten aber eine unterschiedliche Anzahl und waren im Profil unterschiedlich verteilt (Fig. 11-4). Der Ausbruchsicherungstyp GV 4 war mit Mörtelankern ausgestattet, alle anderen mit Reibrohranker des Typs Swellex. Die Ausbruchsicherungstypen GV 5 und GV 6 hatten beide ein Sohlgewölbe und Stahlbögen TH 25 mit 25 cm Spritzbeton aber 4 m respektive 6 m lange Mörtelanker. Der Ausbruchsicherungstyp GV 7 mit kreisrundem Profil und Stahlbögen hatte eine 30 cm dicke Aussenschale aus Spritzbeton und 6 m lange Mörtelanker.

11.2.2.2 Vortrieb Baulos Sigirino

Die folgenden beschriebenen Ausbruchsicherungstypen beim Baulos Sigirino sind in der Figur 11-5 dargestellt.

Die Ausbruchsicherungstypen SPV 1–4 bestanden aus einem hufeisenförmigen Profil mit flacher Sohle. Es stand ein Verformungsraum von 5 cm für SPV 1–2 und 10 cm für SPV 3–4 im Gewölbe und 0 cm in der Sohle zur Verfügung. Der Vortrieb erfolgte im Vollausbruch. Die Ausbruchsicherung im Gewölbe war wie folgt aufgebaut:

- 5 cm Spritzbeton (mit Stahlfasern) im Brustbereich L1 als Kopfschutz
- eine Lage Bewehrungsnetz K196
- 5–10 cm Spritzbeton im Brustbereich L1
- Reibrohranker Typ Swellex (L = 3,0 m, Ftk > 120 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m)
- 10 cm Spritzbeton (ohne Stahlfasern) im Vortriebsbereich L2

Der netzbewehrte Spritzbeton wurde nach einer Anfangsphase teilweise durch stahlfaserbewehrten Spritzbeton ersetzt, um die Sicherungsarbeiten zu beschleunigen.

Ausbruchsicherungstypen SPV 5 und 6 bestanden aus einem hufeisenförmigen Profil mit gewölbter Sohle. Es stand ein Verformungsraum von 10 cm zur Verfügung. Der Vortrieb erfolgte im Vollausbruch. Die Ausbruchsicherung im Gewölbe war wie folgt aufgebaut:

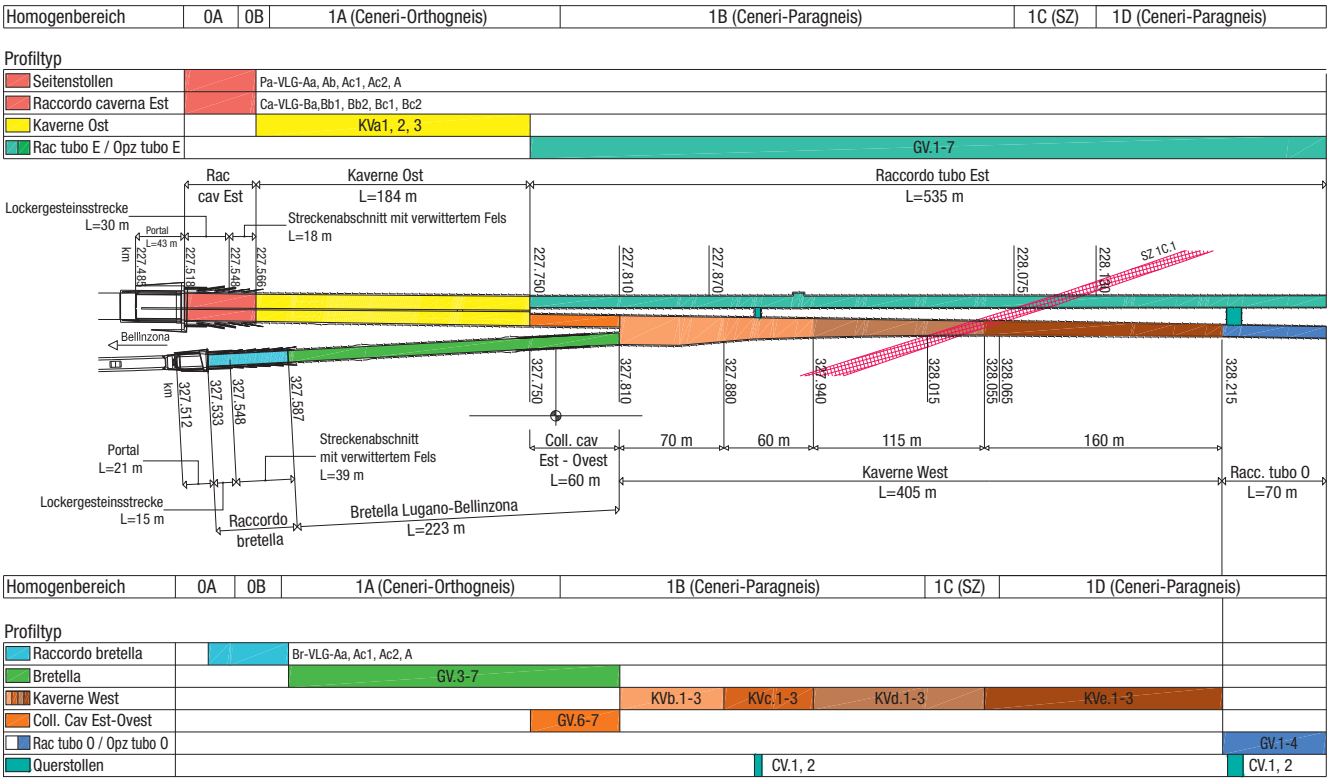


Fig. 11-3: Schematische Übersicht aller Ausbruchsicherungstypen im Ausführungsprojekt beim Vortrieb im Portalbereich Vigana.

- 15 cm Spritzbeton mit Stahlfasern (SF)
- eine Lage Bewehrungsnetz K283
- Stahlbogen TH29 im Abstand von 1,0 m
- Mörtelanker (L = 6,0 m, Ftk > 340 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m)
- 15 cm Spritzbeton, Injektionsanker (L = 8,00 m, Ftk > 460 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m)

Ausbruchsicherungstyp SPV 7 bestand aus einem ovalen, kreisähnlichen Profil. Es stand ein Verformungsraum von 15 cm zur Verfügung. Der Ausbruch der gewölbten Sohle erfolgte im Vortriebsbereich L2, spätestens 25 m hinter der Ortsbrust.

Die Ausbruchsicherung beinhaltete Stahlbögen TH 29, welche im Abstand von 1,2 m nach dem Aufspritzen von 5 cm Spritzbeton mit SF und dem Aufbringen einer Lage Bewehrungsnetz K283 eingebaut wurden. Danach wurde 15 cm Spritzbeton aufgetragen und die Systemankerung (q×l=1,25 m×1,20 m), bestehend aus Mörtelankern, L = 5 m, Ftk > 340 kN sowie einer zweiten Lage Bewehrungsnetz K283, versetzt.

Nach dem Ausbruch der Sohle wurden die TH-Bögen in der Sohle versetzt, an jene des Gewölbes angeschlossen und mit 20 cm Spritzbeton eingespritzt. Danach erfolgte das Auftragen von weiteren 10 cm Spritzbeton in Sohle und Gewölbe.

Ausbruchsicherungstyp SPV 8 bestand aus einem ovalen, kreisähnlichen Profil mit nachgiebigem Ausbau. Es stand ein Verformungsraum von 25 cm im Gewölbe und 20 cm in der Sohle zur Verfügung. Der Ausbruch der gewölbten Sohle erfolgte im Vortriebsbereich L2, spätestens 25 m hinter der Ortsbrust. Die Ausbruchsicherung im Gewölbe war wie folgt aufgebaut:

- 5 cm Spritzbeton mit SF
- eine Lage Bewehrungsnetz K283, Mörtelanker (L = 6,0 m, Ftk > 340 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m)
- 15 cm Spritzbeton, Injektionsanker (L = 8,00 m, Ftk > 460 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m)

Beim Erstellen des Spritzbetongewölbes wurden vier Schlitze mit 50 cm Breite ausgespart.

Der Sohlenbereich wurde nach dem Ausbruch mit 20 cm Spritzbeton, einer Lage Bewehrungsnetz K283 und Injektionsankern (L = 8,00 m, Ftk > 460 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m) gesichert.

Nach Ausbruch und Sicherung der Sohle und dem Abklingen der Verformungen erfolgten das Zuspritzen der Schlitze im Spritzbetongewölbe und das Auftragen von weiteren 10 cm Spritzbeton in Sohle und Gewölbe.

Ausbruchsicherungstyp SPV 9 bestand aus einem ovalen, kreisähnlichen Profil mit nachgiebigem Ausbau. Es stand ein Verformungsraum von 30 cm zur Verfügung. Der Ausbruch der gewölbten Sohle erfolgte im Vortriebsbereich L2, 10 bis max. 15 m hinter der Ortsbrust. Die Ausbruchsicherung im Gewölbe war wie folgt aufgebaut:

- 5 cm Spritzbeton (mit SF, Kopfschutz)
- eine Lage Bewehrungsnetz K283
- 20 cm Spritzbeton
- Stahlbögen TH29 im Abstand von 1,0 m
- Mörtelanker (L = 6,0 m, Ftk > 340 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m)
- 10 cm Spritzbeton, Injektionsanker (L = 8,00 m, Ftk > 460 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m)

Beim Erstellen des Spritzbetongewölbes wurden vier Schlitze à 1,10 m Breite ausgespart.

Im Sohlenbereich wurden nach dem Ausbruch die TH-Bögen versetzt, an jene des Gewölbes angeschlossen und mit 20 cm Spritzbeton eingespritzt. Es folgte die Sicherung mit einer Lage Bewehrungsnetz K283 und Injektionsankern (L = 8,00 m, Ftk > 460 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m).

Nach Ausbruch und Sicherung der Sohle und dem Abklingen der Verformungen erfolgten das Zuspritzen der Schlitze im Spritzbetongewölbe und das Auftragen von weiteren 10 cm Spritzbeton in Sohle und Gewölbe.

Ausbruchsicherungstyp SPV 10 bestand aus einem ovalen, kreisähnlichen Profil mit nachgiebigem Ausbau. Es stand ein Verformungsraum von 30 cm zur Verfügung. Im Unterschied zum Ausbruchssicherungstypen SPV 9 erfolgte der Vortrieb nicht in Etappe mit Gewölbe und Sohle unterteilt, sondern im Vollausbruch. Die Ausbruchsicherung war wie folgt aufgebaut:

- 5 cm Spritzbeton mit SF, Kopfschutz
- eine Lage Bewehrungsnetz K283

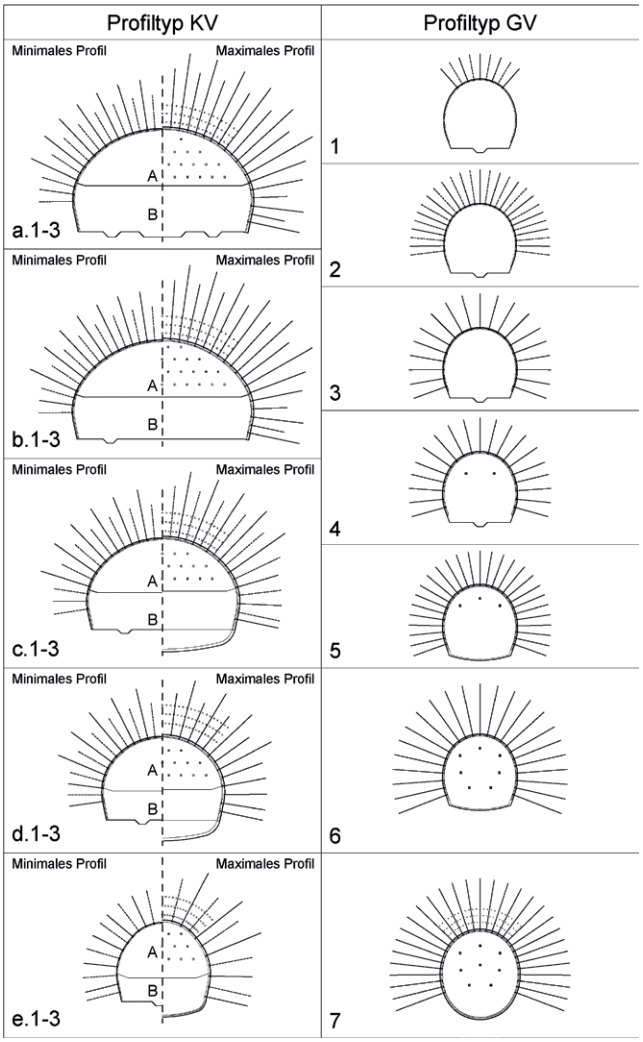


Fig. 11-4: Schematische Übersicht der Ausbruchsicherungstypen im Ausführungsprojekt beim Vortrieb im Portalbereich Vigana. KV = Ausbruchsicherungstypen in den Kavernen, GV = Ausbruchsicherungstypen im Einspurtunnel.

- Stahlbögen TH29 im Abstand von 1,0 m
- Injektionsanker (L = 8,0 m, Ftk > 460 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m)
- 15 cm Spritzbeton, Injektionsanker (L = 10,00 m, Ftk > 460 kN, q × l = 2,0 m × 1,0 m)

Beim Erstellen des Spritzbetongewölbes wurden vier Schlitze mit 1,10 m Breite ausgespart.

Im Sohlenbereich wurde spätestens 2 m hinter der Ortbrust der TH-Bogen mit 20 cm Spritzbeton eingespritzt, danach eine Lage Bewehrungsnetz K283 versetzt sowie die Systemankerung entsprechend dem Gewölbe vervollständigt.

Nach dem Abklingen der Verformungen erfoltgen das Einspritzen der Schlitze im Spritzbetongewölbe und das Auftragen von weiteren 10 cm Spritzbeton in Sohle und Gewölbe.

11.2.2.3 CAOP

Der Vortrieb der CAOP erforderte angesichts der grossen Ausbruchquerschnitte eine zwei- oder dreistufige Unterteilung der Ortsbrust und in einigen Fällen eine weitere Unterteilung in linke und rechte Strosse. Aufgrund der Vielfältigkeit der Ausbruchsicherungstypen der gesamten CAOP (Fig. 11-6) werden in diesem Kapitel nur die Ausbruchsicherungstypen der CAOP-W beschrieben.

Für den Vortrieb der CAOP standen fünf Ausbruchsicherungstypen zur Verfügung. Gitterbögen waren nur im CAOP-W.5 vorgesehen. Die Spritzbetonstärke der Aussenschale betrug in aufsteigender Reihenfolge 25 cm, 30 cm, 35 cm für die leichten Ausbruchsicherungstypen CAOP-W.1-3 und 40 cm für die beiden schweren Typen CAOP-W.4-5. Die Mörtelanker in der Kalotte hatten Längen zwischen 4 und 8 m (CAOP-W.1-3). Die beiden schweren Ausbruchsicherungstypen CAOP-W.4-5 wurden in der Kalotte mit 7–9 m Injektionsankern verstärkt. In den Paramenten der Strosse waren für alle Ausbruchsicherungstypen kürzere Mörtelanker mit Längen zwischen 4–6 m gewählt worden.

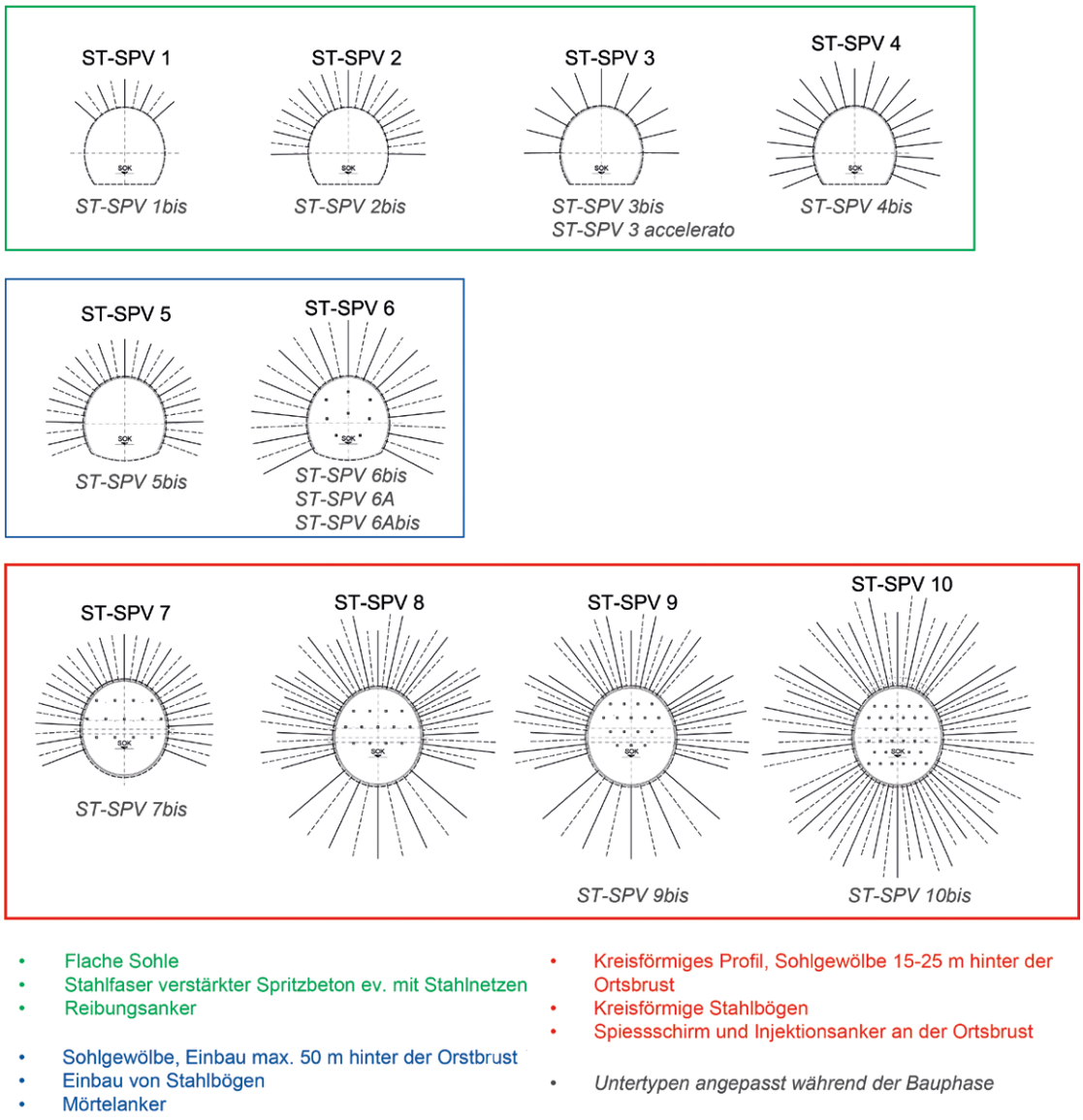


Fig. 11-5: Ausbruchsicherungstypen im Ausführungsprojekt Baulos Sigirino mit Anpassungen während der Bauphase. Weitere lokale Anpassungen sind ausführlich im Kapitel 11.3 beschrieben.

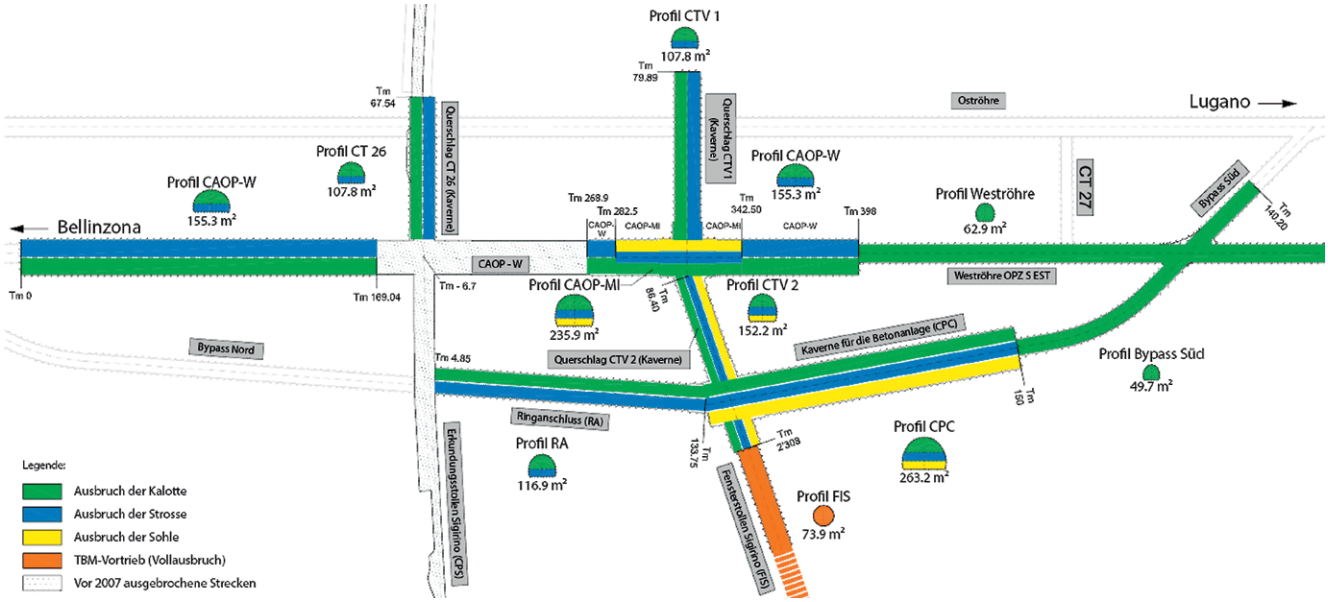


Fig. 11-6: Schematische Darstellung mit den Ausbruchquerschnitten und -arten im Zwischenangriff Sigirino (Stand der Vortriebe am 16.11.2009).

11.2.2.4 Verzweigungsbauwerk Sarè

Im Verzweigungsbauwerk Sarè waren drei Abschnitte in Abhängigkeit von der Grösse der Ausbruchsfläche mit jeweils einer leichten (VSO 1.x) und einer schweren Ausbruchsicherung (VSO 2.x) geplant (Fig. 11-7). Die leichte Ausbruchsicherung beinhaltete eine flache Sohle und die schwere hatte ein Sohlgewölbe. Gitterbögen waren in den Ausführungsplänen nicht vorgesehen, sie wurden aber während der Ausführung als Bauhilfsmassnahmen lokal im Störungsbereich eingesetzt (s. Vorauserkundung und Planung Gitterbögen im Verzweigungsbauwerk Sarè, Kap. 9.2.3, Fig. 9-11 und Fig. 9-12). Die leichte Ausbruchsicherung im Abschnitt 1 (VWO 1.1) beinhaltete 4 m lange Reibrohranker des Typs Swellex und eine 15 cm dicke Aussenschale aus Spritzbeton. Bei der schweren Ausbruchsicherung wurde die Spritzbetonschicht auf 25 cm erhöht und 6 m lange Mörtelanker eingebaut. Die leichte Ausbruchsicherung des Abschnittes 2 hatte 4 m lange Reibrohr- und Mörtelanker im Tunnelprofil. Die Spritzbetonschicht betrug 25 cm. In der schweren Ausführung wurden für die Ausbruchsicherung 6 m lange Mörtel- und Injektionsanker eingesetzt und eine 30 cm dicke Spritzbetonschicht aufgetragen. Analog zum Abschnitt 2 wurden die gleichen Systemanker auf 6 m Länge bei der leichten Ausbruchsicherung respektive 8 m bei der schweren Ausbruchsicherung verlängert. Die Spritzbetonstärke der Aussenschale betrug 30 cm und 35 cm.

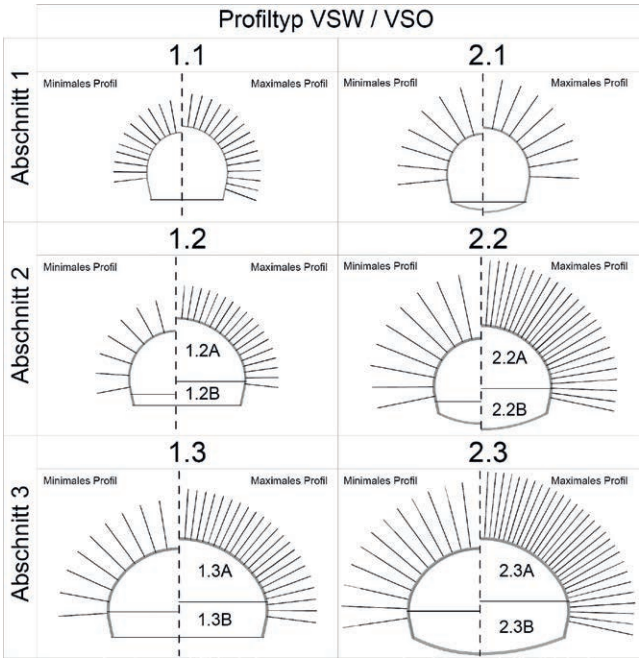


Fig. 11-7: Schematische Übersicht der Ausbruchsicherungstypen im Ausführungsprojekt beim Vortrieb im Verzweigungsbauwerk Sarè, VSW = Verzweigungsbauwerk Sarè West, VSO = Verzweigungsbauwerk Sarè Ost.

11.2.2.5 Portalbereich Vezia

Wegen der geringeren Gebirgsüberlagerung und den Massnahmen zur Reduzierung der Erschütterung und Körperschalls wurde die Ortsbrust beim Vortrieb im Portalbe-

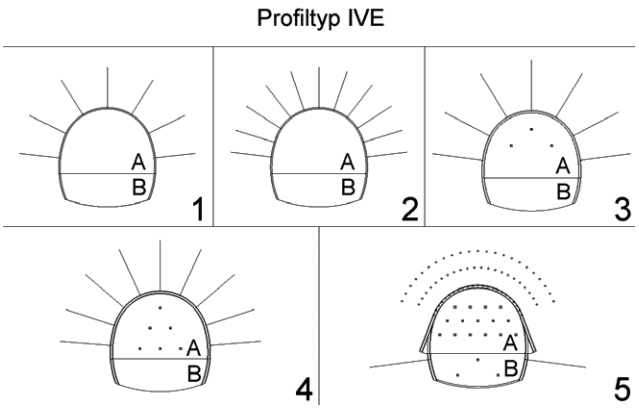


Fig. 11-8: Schematische Übersicht der Ausbruchsicherungstypen im Ausführungsprojekt beim Vortrieb im Portalbereich Vezia, A = Kalotte, B = Strosse.

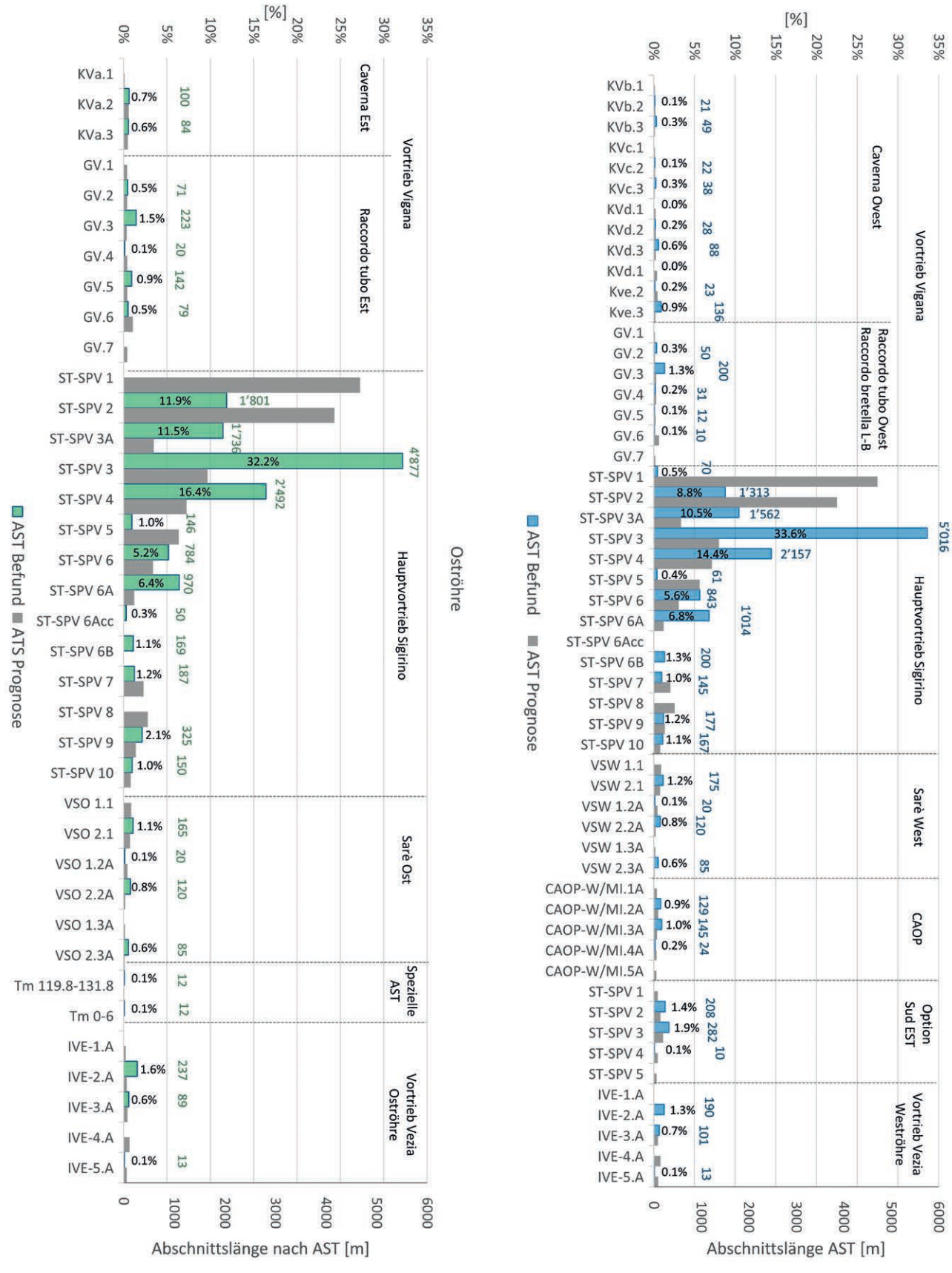


Fig. 11-9: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die a) Ost- und b) Weströhre.

reich Vezia in Kalotte und Strosse unterteilt. Als Stützmittel wurden fünf Ausbruchsicherungstypen mit gewölbter Sohle definiert. Bei den Ausbruchsicherungstypen IVE 1-2 waren 4 m lange Reibrohranker des Typs Swellex und eine Aussenschale mit 15 cm Spritzbeton vorgesehen. Beim Typ IVE 3 wurden die Reibbohranker mit 5 m langen Mörtelankern ersetzt und die Spritzbetonschicht der Aussenschale auf 24 cm erhöht. Zusätzlich wurden TH 29 Stahlbögen eingesetzt. Die Abstützung des Tunnelprofils mit Typ IVE 4 erfolgte mit TH 36 Stahlbögen und 5 m langen Mörtelankern, im Typ IVE 5 waren HEB Bögen und ein doppelter Spiessschirm mit 8 m langen Injektionsankern vorgesehen. Die Spritzbetonstärke der Aussenschale betrug 28 cm respektiv 30 cm.

11.2.3 Verteilung der Ausbruchsicherung im Befund

Dieser Abschnitt beschreibt abschnittsweise die Verteilung der eingesetzten Ausbruchsicherungstypen inklusiv Klassenbereinigung im CBT (s. geologisch-bautechnisches Längenprofil Taf. I) und erklärt die geologisch-geotechnischen Hintergründe für deren Festlegung. Weil die Ausbruchsicherung im CBT bauwerksbezogen definiert wurde und deshalb eine unterschiedliche Anzahl Ausbruchsicherungstypen aufweist, können diese nicht immer miteinander verglichen werden. Ausserdem kamen in den Kavernen im Portalbereich Vigana, in der CAOP und im Verzweigungsbauwerk Sarè eigene speziell festgelegte Ausbruchsicherungstypen zum Einsatz. Figur 11-9 illustriert übersichtlich die eingebauten Ausbruchsicherungstypen beider Tunnelröhren.

11.2.3.1 Portalbereich Vigana

Es ereigneten sich oft Auflockerung im Firstbereich, Kleinsteinfall und Kluftkörper, so dass der Einbau von des Ausbruchsicherungstyps GV 1 nicht möglich war. Dafür war die Verwendung des Typs GV 7 nicht notwendig. Der Typ GV 2 war typisch für Streckenabschnitte mit Kleinsteinfall. Zur Bewältigung von Kluftkörpern bewährte sich der Typ GV 3. Störungszonen oder Streckenabschnitte mit grösseren Wasserzuflüssen liessen sich mit dem Typ GV 4 durchörtern. Ausbruchsicherungstyp GV 6 entstand durch die Klassenbereinigung des GV 4.

Wegen der Störungszonen oder grösseren Wasserzutritten entschied man sich, die Kavernen abschnittsweise mit Gitterbögen der vorgesehenen Ausbruchsicherungstypen KVa-e.3A zu sichern.

11.2.3.2 Vortrieb Baulos Sigirino

Die Unterklassen der Ausbruchsicherungstypen, wie «bis» oder «bis 2» (s. Kap. 11.2.2, 11.3) werden in der Verteilung des Befundes zusammengefasst und sind im geologisch-bautechnischen Längenprofil (Taf. I) detailliert dargestellt. Auffällig sind die häufigen Wechsel der Ausbruchsicherungstypen, welche auf die kleinräumig wechselnden Gebirgsverhältnisse zurückzuführen ist.

Die in Kapitel 11.2 bereits beschrieben zehn Ausbruchsicherungstypen erlangten im Verlaufe der Vortriebsarbeiten mehrere Anpassungen und Optimierungen anlässlich des angetroffenen geomechanischen Felsverhaltens. Die beiden am häufigsten eingebauten Typen waren SPV 3 und SPV 4 gefolgt von SPV 3A, SPV 2 und SPV 6A. Typ SPV 8 kam wegen dem Kreisprofil ohne Stahlbögen nie zum Einsatz, stattdessen wählte man Typ SPV 7 oder SPV 9. Wegen des fehlenden Sohlgewölbes und der daraus folgenden fehlenden Steifigkeit des Profils gegenüber Horizontalverformungen (Kap. 11.3) verzichtete man nach der ersten Anwendung des Typs SPV 5 am Nordrand der LVC auf eine weitere Verwendung dieses Ausbruchsicherungstyps und verwendete anstelle den Typ SPV 6A.

Streckenabschnitte mit Ceneri-Orthogneis ermöglichten den Einbau von Typ SPV 2, während der Ausbau von Streckenabschnitten mit Ceneri-Paragneis oder Basit des Ceneri häufig mit leichten bis mittleren Ausbruchsicherungstypen, wie SPV 3–4 erfolgte. Die schweren Ausbruchsicherungstypen mit kreisrundem Profil und Stahlbögen (SPV 7, SPV 9 und SPV 10) gewährleisteten den Ausbauwiderstand in Störungszonen oder deren tektonisierten Randzonen für die Störungszonen 12A bis, 15B, beide in der Ceneri-Zone, sowie 30A in der Val-Colla-Linie. Vergleicht man Figur 11-10 mit Figur 11-11, so fällt besonders eine Verschiebung zu schwereren Ausbruchsicherungstypen im «Subparallelismus» auf. Asymmetrische Verformungen des Profils, begleitet durch Ablösungen und Kluftkörper im östlichen Kämpferbereich, erforderten verstärkt den Einbau der Typen SPV 3–4 an Stelle der prognostizierten Typen SPV 1–2. Zudem bewirkten lokale Verstärkungen der Systemankerung

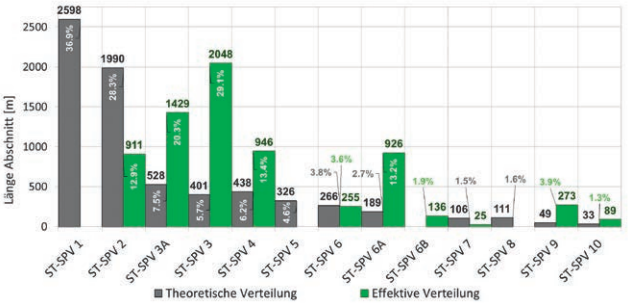


Fig. 11-10: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die Oströhre beim Vortrieb Sigirino für die nördliche und mittlere Ceneri-Zone (km 228.285–235.322).

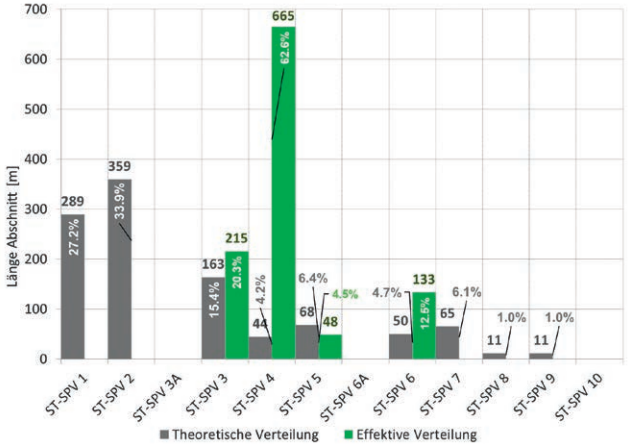


Fig. 11-11: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die Oströhre beim Vortrieb Sigirino im Subparallelismus (km 235.322–236.068).

in einigen Fällen nach der Klassenbereinigung eine Höherstufung des Ausbruchsicherungstyps.

Am Ende resultierte für die Strecke zwischen der mittleren Ceneri-Zone und der CAOP vorwiegend eine Ausführung mit Typ SPV 4. Es ist gleichzeitig auch die einzige Strecke im Nordvortrieb Sigirino mit Einbau von Typ SPV 5.

Da die CAOP und die Option Einspurtunnel Süd (OPZ S EST) im Rahmen eines früheren Bauloses ausgebrochen worden waren, galten für die Ausbruchsicherungstypen andere vertragliche Regelungen als im Baulos Sigirino. Diese Strecke, bestehend aus Gneis und Glimmerschiefer des Giumello-Gneises, stand ebenso unter dem strukturgeologischen Einfluss des «Subparallelismus» und dementsprechend wurden beim Vortrieb hauptsächlich mittlere Ausbruchsicherungstypen eingebaut. Durch die Verformungen der Aussenschale im Kreuzungsbereich der CAOP MI und den Querschlägen CTV-1 und CTV-2 entstanden Rissbildungen im Spritzbeton und zahlreiche verbogene Ankerplatten. Mit der nachträglichen Verstärkung der Ausbruchsicherung resultierte für diesen Streckenabschnitt ein Ausbruchsicherungstyp CAOP-MI.4A.

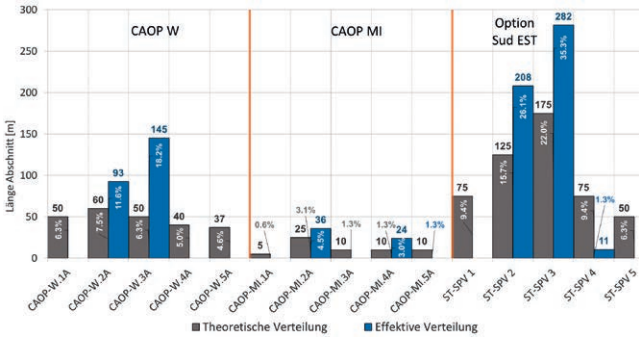


Fig. 11-12: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die CAOP und OPZ S EST.

Beim Vortrieb zwischen CAOP und Val-Colla-Linie zeigte sich eine ähnliche Verteilung der Ausbruchsicherung wie in der mittleren Ceneri-Zone. Die günstigen gelogischen Bedingungen zu Beginn des Vortriebes ermöglichten den Einbau vonTyp SPV 2. Mit fortschreitendem Vortrieb in Richtung Val-Colla-Linie musste die Stufe der Ausbruchsicherungstypen laufend erhöht und an die zur Tunnelachse schrägstehenden Scher- und Störungszonen angepasst werden. Im Homogenbereich 30A erforderte der Fels im Störungszonenbereich den Einbau von Typ SPV 10.

Für die Durchörterung bei schwierigen Verhältnissen sah das Projekt speziell für die Val-Colla-Linie Ausbruchsicherungstypen ab Stufe SPV 7 aufwärts vor. Diese wurden aufgrund der günstigeren Felsverhältnisse im südlichen Streckenabschnitt der Val-Colla-Linie (HB 30B) nicht eingesetzt, da dort wenig zerschertes Gestein, welches dem Stabbiello-Gneis gleicht, angetroffen wurde. Bei der Durchörterung des Homogenbereichs 30B wurden für die Durchörterung von Scherzonen die Typen SPV 4 und SPV 6 verwendet.

Bei der Durchörterung der Val-Colla-Zone ausserhalb des Verzweigungsbauwerks Sarè konnten regelmässig die Typen SPV 2–3 eingebaut werden, einerseits wegen der geringen Gebirgsüberlagerung, anderseits wegen längeren Strecken mit intaktem Fels, bestehend aus Stabbiello-

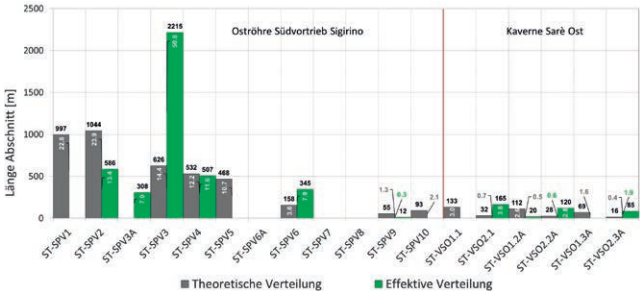


Fig. 11-13: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die Oströhre beim Vortrieb Sigirino im Streckenabschnitt der Val-Colla-Zone (km 238.022–242.384).

Gneis, Amphibolit-Körpern und Bernardo-Orthogneis. Der Typ SPV 6 wurde fast ausschliesslich südlich der Stirnwand des Verzweigungsbauwerks Sarè in der Umgebung der Hosentunnel und zum angrenzenden Bernardo-Orthogneis eingesetzt, welcher von einer Störungszone umgeben war (Fig. 11-42, Oströhre km 240.653–240.693, Weströhre km 340.681–340.771). Der Ausbruchsicherungstyp SPV 9 kam anlässlich der Klassenbereinigung eines ursprünglich als Typ SPV 6 klassifizierten Abschnitts unmittelbar nach der Stirnwand des Verzweigungsbauwerks Sarè zustande (km 240.647).

Angesichts des zunehmenden Ausbruchquerschnitts im Verzweigungsbauwerk Sarè wurde im Ausführungsprojekt eine Unterteilung in drei Streckenabschnitte gewählt (Kap. 11.4.7), für die jeweils zwei Ausbruchsicherungstypen zur Auswahl standen. Eine flache und wellige Schieferung zusammen mit mehreren Scherzonen führten zu vermehrter Auflockerung im Fels und induzierten mit zunehmendem Kavernendurchmesser Verformungen und geologische Überprofile, sodass zum grössten Teil auf den höheren Ausbruchsicherungstyp mit zusätzlichen integrieren Mörtelankern oder Stahlbögen zurückgegriffen werden musste (Kap. 11.4.7).

Die Ausbruchsicherungstypen im Hosentunnel beinhalten SPV 6, 6B und 9 auf den Streckenabschnitten, wo der Abstand zwischen Einspurtunnel und Tunnelstumpen weniger als ein Tunneldurchmesser beträgt. Der Rest der Tunnelstumpen wurde mit Typ SPV 4 gesichert (Fig. 11-14). Insgesamt 173 m der Ausbruchsicherung im Hosentunnel wurde während der Klassenbereinigung höhergestuft, da nachträglich noch Anker versetzt werden mussten.

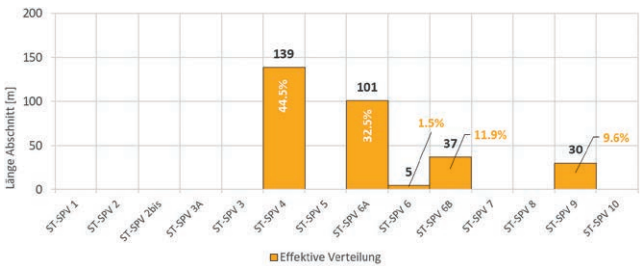


Fig. 11-14: Effektive Ausbruchsicherung inklusive Klassenbereinigung für den Hosentunnel südlich der Stirnwand des Verzweigungsbauwerks Sarè.

11.2.3.3 Portalbereich Vezia

Die Ausbruchsicherung beider Tunnelvortriebe in Vezia enthält gemäss Ausführungsprojekt Ausbruchsicherungstyp IVE-5A mit Stahlbögen auf den ersten 13 m der Strecke. Danach folgt der modifizierte Typ IVE-3 ohne Stahlbögen für den Kreuzungsbereich mit dem Umfahrungsstrassentunnel Vedeggio – Cassarate und Typ IVE-2 für die restliche Strecke bis Vortriebsende (Fig. 11-15).

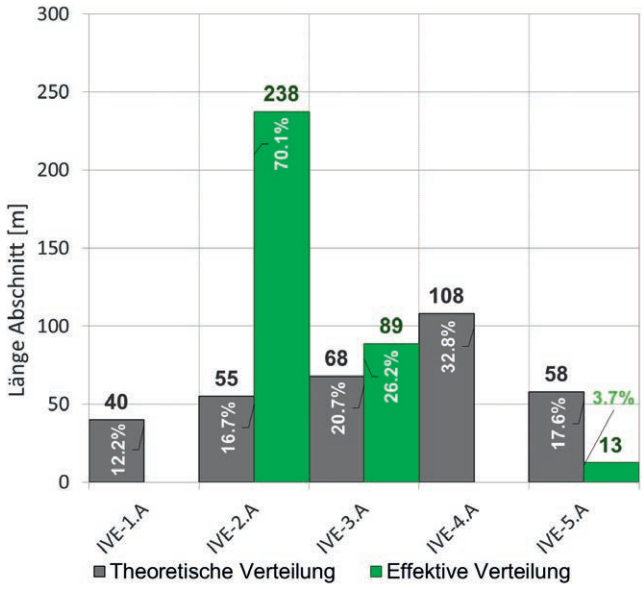


Fig. 11-15: Vergleich zwischen prognostizierten und effektiven Ausbruchsicherungstypen für die Oströhre beim Vortrieb Vezia (km 242.384–242.723).

11.2.3.4 Fensterstollen Sigirino

Die ersten 40 m des Ausbruchs der Startröhre für die TBM im FIS nach dem Portal fanden in Sprengvortrieben SPV 1 und 2 statt (Fig. 11-16). Die Bildung von grösseren Kluftkörpern im Firstbereich bis zu 13,5 m³ erforderten auf der Sprengvortriebsstrecke mehrheitlich den Einbau von Ausbruchsicherungstyp SPV 2 und eine Verlängerung der Startröhre um 6 m.

Die optimalen Felsverhältnisse im FIS, infolge der orthogonalen Lage der Strukturen (Hauptschieferung und Störungszonen) zur Vortriebsrichtung erlaubten den Einbau von FIS TBM 2 auf 80% der Strecke. Die Ausbruchsicherungstypen FIS TBM 1 und 7 wurden nicht verwendet.

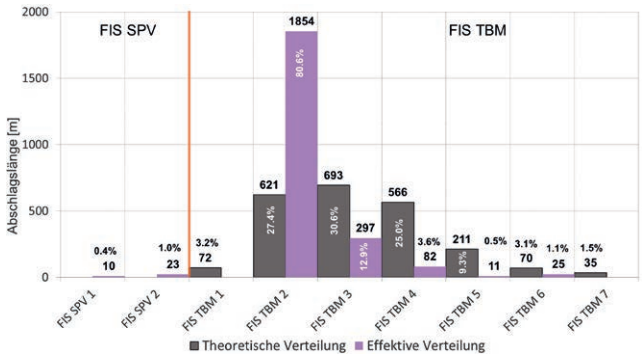


Fig. 11-16: Vergleich zwischen prognostizierter und effektiver Ausbruchsicherung für den FIS zwischen Tm 0 und 2308.

Bei Kluftkörperbildung eignete sich der Typ FIS TBM 3 und in Auflockerungs-, Scher- oder Störungszonen höhergestufte Ausbruchsicherungstypen wie FIS TBM 4–6.

11.3 Anpassungen der Ausbruchsicherung

Die Festlegung der Ausbruchsicherung im Vortrieb basierte auf den Leitlinien (A 1). Die Auswahl des geeigneten Ausbruchsicherungstypen stützte sich primär auf den Beobachtungen geologischer Ereignisse vor Ort, die sich den im Projekt definierten Gefährdungsbildern zuordnen liessen, z.B. Verformungsmessungen und den Vorauserkundungsbohrungen. Alle von der öBL vorgeschlagenen Änderungen der Ausbruchsicherungstypen wurden zusammen mit dem BH und der Unternehmung festgelegt.

11.3.1 Anpassungen im Portalbereich Vigana

Die Lockergesteinsstrecke beim Unterqueren der Autobahn A2 erfolgte für den Anschluss Kaverne Ost (raccordo caverna est) und den Raccordo Bretella im Jet-Grouting-Verfahren, aber in unterschiedlicher Ausbruchsart (Fig. 11-3). Während der Raccordo Bretella (A = 95,5 m²) im Vollausbruch mit einem einfachen Jetschirm erfolgte, wurde der grössere Querschnitt des Anschlusses Kaverne Ost (A = 228,05 m²) in Teilausbrüchen vorgetrieben. Figur 11-17 a schematisiert den Querschnitt des Anschlusses Kaverne Ost mit allen Vortriebsetappen und der angewendeten Jet-Grouting-Methode für die Durchörterung im Lockergestein unter der Autobahn A2 kurz vor dem Abtragen der Strosse. Beide vorauseilenden Seitenstollen (A = 40,3 m²) des Anschlusses Kaverne Ost wurden im Jet-Grouting-Verfahren und Einfachschirm im Vollausbruch ausgebrochen. Nach dem Betonieren der Widerlager für die Kalotte und dem Verfüllen des restlichen Hohlraums mit Ausbruchmaterial in beiden Seitenstollen, konnte der Kalottenvortrieb mit doppeltem Jetschirm erfolgen, bevor in einem letzten Ausbruchvorgang die Strosse abgetragen wurde. Der Kalottenvortrieb im Lockergestein verlief auf einer Gesamtlänge von 48 m in fünf Jetting-Etappen mit Vortriebslängen von einem Meter, u.a. aus Sicherheitsgründen wegen der darüber liegenden Autobahn. Die Aussenschale der Kaverne Ost betrug 5 cm Kopfschutz und weitere 65 cm, die in mehreren Spritzbetonschichten aufgetragen wurden. Die übriggebliebenen keilförmigen Jetting-Säulennischen wurden abschliessend mit Auftragen von mehreren Spritzbetonschichten verfüllt.

Beim Übergang in das Festgestein (s. Kap. 3.1.5.1) im Bereich des Verwitterten Ceneri-Paragneises bei km 227.536, im Anschluss Kaverne Ost und bei km 327.537 im Raccordo Bretella kamen Bewehrungsnetze, mit Gitterbögen und Spritzbeton zum Einsatz.

Ab dem Vortrieb im Festgestein der Kaverne Ost wurden einige Bauhilfsmassnahmen und Anpassungen an der Ausbruchsicherung durchgeführt. Die Reduzierung der Abschlagslängen war in Streckenabschnitten notwendig, in denen eine subhorizontal einfallende Schieferung und intensive Durchtrennung des Gebirges zu Ablösungen führte, die systematisch geologische Überprofile in der Kalotte verursachten (Kap. 10.2 und 9.1.4)

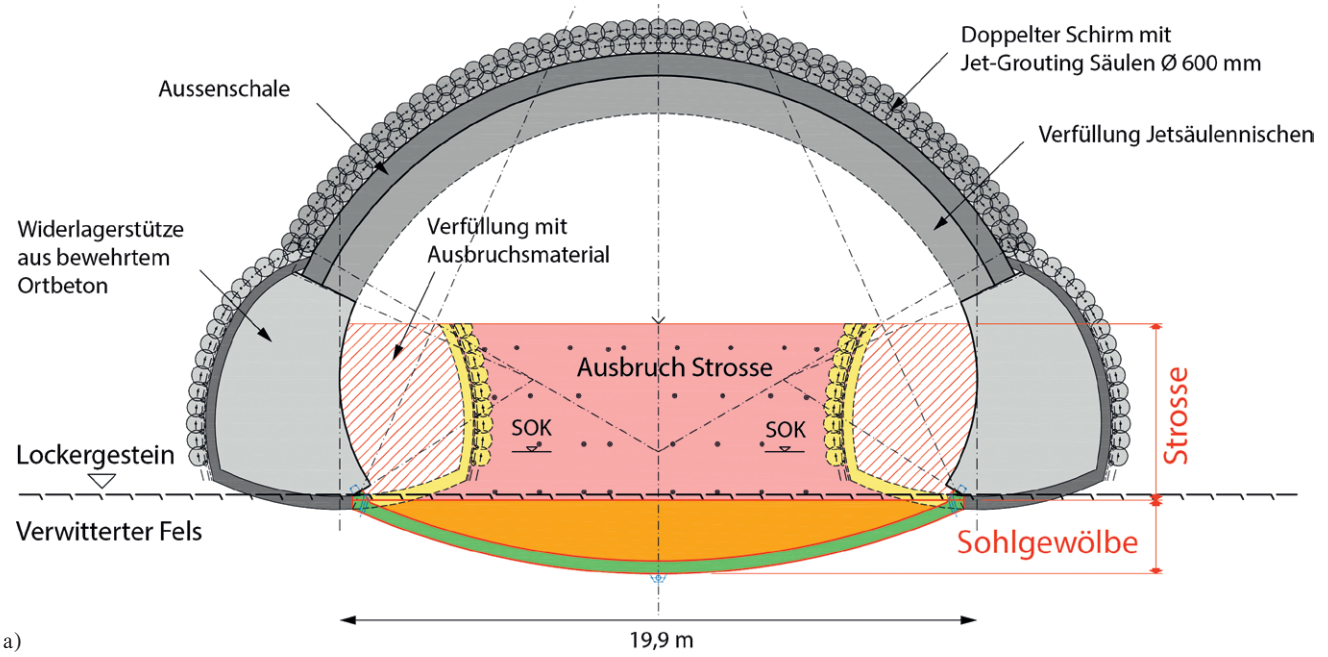
In den beiden Störungszonen der Kaverne Ost km 227.644–227.653 und im Raccordo Ost km 228.145–228.157 wurde die Ortsbrust mit 9–12 m langen IBO-Ankern gesichert, um potenzielle Gleitkörper wegen der bergwärts ausfallenden Schieferung zu stabilisieren.

Ortsbrustanker wurden in der Kaverne West (km 328.122–328.140) während der Durchörterung der kakiritischen Störungszone SZ 1Cbis.1 im Zusammenhang mit Wasserzutritten eingesetzt. Diese haben eine Reduktion der Kohäsion im kakiritischen Gesteins bewirkt und dadurch die Ortsbrust lokal destabilisiert.

11.3.2 Anpassungen beim Vortrieb Baulos Sigirino

11.3.2.1 Anpassung der Ausbruchsicherungstypen SPV 2–4

Die Ausbruchsicherungstypen SPV 1–4 mit einem hufeisenförmigen Profil und flacher Sohle (Fig. 11-5) fanden vorwiegend Anwendung in einem Spannungsfeld mit elas-



a)

b)

Fig. 11-17: a) Der Querschnitt des Raccordo Kaverne Ost mit allen Vortriebsetappen, b) Stabilisierung der Ortsbrust im Lockergestein mittels bewehrten Jetting-Säulen. Auf beiden Seiten sind die Seitenstollen mit einfachem Jetting-Schirm und Aussenschale erkennbar (Foto IG ITC).

Fig. 11-18: a) Der Ausbruchsicherungstyp KVe.3A wurde an der Ortsbrust mit 9 m langen IBO-Ankern während der Durchörterung der kataklastisch-kakiritischen Störungszone 1Cbis.1 in der Kaverne West km 328–137 verstärkt. b) Für Ereignisse wie Ausbrechen von Gleitkörpern an der Ortsbrust in der Kaverne Ost, bei km 227.648 kamen 9 m lange IBO-Anker zum Einsatz (Fotos IG ITC).

tischer Verformung bei Auftreten von geringen Verformungen <20 mm im Gewölbe und den Gefährdungsbildern Kleinsteinfall, Ablösungen und Kluftkörper.

Ab Beginn der Vortriebe des Bauloses Sigirino hat sich aus arbeitstechnischen Gründen gezeigt, dass das Verlegen von Bewehrungsnetzen für diese Ausbruchsicherungstypen wegen der Bildung eines unregelmässigen Überprofils häufig Mehraufwände erzeugte. Insbesondere in der südlichen und mittleren Ceneri-Zone bewirkten Ablösungen und Kluftkörper während des Ausbruchs ein unregelmässiges stufenförmiges Profil, wodurch sich das Befestigen von Bewehrungsnetzen erschwerte, und sich im Endeffekt keine sicherheitstechnischen Vorteile abzeichneten.

Ab September 2010 prüfte die öBL zusammen mit der Unternehmung in einer Teststrecke, die erste Lage Bewehrungsnetze mit stahlfaserverstärktem Spritzbeton zu ersetzen.

Die Ergebnisse überzeugten, denn der Austausch der Bewehrungsnetze durch stahlfaserverstärkten Spritzbeton verminderte die Rissbildung und Abplatzungen des Spritzbetons in Kalotte und Kämpferbereich, vorwiegend im «Subparallelismus», in dem asymmetrische Verformungen auftraten. Das Weglassen des Bewehrungsnetztes war eine Optimierung im Arbeitsprozess mit gleichzeitiger Erhöhung der Sicherheit für die Belegschaft im Brustbereich L1. Die Ausbruchsicherungstypen ohne erste Bewehrungsnetzlage erhielten die Bezeichnung «bis» (Tab. 11-2).

Angesichts der guten Ergebnisse und Erfahrungen bei der Anwendung der «bis»-Profile, strebte die öBL ab Dezember 2011 eine weitere Vereinfachung der Ausbruchsicherungstypen für Typ SPV 3bis- und Typ SPV 4bis an, indem wiederum auf einer Teststrecke experimentell faserverstärkter Spritzbeton die zweite Bewehrungsnetzlage ersetzte. Diese angepassten Ausbruchsicherungstypen erhielten die Bezeichnung «bis 2».

Zum Abschluss erhielt die Aussenschale im Vortriebsbereich L2 eine mindestens 3 cm dicke Ausgleichslage mit Spritzbeton SB 3, um eine möglichst glatte Oberfläche für das Verlegen der Teilabdichtung zu erhalten. Das Auftragen des SB 3 erfolgte unmittelbar nach Auftragen des faserverstärkten SB 1, um eine bessere Haftung der beiden Lagen zu gewährleisten.

11.3.2.2 Anpassung des Ausbruchsicherungstyps SPV 6A

In der nördlichen Ceneri-Zone, die sich bis zum Homogenbereich TO 12 erstreckt, traten wiederholt Abfolgen von Scher- und Störungszonen auf (Fig. 11-23 und Fig. 11-24), die meistens orthogonal zur Tunnelachse orientiert waren. Eine weitere Eigenschaft des Gebirges in dieser Zone war die gegen Süden einfallende Schieferung bei mittlerem Einfallswinkel, die beim Nordvortrieb des Hauptloses bergwärts ausfallende Trennflächen bildeten.

Durch diese geologischen Verhältnisse wurde beim Übergang von der mittleren in die nördliche Ceneri-Zone festgestellt, dass die Verformungen im Tunnel relativ gering ausfielen (i. Allg. <30 mm), sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung, und sie sich bereits zwei Tunneldurchmesser hinter der Ortsbrust stabilisierten (Fig. 11-19).

Kluftkörper, Ablösungen und lokale Ortsbrustinstabilität durch Gleitkörper, verursacht durch bergwärts ausfallende Schieferung, waren die häufigen Ereignisse in den Störungszonen der nördlichen Ceneri-Zone (Fig. 10-2 b).

Um bei diesem Szenario sowohl die Vortriebsleistung als auch die Kosten zu optimieren, wurde der Ausbruchsicherungstyp SPV 6A entworfen. Es handelt sich dabei um eine Kombination aus dem hufeisenförmigen Profil mit flacher Sohle des Typs SPV 4 und den Sicherungsmitteln des Typs SPV 6 mit Stahlbögen. Ein weiterer Vorteil dieses angepassten Ausbruchsicherungstyps SPV 6A war, dass während des Vortriebs schnell und flexibel Änderungen vorgenommen werden konnten. Da die Profilgeometrie des Typs SPV 6A identisch mit der des Typs SPV 4 ist, konnte der Übergang in Abhängigkeit der Beschaffenheit des Gebirges zwischen den beiden unmittelbar erfolgen.

11.3.2.3 Anpassung des Ausbruchsicherungstyps SPV 6 B

Die Störungszonen SZ 6C.1 und SZ 10B.1 auf Höhe des Val d'Isone (Fig. 11-22), bzw. beim Vortrieb im Anschluss an das Verzweigungsbauwerk Sarè (Streckenabschnitte Oströhre km 240.653–240.693 und Weströhre km 340.681–340.771) führten in der Kalotte zu Verformungen von durchschnittlich weniger als 30 mm und hatten dadurch keine besondere bautechnische Relevanz für die Ausbruchsicherung. Hingegen erreichte die Ortsbrustinstabilität, hervorgerufen durch

Tab. 11-2: *Gegenüberstellung der angepassten Ausbruchsicherungstypen SPV 2–4.*

Ausbruchsicherungstyp	**ST-SPV2**	**ST-SPV2 bis**
Kopfschutz	5 cm SB 1 faserverstärkt	5 cm SB 1 faserverstärkt
Anker	Reibungsanker Typ Swellex	Reibungsanker Typ Swellex
1. Lage Bewehrungsnetz	–	–
1. Lage Spritzbeton	–	–
2. Lage Bewehrungsnetz	K196	–
2. Lage Spritzbeton	10 cm SB 3	7 cm SB 1 faserverstärkt + 3 cm SB 3

Ausbruchsicherungstyp	**ST-SPV3**	**ST-SPV3 bis**	**ST-SPV3 bis 2**
Kopfschutz	5 cm SB 1 faserverstärkt	5 cm SB 1 faserverstärkt	5 cm SB 1 faserverstärkt
Anker	Mörtelanker	Mörtelanker	Reibungsanker Typ Swellex
1. Lage Bewehrungsnetz	K196	–	–
1. Lage Spritzbeton	10 cm SB 1	10 cm SB 1 faserverstärkt	10 cm SB 1 faserverstärkt
2. Lage Bewehrungsnetz	K196	K196	–
2. Lage Spritzbeton	10 cm SB 3	10 cm SB 3	7 cm SB 1 faserverstärkt + 3 cm SB 3

Ausbruchsicherungstyp	**ST-SPV4**	**ST-SPV4 bis**	**ST-SPV4 bis 2**
Kopfschutz	5 cm SB 1 faserverstärkt	5 cm SB 1 faserverstärkt	5 cm SB 1 faserverstärkt
Anker	Mörtelanker	Mörtelanker	Mörtelanker
1. Lage Bewehrungsnetz	K196	–	–
1. Lage Spritzbeton	10 cm SB 1	10 cm SB 1 faserverstärkt	10 cm SB 1 faserverstärkt
2. Lage Bewehrungsnetz	K196	K196	–
2. Lage Spritzbeton	10 cm SB 3	10 cm SB 3	7 cm SB 1 faserverstärkt + 3 cm SB 3

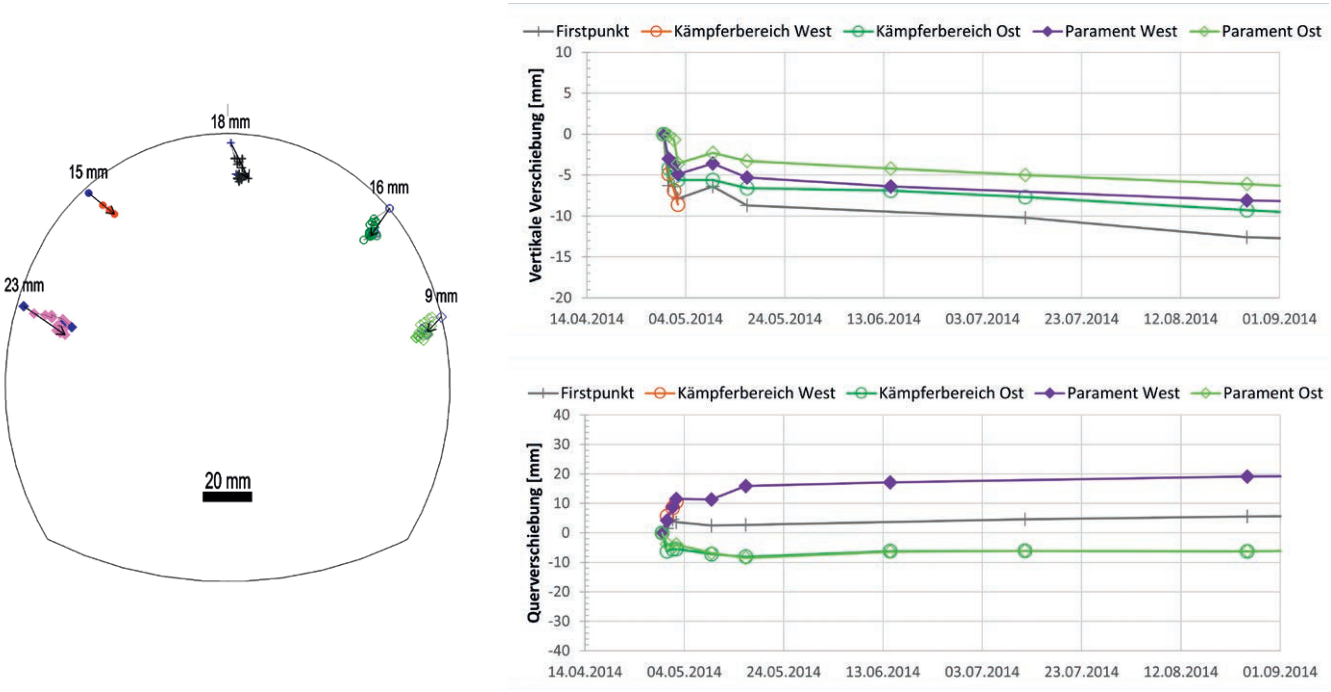


Fig. 11-19: Radiale Verformungsmessungen in der Weströhre bei Station km 331.197 repräsentiert als Vektoren im Querprofil und Weg-Zeit-Diagramm.

kataklastische oder kakiritische Störungszonen und Kluftkörper, ein grösseres Ausmass im Vergleich zu den in Kapitel 10.2 beschriebenen Ereignissen. Dies erforderte, die Ausbruchsicherung des Typs SPV 6A mit zusätzlichen Bauhilfsmassnahmen, wie Verstärken von Ortsbrustanker und Spiessschirm in der Kalotte, was vertragstechnisch eine Klassenbereinigung und Höherstufung des Ausbruchsicherungstyps auf SPV 7 mit sich brachte. Die Erfahrung aus dem Einbau des Typs SPV 7 in der Störungszone SZ 12A bis.1 hatte gezeigt, dass in geotechnischer Hinsicht für die Felsverhältnisse in der nördlichen Ceneri-Zone eine Kombination von Sicherungsmitteln eines Typs SPV 7 mit der Profilgeometrie nach Typ SPV 6A realisierbar ist (Fig. 11-20). Dieser neue Typ SPV 6B hatte den Vorteil, eines für die Innenschale kleineren Sohleblocks, weil der Ausbruch mit einem hufeisenförmigen Profil mit flachem Sohlgewölbe statt einem ovalen Profil erfolgen konnte. Des Weiteren wurden Kopfschutz mit Spritzbeton der Frühfestigkeitsklasse J3 und Sohlschluss innerhalb von 15 m hinter der Ortsbrust realisiert.

Diese Anpassungen der Ausbruchsicherung ermöglichten es, einen optimalen Kompromiss zwischen Sicherheit, Vortriebsleistung und Wirtschaftlichkeit für Vortrieb und Innenausbau zu gewährleisten.

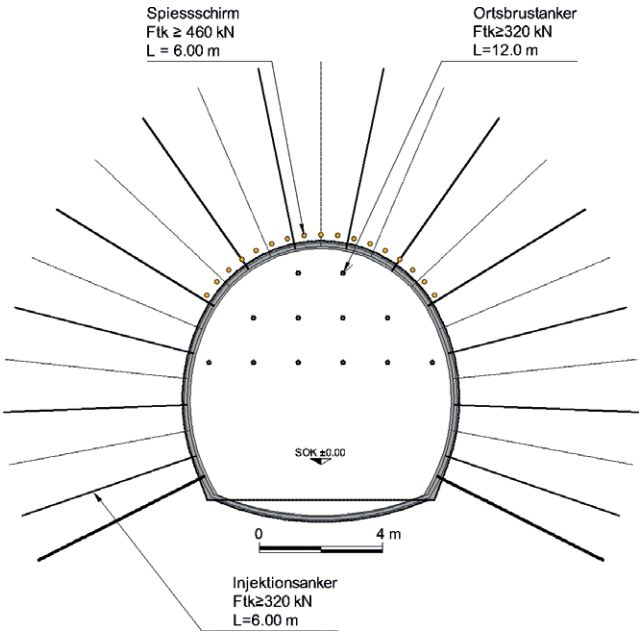


Fig. 11-20: Auszug aus dem Festlegeblatt eines Ausbruchsicherungstyps SPV 6B in der Weströhre bei km 330.867 mit Einbau von Spiessen und Ortsbrustankern.

11.4 Bauhilfsmassnahmen und Anpassungen der Ausbruchsicherung an die lokalen Felsverhältnisse

Dieses Kapitel beschreibt die Bauhilfsmassnahmen und Anpassungen der Ausbruchsicherung an die lokalen Felsverhältnisse und erläutert dabei die geologischen und geotechnischen Hintergründe anhand von Beispielen.

11.4.1 Bauhilfsmassnahmen in den Bereichen von Entspannungsschlägen

Entspannungsschläge begleiteten den Nordvortrieb, insbesondere im Ceneri-Orthogneis und in den Gneisen des Ceneri-Paragneis mit isotroperem Gefüge im Gebiet der mittleren Ceneri-Zone. Die Entspannungsschläge erfolgten ab einer Gebirgsüberlagerung von rund 500 m. Dieses Gefährdungsbild war in der Prognose des CBT nicht vorgesehen.

Zur Minimierung der Gefährdung durch Entspannungs- oder Bergschläge beim Vortrieb (Tab. 11-3) entwarf die öBL gemeinsam mit der Unternehmung einen Massnahmenplan. Für den Befund sowie die geologischen und geotechnischen Einzelheiten zum Thema Entspannungsschläge im CBT wird auf Kapitel 10.2.3 verwiesen.

11.4.2 Bauhilfsmassnahmen auf der Strecke zwischen Val d'Isone und Val Mara (HB 6C – HB 12Bbis)

Die zur Tunnelachse tangential orientierte Streichrichtung der Haupttrennflächen führte besonders im Bereich aus der Ortsbrust ausfallenden Schieferung und Scherzonen zu einer reduzierten Stabilität der Ortsbrust, oft durch Herausgleiten von plattenförmigen Kluftkörpern oder Mehrausbrüchen (Fig. 11-21). Ortsbrustinstabilität und Bildung von Kluftkörpern erreichten durch das grössere Ausmass und häufige Auftreten besonders in Stör- und Scherzonen eine beträchtliche bautechnische Relevanz, so dass sich das typische Gefährdungsbild «Ablösungen» der mittleren Ceneri-Zone änderte.

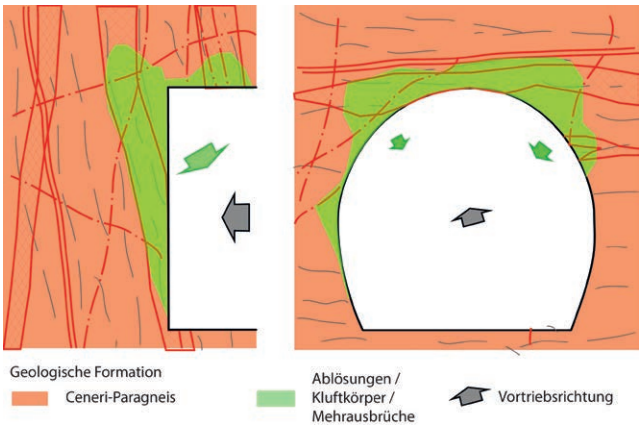


Fig. 11-21: Geotechnisches Modell für das Gefährdungsbild «Ortsbrustinstabilität» in der nördlichen Ceneri-Zone.

Tab. 11-3: *Massnahmenplan gemäss Konzept für das Vorgehen bei Auftreten von Entspannungs- und Bergschlägen beim Vortrieb im CBT.*

Gefährdungsbild	Freiwerdende Energie	Klassifizierung (Grad des Gefährdungsbilds)	Massnahmen
Bergschlagähnliche Erscheinungen, Entspannungsschläge	gering	D0 leichter Entspannungsschlag	• Informieren des Bauführers • Dokumentieren in den Tagesberichten (UN und öBL) • Regelmässige Kontrollen auf Rissbildung in der Aussenschale • Keine Personen ausserhalb von geschützten Baumaschinen im Brustbereich L1 während der ersten vier Stunden nach der Sprengung • Keine Personen im ungeschützten Brustbereich L1 während der Bohrung von Ankern
		D1 mittlerer Entspannungsschlag	• Zusätzlich zur Stufe D0: • Überprüfen der Ankerwirkung (Art, Länge, Anzahl der Anker, Raster und Ankerplatten) • Überprüfen der Abschlagslänge • Mögliche Anwendung von Beton J3 für den Kopfschutz und Ortsbrust prüfen • Erhöhung der Spritzbetonschicht für den Kopfschutz und Ortsbrust prüfen • Eventueller Einbau von Bewehrungsnetzen zum Schutz von Spritzbetonablösungen im Gewölbe (nur im Vortriebsbereich L2).
		D2 starker Entspannungsschlag	• D2A, zusätzlich zur Stufe D1: • Felsreinigung der entspannten Bereiche • Anwendung von Beton J3 für den Kopfschutz und Ortsbrust
			• D2B, zusätzlich zur Stufe D2A: • Abschlagslänge verkürzen • Einbau von Reibbohranker des Typs SuperSwellex (Ftk ≥ 240 kN) • Spritzbetonstärke im Kopfschutz erhöhen • Ankerraster verkleinern und/oder Ankerlänge erhöhen • Eventueller Einbau von Bewehrungsnetzen im Ganzen Profil im Vortriebsbereich L2 • Eventueller Einbau von Ortsbrustankern • Eventueller Ausbruch der Ortsbrust in konkaver Form
Bergschlag	hoch	D3 Bergschlag	• Zusätzlich zur Stufe D2B: • Erneute Verkürzung der Abschlagslänge • Benachrichtigung bei aussergewöhnlichen Ereignissen an die öBL • Eventuelle Auflockerungssprengungen durchführen

11.4.3 Bauhilfsmassnahmen in der ITZ (HB 15Bbis)

Die Störungszone im Homogenbereich 15Bbis, auch genannt intensiv tektonisierte Zone (ITZ), hatte beim Vortrieb im «Subparallelismus» der mittleren Ceneri-Zone von allen angetroffenen Störungszonen die höchste bautechnische Relevanz. Dabei stützte sich die prognostizierte Verteilung der Ausbruchsicherungstypen SPV 7–10 auf die Ergebnisse aus der Kernbohrung CB84, mit einer vorwiegend kakiritischen Gesteinszusammensetzung auf einer Länge von 15 m (s. 3D-Modell). Durch die Orientierung der Störungszone (140/55), deren Streichrichtung tangential zur Tunnelachse steht, ergab sich für die Prognose im Tunnelprofil eine effektive Streckenlänge von 105 m.

Etwa dreissig Meter vor der Südgrenze der ITZ begannen sich die geomechanischen Felsverhältnisse in in beiden Röhren markant zu verschlechtern, sodass aufgrund des zunehmenden Durchtrennungsgrades und das Auftreten von Scherzonen die Ausbruchsicherung schrittweise von SPV 3 auf SPV 6A erhöht werden musste (Fig. 11-24). Um die nachbrechende Ortsbrust in der Oströhre zu stabilisieren, kamen ab km 233.559 Ortsbrustanker zum Einsatz. Zur Erinnerung: bei derselben Station ereignete sich am 14.07.2012 der erste Niederbruch im Nordvortrieb (Kap. 10.3.2, Fig. 11-24). Die in der ITZ nach Bedarf eingebauten Spiesse in der Kalotte stabilisierten zusätzlich das Gewölbe und begrenzten damit die Ausdehnung der geologischen Überprofile. Die Durchörterung der Hauptstörungszone 15 Bbis.1 erfolgte mit dem Einbau der Ausbruchsicherungstypen SPV 9–10, Spiessschirm und lokalen Ortsbrustankern.

Mit dem Eintritt in die ITZ machten sich in der ersten Spritzbetonlage bereits ab Beginn der Bogenstrecke zahlreiche Rissbildungen und Abplatzungen bemerkbar, welche für die Belegschaft ein Sicherheitsrisiko darstellten. Daraufhin wurden umgehend Änderungen in der Ausbruchsicherung Typ SPV 6A vorgenommen.

Mit einer radialen Vergrösserung des Ausbruchprofils von 5 cm hat sich der Typ SPV 6A für Gebirge ähnlich wie jenes in der Randzone der ITZ für Langzeitdeformationen bis zu 150 mm als geeignet erwiesen. Dieser Ausbruchsicherungstyp hatte zu Beginn der Initialverformung einen zu geringen Widerstand entgegengebracht, weshalb es im Störungszonenbereich häufig zu Rissbildung im Spritzbeton kam. Es bestand daher die Notwendigkeit, die Wirksamkeit hinsichtlich der anfänglichen Rissbildung zu verbessern.

Hierfür wurde auf einer Teststrecke die Eignung von zwei Varianten des angepassten Typs SPV 6A geprüft. Die Variante 1 testete in der Weströhre bei km 333.408–333.350 auf einer Länge von 58 m das Zulassen von kontrollierter Verformung unter Verwendung von Einschubschlössern und Verformungsschlitzen im Spritzbeton. Das Fehlen des Sohlgewölbes durch den späteren Einbau 25 m hinter der

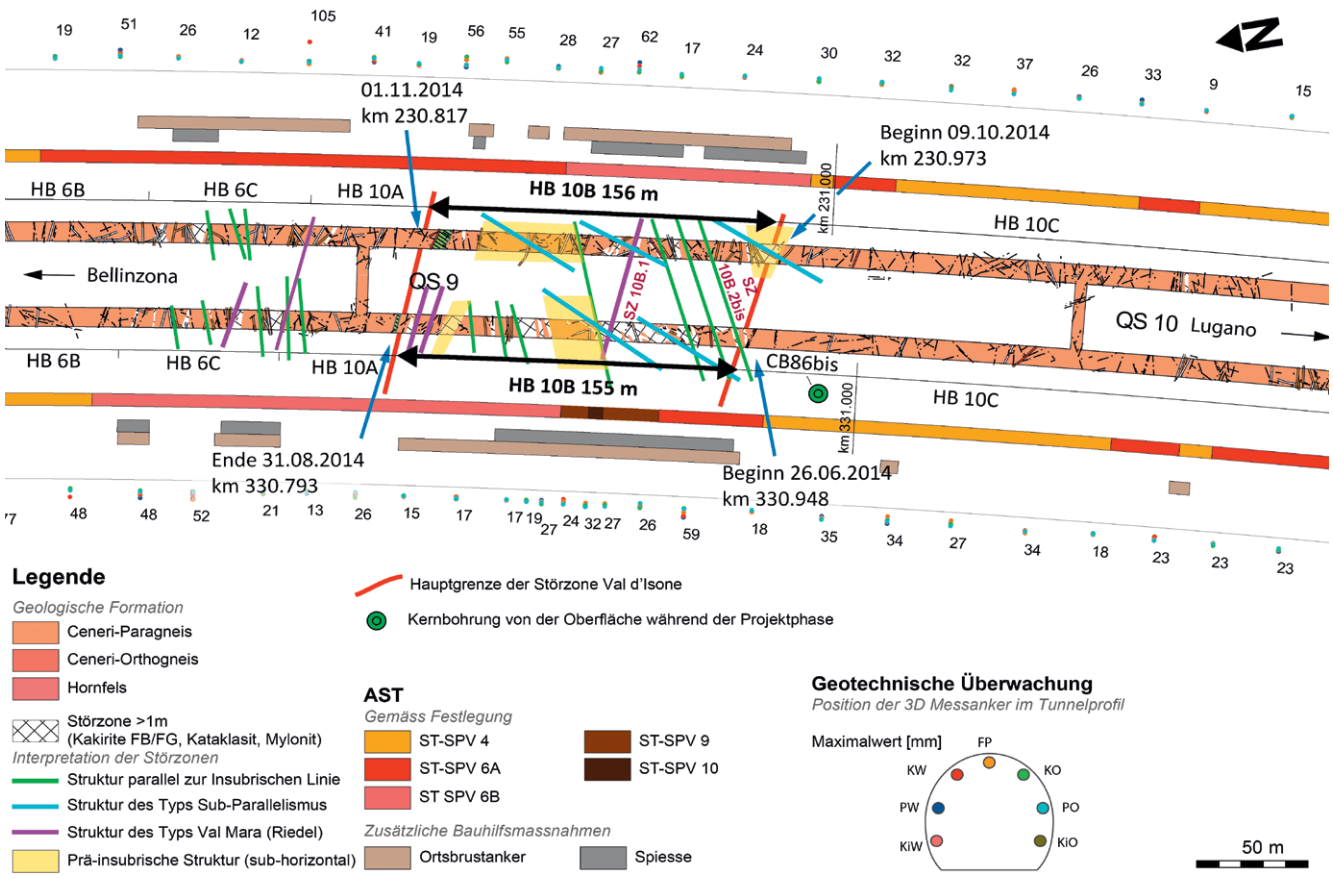


Fig. 11-22: Interpretiertes geologisch-tektonisches Modell mit den Störungszonen im Gebiet des Val d'Isone (HB 6C – 10B).

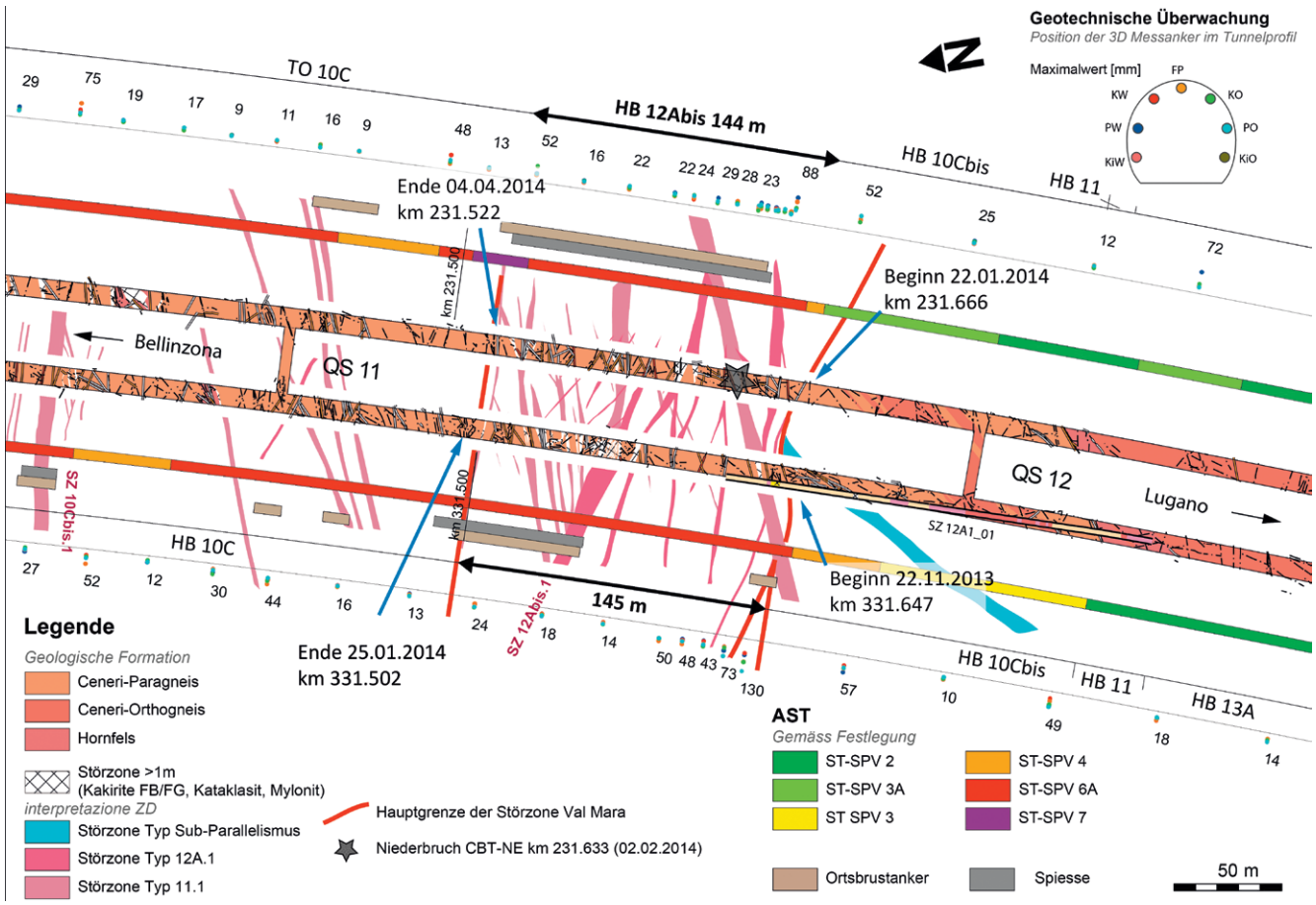


Fig. 11-23: Interpretiertes geologisch-tektonisches Modell mit den Störungszonen im Gebiet des Val Mara (HB 12Abis).

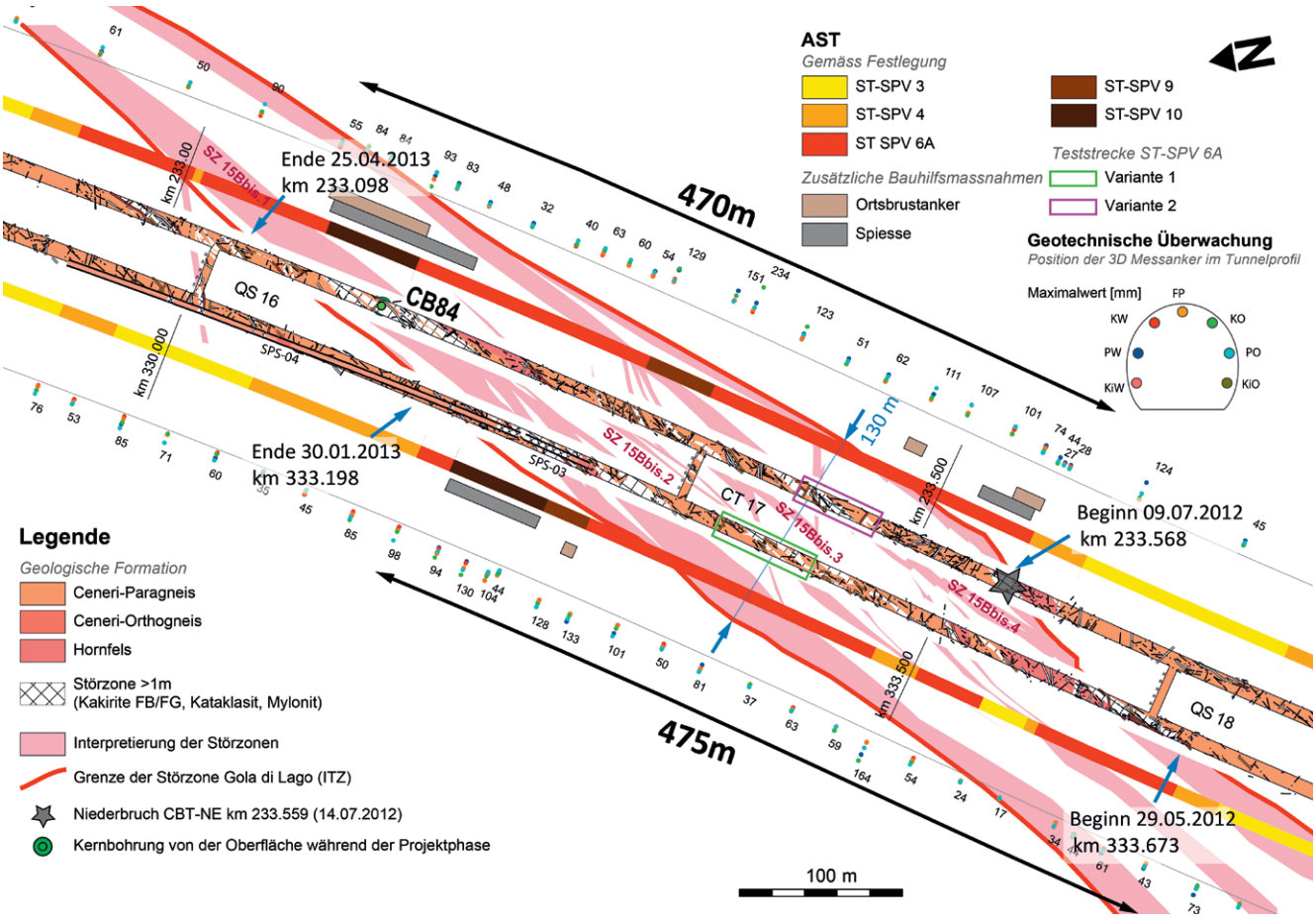


Fig. 11-24: Interpretiertes geologisch-tektonisches Modell mit den Störungszonen im Gebiet der mittleren Ceneri-Zone (HB 15Bbis).

Ortsbrust äusserte sich in Form von zunehmender Verformung in beiden Paramenten (Fig. 11-25 e). Das Gewölbe erlitt Deformationen in Form von Biegung, was durch die vertikal gerichteten Verschiebungsvektoren beobachtet werden konnte (Fig. 11-25 c). Die Trendlinien der Verformungsmessungen zeigten, dass die Stabilisierung der radialen Verformungen erst 27 m hinter der Ortsbrust begann. Insgesamt traten weniger häufig Risse auf, aber durch die anhaltende Verformung entstand eine Beanspruchung der Ausbruchsicherung, die weiterhin Abplatzungen in der Spritzbetonschale im Kämpferbereich oberhalb der Schlitze generierte (Fig. 11-25 a). Die Biegebeanspruchung kennzeichnete die Schwachstelle im Ausbruchsicherungssystem, die im Bereich der vorgesehenen Verformungszone auftrat.

Deshalb ersetzte in der Variante 2 stahlfaserverstärkter Spritzbeton das Bewehrungsnetz der ersten Lage in der Oströhre auf einer Länge von 55 m (km 233.421–233.476). Das Weglassen der Schlitze hatte zum Ziel, den Ausbauwiderstand an der Schwachstelle der Ausbruchsicherung zu erhöhen. Für diese Variante wurden keine Abplatzungen mehr verzeichnet. Es traten auch deutlich weniger Risse in der Aussenschale auf. Die Risse konzentrierten sich vorwiegend in der ersten Spritzbetonlage im östlichen Parament und Kämpferbereich (Fig. 11-25 b).

Die raschere Stabilisierung der Verformungen verdeutlichte, dass ein früher Bogenschluss in der Sohle sinnvoll war (Fig. 11-25 f), was sich hinsichtlich einer Biegung der Ausbruchsicherung positiv auswirkte (Fig. 11-25 d). Der Austausch des Bewehrungsnetztes hatte den weiteren grossen Vorteil, die Risse im rückwärtigen Bereich L3 zügig im Schatten der Vortriebsarbeiten sanieren zu können.

Beide Varianten hatten gezeigt, mit welchen zusätzlichen Massnahmen Rissbildung und Abplatzungen im Spritzbeton für den Typ SPV 6A reduziert werden konnten. Die Teststrecke hatte ergeben, dass sich Risse nicht vollständig vermeiden lassen, diese aber mit Hilfe der beschriebenen Massnahmen besser kontrolliert werden können, wodurch sich die Sicherheit für die Belegschaft verbesserte.

Die Erfahrung aus der Teststrecke fand Anwendung beim Einbau der Ausbruchsicherungstypen SPV 6A, SPV 9 und SPV 10 in der ITZ, die den radialen Verformungen bis zu 234 mm in der Oströhre und 130 mm in Weströhre entgegenwirkten. Mit diesen Massnahmen wurden auch gute Erfahrungen bei der Durchörterung der Störungszonen Val Mara und Val d'Isone erzielt.

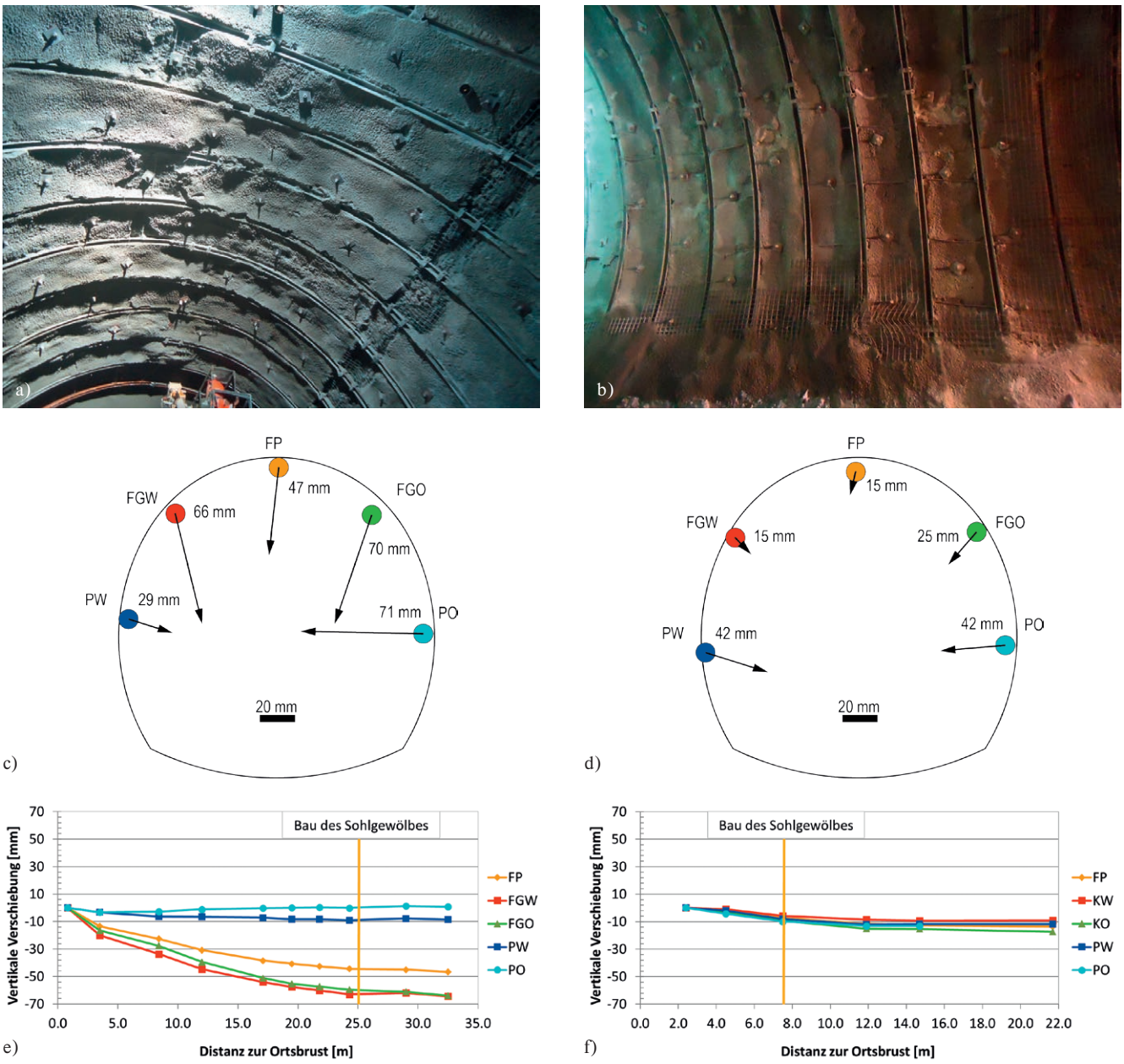


Fig. 11-25: Teststrecke mit Ergebnissen der Verformung für die Anpassung des Ausbruchsicherungstyps SPV 6A. Die Abbildungen a, c und e entsprechen der Teststrecke mit der Variante 1, die anderen der Variante 2. a) Typ SPV 6A mit Schlitzen im Spritzbeton und Netzbewehrung. Der Spritzbeton ist in der Kalotte an zahlreichen Stellen gerissen. b) Gleicher Ausbruchsicherungstyp aber ohne Schlitze. Zusätzlich wurde die Netzbewehrung durch stahlfaserverstärkten Spritzbeton ersetzt. c) Messstation Nord-Weströhre km 333.382, radiale Verschiebungen und e) vertikale Verschiebungen. d) Messstation Nord-Oströhre km 233.442, radiale Verschiebungen und f) vertikale Verschiebungen. FP = Firstpunkt, PO = Parament Ost, PW = Parament West, FGO = Firstgewölbe Ost, FGW = Firstgewölbe West.

11.4.4 Bauhilfsmassnahmen bei asymmetrischen Verformungen im «Subparallelismus»

Ein ganz anderes Erscheinungsbild zeigten die Verformungen im «Subparallelismus» im Streckenabschnitt mit Giumello-Gneis, insbesondere beim Nordvortrieb im Baulos Sigirino. In der Oströhre ab km 236.000 und der Weströhre ab km 336.053 sowie beim Bypass Nord km 235.940 und QS 25 traten asymmetrische Verformungen auf (s. Metzger & Anagnostou 2015).

Die mit der Schieferungsorientierung verbundenen Ablösungen verursachten entlang der Tunnelachse im östlichen Kämpferbereich Verformungen und systematisch Risse im Spritzbeton. Dies verlangte neben der Instandsetzung der Spritzbetonschale in den Arbeitsbereichen L1 und L2 zusätzliche Sanierungen und Verstärkungen nach mehreren Monaten weit hinter dem Vortriebsbereich. Um die asymmetrischen Verformungen zu kontrollieren, wurden in Funktion des Spannungsfeldes die Länge der Mörtelanker abgestimmt. Der Einbau von zusätzlichen Mörtel- oder IBO-Ankern mit einer Länge von 6 bis 8 m hat sich bewährt (Fig. 11-26).

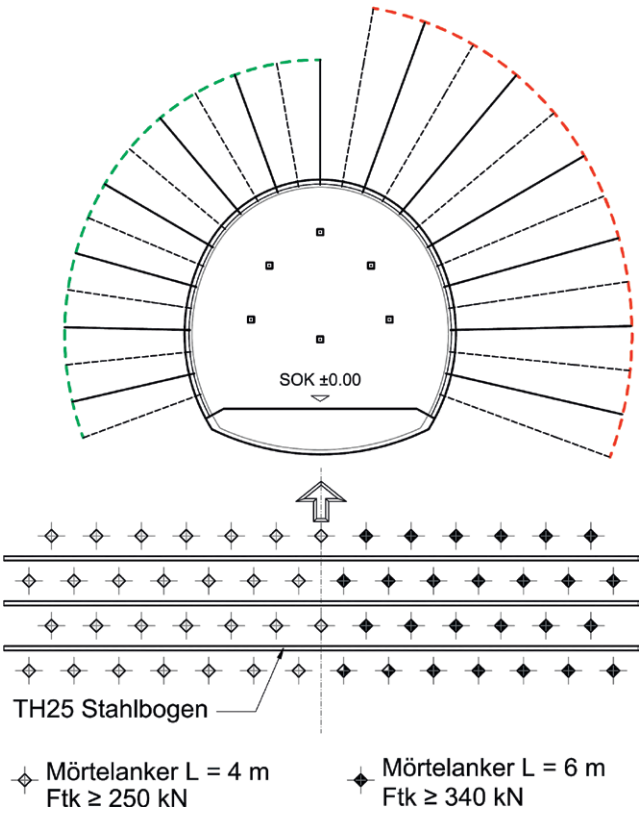


Fig. 11-26: Beispiel eines angepassten Ausbruchsicherungstyps SPV 6 bei km 235.881 (Festlegeblatt GbC-NE Nr. 19). Rote Linie = Aktionsradius mit 8 m langen Mörtelankern auf der Ostseite. Grüne Linie = kleinerer Aktionsradius mit 4 m langen Mörtelankern gemäss Festlegung.

11.4.5 Bauhilfsmassnahmen im Bereich der Logistikkavernen CAOP

Während dem Ausbruch der CAOP im Vorlos Sigirino bildeten sich häufig Längsrisse mit Öffnungen von mehr als 10 cm infolge des intensiv durchtrennten Gebirges und zahlreicher Scher- und Störungszonen sowie dessen asymmetrischen Verformungsszenarien. In den Kreuzungsbereichen zum Querschlag QS 26 und der Lüftungskaverne CTV1 entstanden in der Regel grössere Risse mit Öffnungen von mehreren Zentimetern. Daraufhin erfolgten an diesen Stellen (km 336.053–336.148 und km 336.198–336.221) z.T. mehrphasige Sanierung- und Verstärkungsarbeiten, welche im Jahr 2010 abgeschlossen wurden. Im rückwärtigen Bereich der CAOP (km 336.383–336.403), wo sich Ankerplatten durch die Verformung verbogen oder Risse und Abplatzungen im Spritzbeton entstanden waren, musste die Aussenschale verstärkt und instandgesetzt werden. Auf dem Streckenabschnitt wurden 12 m lange IBO-Anker mit stärkeren Ankerplatten verbaut. Die gerissene und instabile Spritzbetonschale wurde ersetzt und die Hohlräume zwischen Fels mit Spritzbeton injiziert.

11.4.6 Bauhilfsmassnahmen während der Durchörterung der Val-Colla-Linie

Im geologischen Befund wurde die Val-Colla-Linie in zwei Homogenbereiche (HB) unterteilt (Kap. 3). Der nördliche Homogenbereich 30A entspricht der Hauptstörungszone der Val-Colla-Linie und der südliche Homogenbereich 30B fasst alle intakten und wenig gestörten Gesteine zusammen. In beiden Homogenbereichen fanden Anpassungen der Ausbruchsicherung aufgrund des anisotropen geomechanischen Verhaltens des Gebirges statt, s. auch Malaguti et al. (2003).

Bauhilfsmassnahmen und Anpassungen der Ausbruchsicherung im Homogenbereich 30A

Der erste Streckenabschnitt nach der Wiederaufnahme des Südvortriebes ab Option Süd verlief ohne besondere Schwierigkeiten mit dem Einbau der Ausbruchsicherungstypen SPV 2–4, abhängig von der Beschaffenheit des Giumello-Gneises. Mit der Annäherung an die Val-Colla-Linie begannen sich in der Oströhre ab km 237.306 Anzeichen einer ersten Störungszone des Homogenbereichs 30A zu manifestieren (Fig. 11-27). Von der Ostseite her traten Scherzonen mit zahlreichen Schmierlassen in das Tunnelprofil hinein, die an entsprechender Stelle im Tunnelprofil steigende Verformungen (Fig. 11-28) und Kluftkörper mit Volumen bis zu 30 m^3 verursachten. Diese Ereignisse veranlassten den Einbau der ersten Stahlbögen TH 25 beim Vortrieb Baulos Sigirino mit hufeisenförmigem Profil unter Anwendung des Ausbruchsicherungstyps SPV 5 (Fig. 11-29).

Der Kniff beim Einbau dieses Ausbruchsicherungstyps war es, entlang des Paraments auf Höhe des Paramentfusses ein provisorisches Felspodest beizubehalten, das zur Abstützung des Stahlbogenfusses diente (Fig. 11-30) und welches zu einem späteren Zeitpunkt für den Stahlbogenschluss während des Abtragens des Sohlgewölbes entfernt wurde.

Erste Erfahrungen mit dem Typ SPV 5 hatten gezeigt, dass besonders das Profilieren des Podestes im Zusammenhang mit dem Einbau des Bogens aufwendige Arbeitsschritte darstelle. Beim Abtragen des Sohlgewölbes musste zudem der Bogenfuss sorgfältig untergraben werden. Es entstand beim Übergang zwischen Bogenfuss und Sohlgewölbe eine Schwachstelle, die horizontale Verformungen des Profils begünstigt, wodurch der Widerstand der Ausbruchsicherung temporär reduziert wurde. Diese Schwachstelle veranlasste, die Ausbruchsicherung des Typs SPV 6 zu überarbeiten. Auf diese Weise entstand der Typ SPV 6A mit modifizierten Stahlbogenfuss (s. Kap. 11.3.2.2).

Mit fortlaufendem Vortrieb zeigten die radialen Verformungsmessungen der Störungszone im Homogenbereich 30A eine sich stetig ändernde asymmetrische Verformung im Tunnelprofil (Fig. 1-54 und Fig. 1-55). Eine dementsprechend mehrfache Anpassung der Systemankerung an die sich ändernden Gebirgsverhältnisse reichte nicht mehr aus, um das zugelassene maximale Verformungsmass einzuhalten. Auf dem Streckenabschnitt mit den Ausbruchsicherungstypen SPV 5–7 zwischen km 237.292 und 237.435 verursachten horizontale Versätze Risse und Abplatzungen im Spritzbeton des östlichen Paraments. Um der Verformung entgegenzuwirken, kamen bei einer scheinbaren Mächtigkeit grösser als der Tunneldurchmesser (Oströhre km 237.435 – 237.522) die Ausbruchsicherungstypen SPV 9–10 zum Einsatz.

Die Sicherung des aufgelockerten Felses in der Hauptstörungszone des Homogenbereichs 30A erforderten als zu-

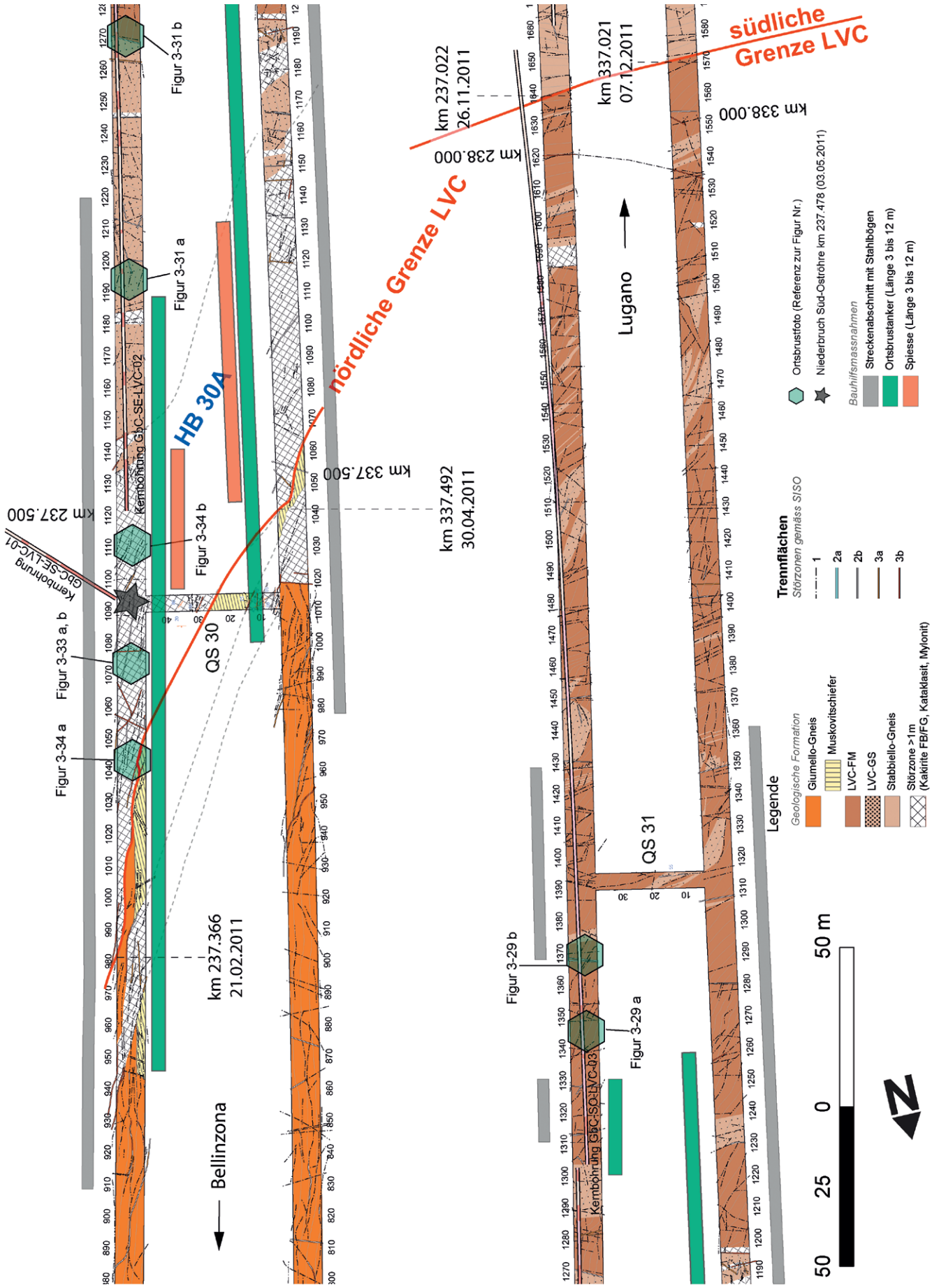


Fig. 11-27: Horizontalplan mit der eingebauten Ausbruchsicherung beim Vortrieb in der Val-Colla-Linie.

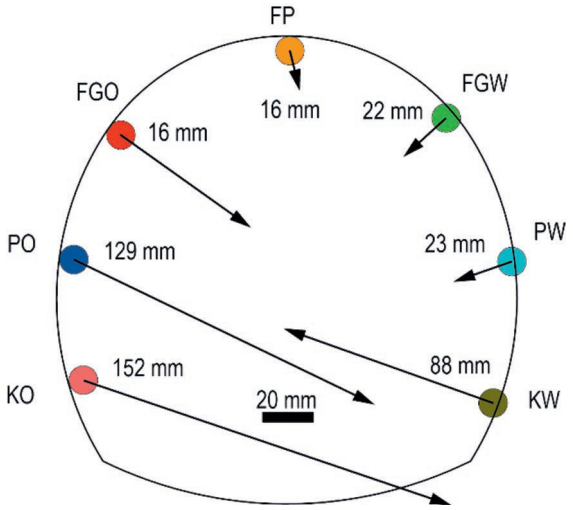


Fig. 11-28: Die radiale Verformungsmessung bei Station GbC-SO km 237.222 zeigt vorwiegend horizontale Verschiebungen im östlichen Parament und Paramentfuss. Legende: FP = Firstpunkt, FG = Firstgewölbe, P = Parament, K = Paramentfuss, O = Ost, W = West.

Fig. 11-29: Einbau der Stahlbögen TH 25 im Ausbruchsicherungstyp SPV 5 in der Oströhre km 237.211 inklusive im rückwärtigen Bereich mit geologischem Überprofil verursacht durch Kluftkörper bis 30 m³ (Foto IG ITC).

Fig. 11-30: Einbau der Stahlbögen TH 25 mit Befestigung durch Lochplatte und Reibungsanker (ST-SPV 6A) (Foto IG ITC).

sätzliche Bauhilfsmassnahmen des Ausbruchsicherungstyps SPV 10 8–12 m lange IBO-Anker an der Ortsbrust und 4–6 m lange IBO-Anker im Spiessschirm. Man beachte, dass die Länge der Spiesse durch die Bohrgeometrie von 15–20° und dem Stahlbogenabstand gegeben war (Fig. 11-31).

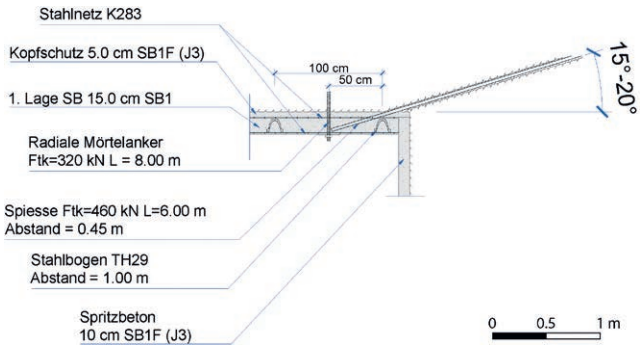


Fig. 11-31: Die Abbildung zeigt detailliert im Längenschnitt die eingebauten Sicherungsmittel des Spiessschirms im Ausbruchsicherungstyp SPV 10 in der Oströhre bei km 237.488.

Im Umfeld der Bauhilfsmassnahme des Typs SPV 10 in der Weströhre zwischen km 337.544 und 337.591 verstärkten stabilere TH 36 Bögen anstelle von TH 29 die Aussenschale. Darüber hinaus wurden im Spritzbeton auf Höhe der Einschubschlösser Verformungsschlitze offengelassen, die theoretisch gemäss Nachgiebigkeitsprinzip im Vortriebsbereich L2 zugespritzt werden sollten. Aus den Verformungsmessungen auf Fels (Fig. 11-33) und Stahlbögen (Fig. 11-32) resultierte eine überwiegend vertikale Verformung, die u.a. durch Auflockerung in der Störungszone verursacht wurde und welche wiederum zu einer Biegung der Ausbruchsicherung führte. Unmittelbar nach zwei Ausbruchsetappen von 1,5–3,0 m liessen sich aus den Ergebnissen der Messstation GbC-SO km 337.523 auf dem Stahlbogen im Firstpunkt vertikale Verschiebungen bis zu 103 mm innerhalb von 12 h messen.

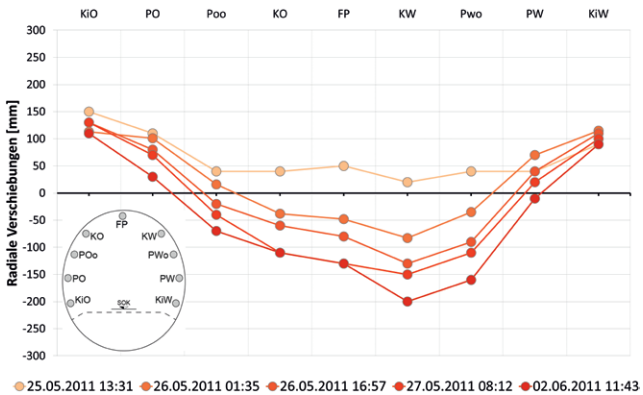


Fig. 11-32: Verformungsmessungen auf einem Stahlbogen in der Weströhre bei km 337.523. Die Messreflektoren wurden direkt auf den Stahlbogen befestigt. FP = Firstpunkt, Ki = Paramentfuss, P = Parament, O = Ost, W = West, o = oben.

Es wurde bemerkt, dass das Gebirge seit Eintritt in die Störungszone auf Verformungen mit einem starken Kohäsionsverlust reagierte. Die vertikale Verschiebungsgeschwindigkeit war aufgrund der Auflockerung im Firstgewölbe grösser als die radial gerichtete Verformungsgeschwindig-

keit der plastischen Verformung. Die vertikale Verschiebung verursachte ein sofortiges Biegen der Stahlbögen im Gewölbe durch Setzungen in Übereinstimmung mit den Verformungsschlitzen im Kämpferbereich. Um den Setzungen entgegenzuwirken, wurde der Widerstand der Ausbruchsicherung durch Starrsetzen der Einschubschlösser vorgezogen. Zusätzliche Anker im Kämpferbereich verstärkten die Ausbruchsicherung im Bereich der oberen Verformungsschlitze.

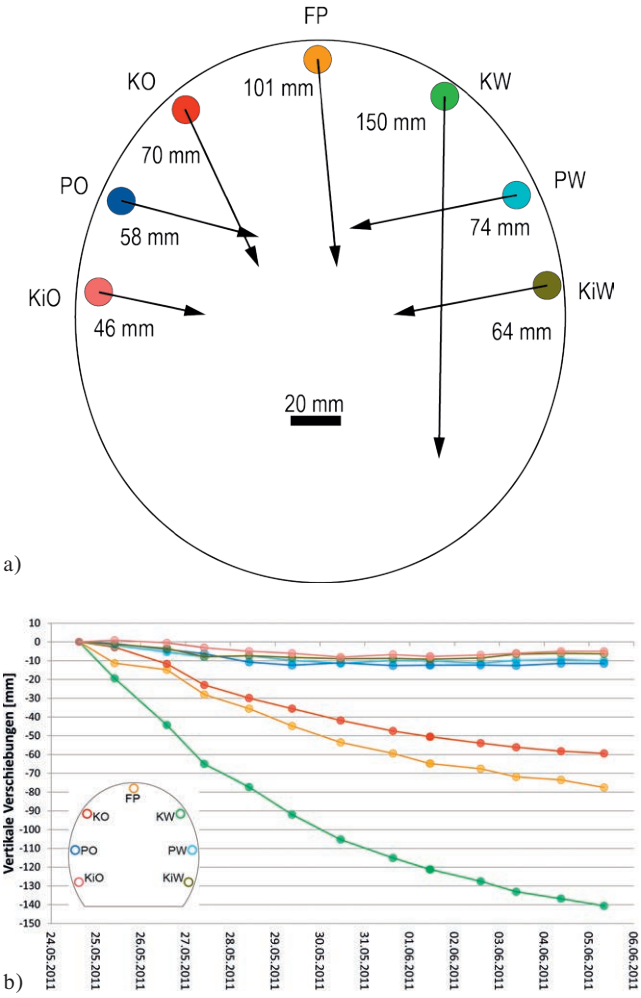


Fig. 11-33: a) Verformungsmessungen in der Weströhre bei km 337.521. b) Weg-Zeit-Diagramm Setzungen.

Diese Bauhilfsmassnahme war ausreichend, um radiale Verformungen auf 200 mm zu begrenzen (Fig. 9-16 und Fig. 9-17). Die unteren Verformungsschlitze am Bogenfuss auf beiden Seiten waren nicht mehr notwendig, weil man festgestellt hatte, dass sie nicht beansprucht wurden. Man entschied infolgedessen, das Sohlgewölbe mit Bogenschluss bei 7 m anzustreben. Der Entscheid, einen Abstand zwischen Ortsbrust und Sohlgewölbe einzuhalten war ein Kompromiss zwischen dem geomechanischen Verhalten des Gebirges und der Notwendigkeit im Hinblick auf die Ortsbrustinstabilität, der Belegschaft einen Sicherheitsabstand während des Baus des Sohlgewölbes zu gewährleisten.

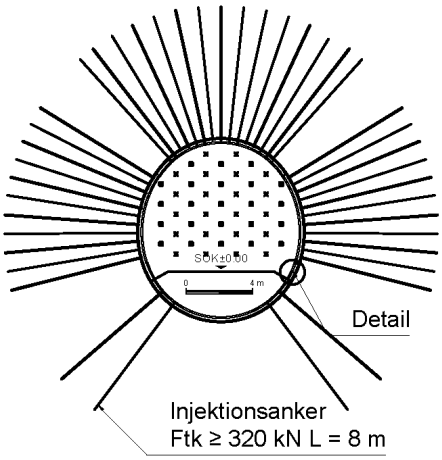
Bauhilfsmassnahmen und Anpassungen der Ausbruchsicherung im Homogenbereich 30B

Im südlichen Abschnitt der Val-Colla-Linie, welcher dem Homogenbereich 30B entspricht (Oströhre km 237.530–238.022 und Weströhre km 337.612–338.021) verbesserte sich die Beschaffenheit des Gebirges kontinuierlich mit fortlaufendem Vortrieb. Insgesamt waren auf dieser Strecke die angetroffenen geomechanischen Felsverhältnisse günstiger als erwartet. Dies erlaubte den Einsatz des Ausbruchsicherungstyps SPV 4 an Stelle von SPV 10 auf (Fig. 11-35 a) ab km 237.811 in der Oströhre und km 337.856 in der Weströhre (Fig. 9-16 und Fig. 9-17). Das Konzept für die Durchörterung der Val-Colla-Linie sah diesbezüglich keine Ausbruchsicherungstypen mit flacher Sohle ohne Stahlbögen vor. Die Ortsbrust war geprägt durch in Vortriebsrichtung ausfallende Schieferung, welche oft abgleitende Felsplatten und insbesondere im westlichen Kämpferbereich des Tunnelprofils Kleinsteinfall, Kluftkörper und lokal Ablösungen verursachte (Fig. 11-35 b).

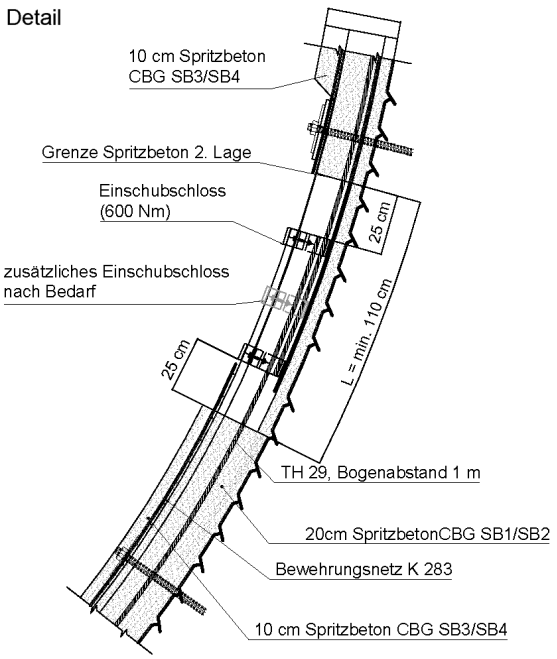
11.4.7 Bauhilfsmassnahmen im Verzweigungsbauwerk Sarè

Mit dem Auftreten von ungünstigen geologischen und geotechnischen Felsverhältnissen in der südlichen Umgebung der Kaverne Sarè West (Fig. 11-37 a, b) wurde versucht, das geologische Überprofil mit kürzeren Abschlägen, reduzierten Sprengladungen, ungeladenen Kranzbohrlöchern, zusätzlichen Felsankern und den lokalen Einbau von Gitterbögen (Fig. 11-37 d) zu verkleinern. Dieses Vorhaben scheiterte aufgrund der zunehmenden Grösse der Ausbruchsfläche der Kalotte und des intensiv durchtrennten Gebirge. Trotz der Gebirgsüberlagerung von weniger als 130 m bewirkte die Durchtrennung in Scherzonen und Streckenabschnitten mit flach einfallender Schieferung im Stabbiello-Gneis unerwartete Verformungen im letzten Teil des Vollausbruchs bis zu 81 mm und über 150 mm im Teilausbruch (Kaverne Sarè West, Fig. 9-16 bis 9-19 und Fig. 11-36).

Mit der Unterteilung der Kalotte in zwei oder drei Ausbruchetappen (Fig. 11-39) gelang es schliesslich, sowohl die Verformungen als auch die geologischen Überprofile wesentlich zu reduzieren. Die weitere Unterteilung der Kalotte hing von den lokalen geologischen Bedingungen ab. So fand z.B. der Ausbruch des Abschnitts VSO 3 in der Kaverne Sarè Ost zu Beginn in zweiteiligem und der anschliessende Endabschnitt in dreiteiligem Ausbruch statt. Der gesamte Abschnitt VSW 3 der Kaverne Sarè West erfolgte in dreiteiligem Ausbruch mit vorauseilendem zentralem Kalottenstollen (Fig. 11-38). Dieses Konzept war vertraglich nicht vorgesehen und erforderte mittels geologisch-geotechnischer Rückanalyse sowie zusätzlicher geotechnischer Überwachung und zwei Kernbohrungen (Abschnitt 7.2.2) eine Überarbeitung der Prognose. Die Prognose für die Streckenabschnitte mit Einbau von Gitterbögen basierte auf der Interpretation der beiden Kernbohrungen GbC-Sarè-SE-01 und GbC-Sarè-SO-01 (Kap. 9.2.3, Fig. 9-11 und Fig. 9-12). Diese Abschnitte wurden als intensiv durchtrennter Fels mit vorhandenen Scher- oder Störungszonen mit subhorizontalem Einfallen beschrieben.

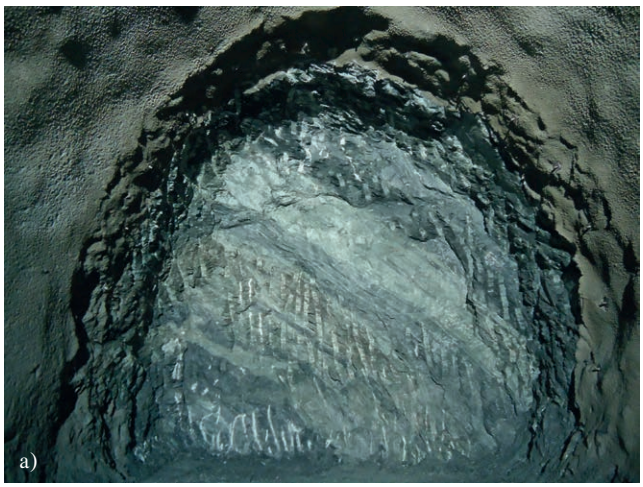


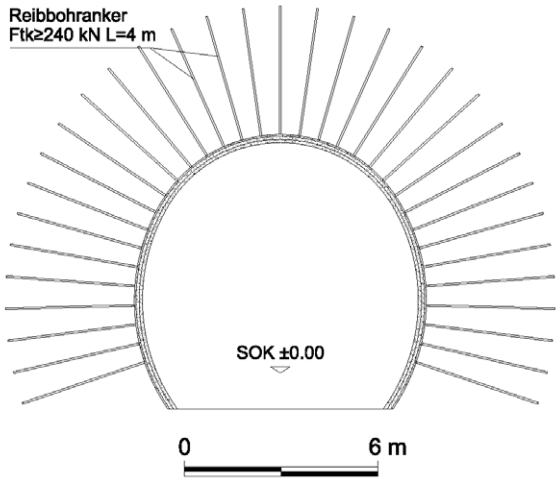
b) Sicherung der Ortsbrust:
Stahlfaserverstärkter Spritzbeton 10 cm, SB1F J3,
Injektionsanker Ftk ≥ 320 kN L = 12 m



c)

Fig. 11-34: a) Kataklastisch-kakiritische Störungszone in der Oströhre bei der Station km 237.472 (Foto IG ITC). b) Auszug des Festlegeblattes des eingebauten Ausbruchsicherungstyps SPV 10 und c) detailliertem Schnitt zur Veranschaulichung eines Stahlbogens TH 29 mit Einschubschloss.





b)

Fig. 11-35: a) Die Ortsbrust in der Oströhre bei km 237.839 zeigt die typischen Ereignisse des Homogenbereichs 30B mit Kluftkörpern und Ablösungen in Kalotte und westlichem Kämpferbereich sowie ableitende Felsplatten in der Ortsbrust wegen bergauswärts fallender Schieferung (Foto IG ITC). b) Auszug des Festlegeblattes mit SPV-4 bis in der Oströhre bei km 237.811.

Diese Ausbruchsart mit Kalottenstollen hatte gegenüber einem zweiseitigen Ulmenstollenvortrieb den grossen Vorteil, auf eine eingespielte Vortriebsmethode zurückzugreifen, die im Vollausbruch des Stabbiello-Gneises im rückwärtigen Bereich gut funktionierte. Zudem bestand die Möglichkeit, vorhandene Ausbruchsicherungsmittel und Geräte der Baustelle zu verwenden, was im Endeffekt in der Projektänderung die zusätzlich benötigte Zeit und auch die Kosten optimierte.

Für alle drei Abschnitte des Verzweigungsbauwerks Sarè standen je nach der Beschaffenheit des Gebirges zwei Ausbruchsicherungstypen zur Verfügung (Kap. 11.2.2.4 und Fig. 11-7). Es bestand die Möglichkeit für den zusätzlichen Ausbruch eines Sohlgewölbes, welches aber nicht erforderlich war. Im Ausführungsprojekt kamen Gitterbögen zum Einsatz, welche ursprünglich nicht vorgesehen waren. Die zwei Kernbohrungen im Verzweigungsbauwerk Sarè hatten zum Ziel, die geologischen, geotechnischen und hydrogeologischen Gesteinseigenschaften in der prognostizierten Störungszone 38C.1 und im Bereich der Stirnwand beider Kavernen zu erkunden. Die Ergebnisse der Kernbohrun-

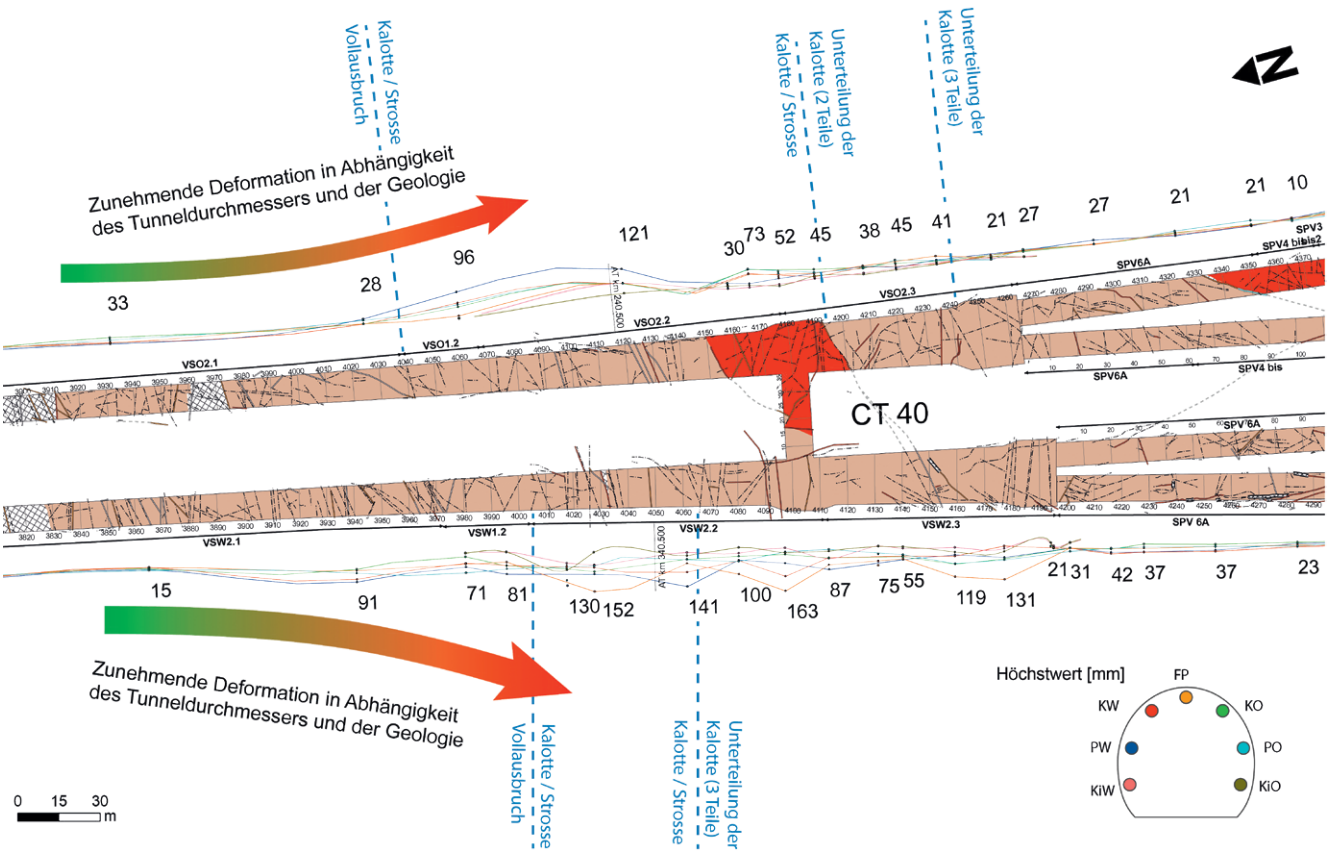


Fig. 11-36: Die Ergebnisse der Verformungsmessungen stellen die Verformungszone im Bereich des Verzweigungsbauwerk Sarè dar.

Fig. 11-37: a) Teilsprengung im unteren Teil der Kalotte in der Kaverne Sarè West km 340.514 und b) km 340.519. Das restliche Gestein wird mit dem Abbauhammer während der Felsreinigung entfernt. c) Einbau der Ausbruchsicherung in der Kaverne Sarè West bei km 340.476 nach erfolgtem Abtrag der Strosse. d) Montage der Gitterbögen an der Ortsbrust der Kaverne Sarè West km 340.520 zur Abstützung des Profils nach ausserordentlicher Kluftkörperbildung in einer Störungszone (Fotos IG ITC).

gen ermöglichten eine Anpassung der bestehenden Prognose, indem in Bereichen mit ungünstigen Felsverhältnissen (Kap. 7.2.2) für die Durchörterung Gitterbögen verwendet wurden. Zusätzlich hatte die Festlegung der Gitterbögen-Strecken eine grosse planungstechnische Relevanz, weil diese wegen zunehmendem Kavernendurchmesser und sich dadurch fortlaufend ändernder Geometrie im Voraus individuell angefertigt werden mussten. Beim Vortrieb der Kaverne West entstanden neben den bautechnischen Schwierigkeiten als Folge von Sanierungsmassnahmen an der Aussenschale im rückwärtigen Bereich am Ende des Abschnittes VSW 1 (km 340.422) baulogistische Schwierigkeiten (Kap. 10.3.10, 10.3.11 und Fig. 10-31). Danach erfolgte der Entscheid, den weiteren Vortrieb ab km 340.520 in zwei oder drei Phasen durchzuführen. Die häufigen auftretenden Ablösungen und Kluftkörper in der First mit Volumen von bis zu 17 m³ und die wiederholten Sanierungsmassnahmen der Aussenschale bei km 340.356–340.461 im Kämpferbereich waren Anlass, mit dem Vortrieb im Kalottenstollen und versetzter Kalottenaufweitung zu beginnen (Fig. 11-38, 11-39).

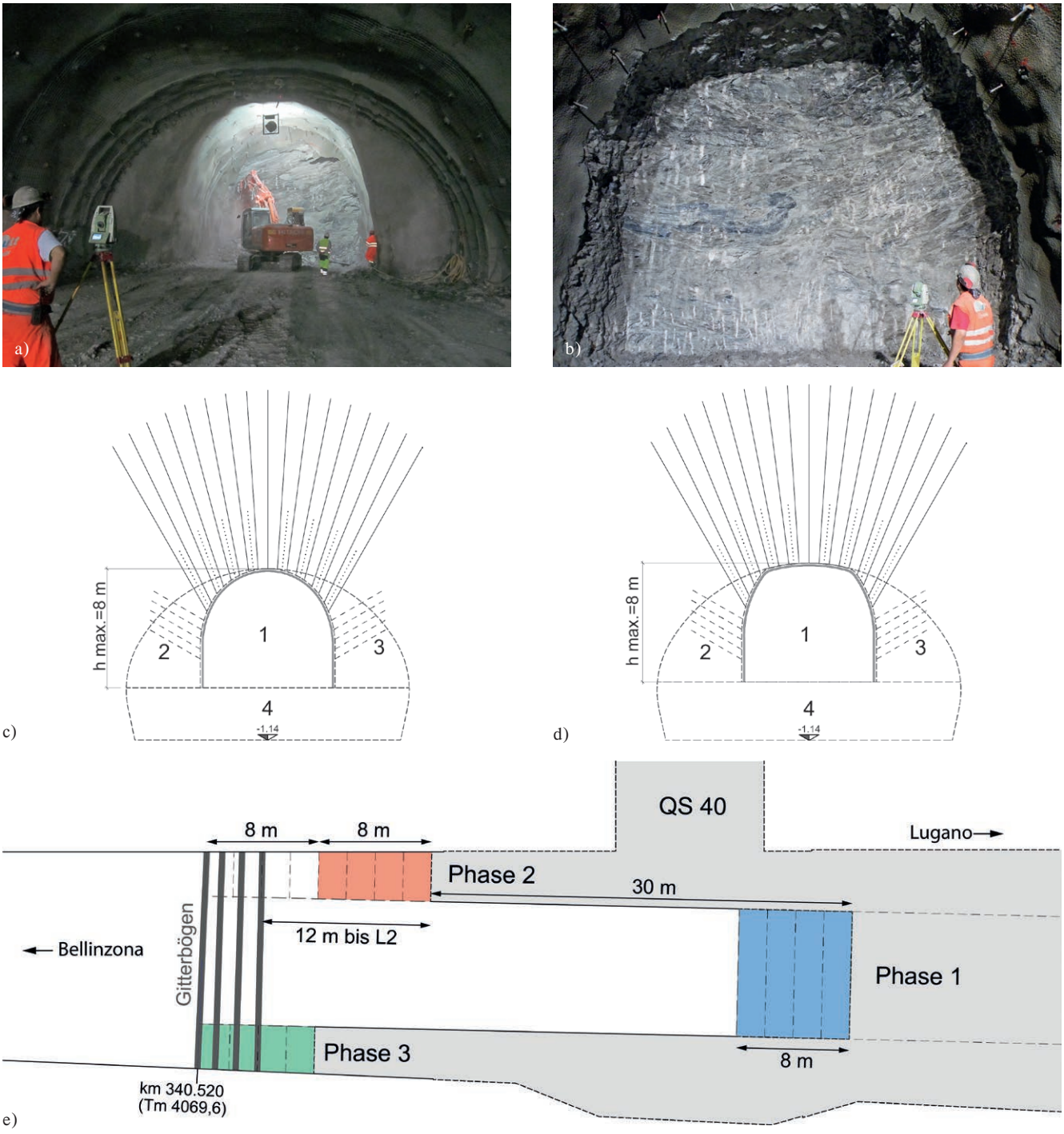


Fig. 11-38: Vortriebsphasen in der Kaverne Sarè West mit Kalottenstollen ab km 340.520. a) Ausbruch des Kalottenstollens. c) Schematische Darstellung der Vortriebsphasen. b) und d) weitere Anpassung der Geometrie zur Optimierung der Systemankerung im Firstbereich des Kalottenstollens bei km 340.578. e) Der Horizontalplan illustriert schematisch die drei Vortriebsphasen der Kalotte (Fotos IG ITC).

Die Sanierungsarbeiten in der Kalotte waren nur soweit möglich, wie es die Zugänglichkeit erlaubte (s. Sanierungsmassnahmen, Kap. 10.3.10). Die Zugänglichkeit zu den Sanierungsstellen war aufgrund der dort montierten Vortriebs-Hängebühne nur eingeschränkt möglich, sodass jeweils in Etappen saniert werden musste. Zum Teil musste zwischenzeitlich die Hängebühne mit Brettern abgedeckt werden, um die darunterliegenden Bereiche vor eventuell abstürzenden Spritzbetonteilen zu schützen.

Die Sanierung erfolgte vor allem durch nachträgliche 12 m lange Anker. Der Bereich war vorher mit 4–6 m langen Ankern gesichert. Weiter wurden die Risse mit Spritzbeton und Bewehrungsnetzen gesichert.

Die an sich schon ungünstigen geomechanischen Eigenschaften der Gesteine, die in Form von Ereignissen wie Kleinsteinfall, Kluftkörper, Auflockerung und Ablösungen auftraten, verschlechterten sich zunehmend bei Vorkommen von flach orientierten Störungen und Scherzonen.

Besonders Ablösungen zusammen mit Auflockerung führten zu bautechnisch relevanten Verformungen mit Rissbildung in der Aussenschale. Ein weiteres Fortführen des Vortriebs im Vollausbruch der Kalotte bedeutete ab diesem Zeitpunkt ein zunehmendes Sicherheitsrisiko für die Belegschaft sowie wiederholte Instandsetzung der Ausbruchsicherung der Aussenschale. Der Ausbau mit Gitterbögen bewirkte einen relativ kleinen Ausbauwiderstand, und es verblieb daher wenig Spielraum, um Verformungen zu reduzieren. Gitterbögen dienten a priori zur Reduzierung geologischer Überprofile durch Kluftkörper und Ablösungen. Zusätzlich wäre nach jedem zweiten Abschlag das Einboh-

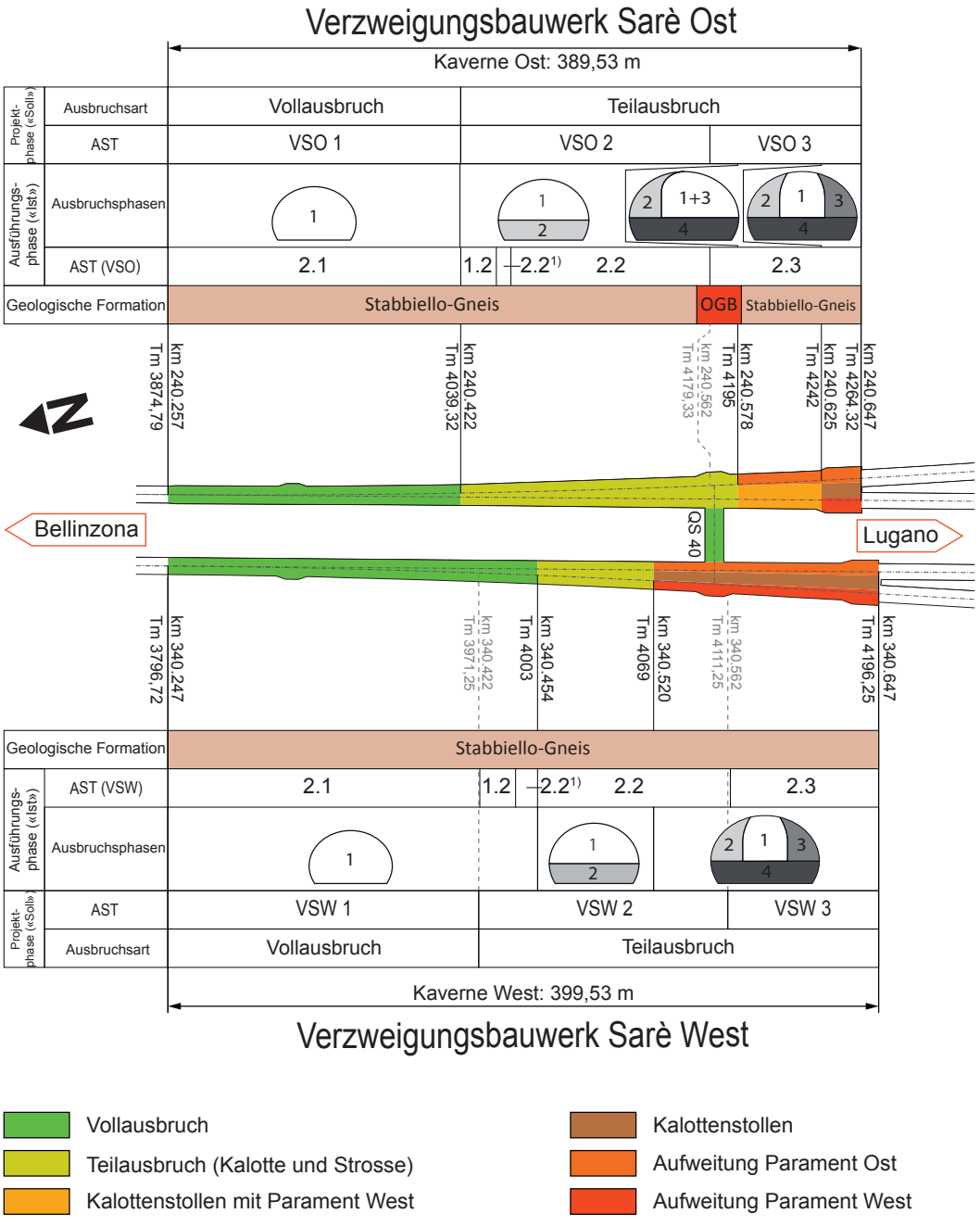


Fig. 11-39: Vergleich der Vortriebsabschnitte im Verzweigungsbauwerk Sarè zwischen Projekt und Ausführung. ¹⁾ Reklassifizierter Ausbruchsicherungstyp.

ren von Spiessen nötig gewesen. Wegen des Gitterbogenabstands und der Höhe des Kavernenprofils war die ausführbare Länge der Spiesse reduziert, was zu einer signifikanten Verringerung der Vortriebsleistung führte, ohne jedoch das Risiko von Niederbrüchen entsprechend zu reduzieren.

Rückblickend ermöglichte eine, aufgrund der vorher aufgezählten Verhältnisse, angeordnete Unterteilung der Kalotte einen kontinuierlichen Vortrieb und ein höheres Mass an Sicherheit in den Kavernen des Verzweigungsbauwerks Sarè.

Die ursprüngliche Geometrie des Kalottenstollenprofils und deren spätere Anpassung sind in Figur 11-38 dargestellt. Der Vortrieb des Kalottenstollens eilte 30 m voraus, bevor die Aufweitung der Kalotte in Phase 2 und 3 (Fig. 11-38 e) etappenweise mit Abschnitten von 8 m ausgeführt wurden. In Abhängig von der Felsqualität wurde die Aufweitung mit einem Hydraulikhammer oder mit Sprengungen realisiert. Die Vortriebsphasen richteten sich in deren Länge oder Reihenfolge nach dem geologischen Befund. Der Kopfschutz im Kalottenstollen bestand aus 8 cm stahlfaserverstärkten Spritzbeton und 4 m langen Reibrohrankern (s. gestrichelte Linie in Fig. 11-38 c), Injektionsanker von 12 m Länge, definitiv eingebaut im Firstbereich (durchgezogene Linie) und 4 m lange provisorische Reibrohranker zur Verstärkung der Kalottenparamente, welche während der Aufweitung der Kalotte abgeschnitten wurden. Der weitere Einbau der Systemankerung folgte etappenweise mit den Phasen 2 und 3 und dem Abtragen der Strosse. Figur 11-40 illustriert die endgültige Systemankerung am Ende der Vortriebsphasen.

Vor Beginn des Kalottenstollenvortriebs in der Kaverne Sarè West bei km 340.520 verstärkte man das bereits ausgebrochene Kavernenprofil im ausgebrochenen Anschlussbereich mit vier Gitterbögen (Fig. 11-38 b, e).

Nach den ersten Erfahrungen beim Kalottenstollenvortrieb führte man eine geometrische Anpassung des Kalottenstollenprofils durch (Phase 1), um den Einbau der Anker im Profil zu optimieren. Dabei erhielt das Stollenprofil im Firstbereich bereits einen Teil des definitiven Profils und die Systemankerung der Kavernenkalotte (Fig. 11-38 c, d). Auf diese Weise konnten sechs endgültige Anker eingebaut werden, die dann während der Aufweitungsphase (Phase 2 und 3) nicht nachträglich neu gesetzt werden mussten.

In einigen weiteren Abschnitten musste das Kavernenprofil in Übereinstimmung mit den durchgeführten Kernbohrungen (Kap. 9.2.3) GbC-Sarè-SE-01 und GbC-Sarè-SO-01 (Fig. 9-11 und Fig. 9-12) zusätzlich mit Gitterbögen verstärkt werden.

Auf dem letzten Abschnitt erreichte die Kaverne eine Breite von 25,3 m und eine Höhe von 14,3 m (Fig. 11-40). Im gesamten letzten Abschnitt wurden Gitterbögen bis zur Stirnwand eingebaut (Fig. 11-41 a).

Nach dem Abtragen der Strosse erfolgte im Vortriebsbereich L2 die Vervollständigung der Ausbruchsicherung. Weil im Sohlbereich keine Verformungen festgestellt wurden, (Kap. 9.5.3) konnte in beiden Kavernen VSW/VSO PTS 2 auf ein Sohlgewölbe verzichtet werden.

Die in den Kapiteln 10.3.10 und 10.3.11 beschriebenen Ereignisse und die in den Kavernen Ost und West unterschied-

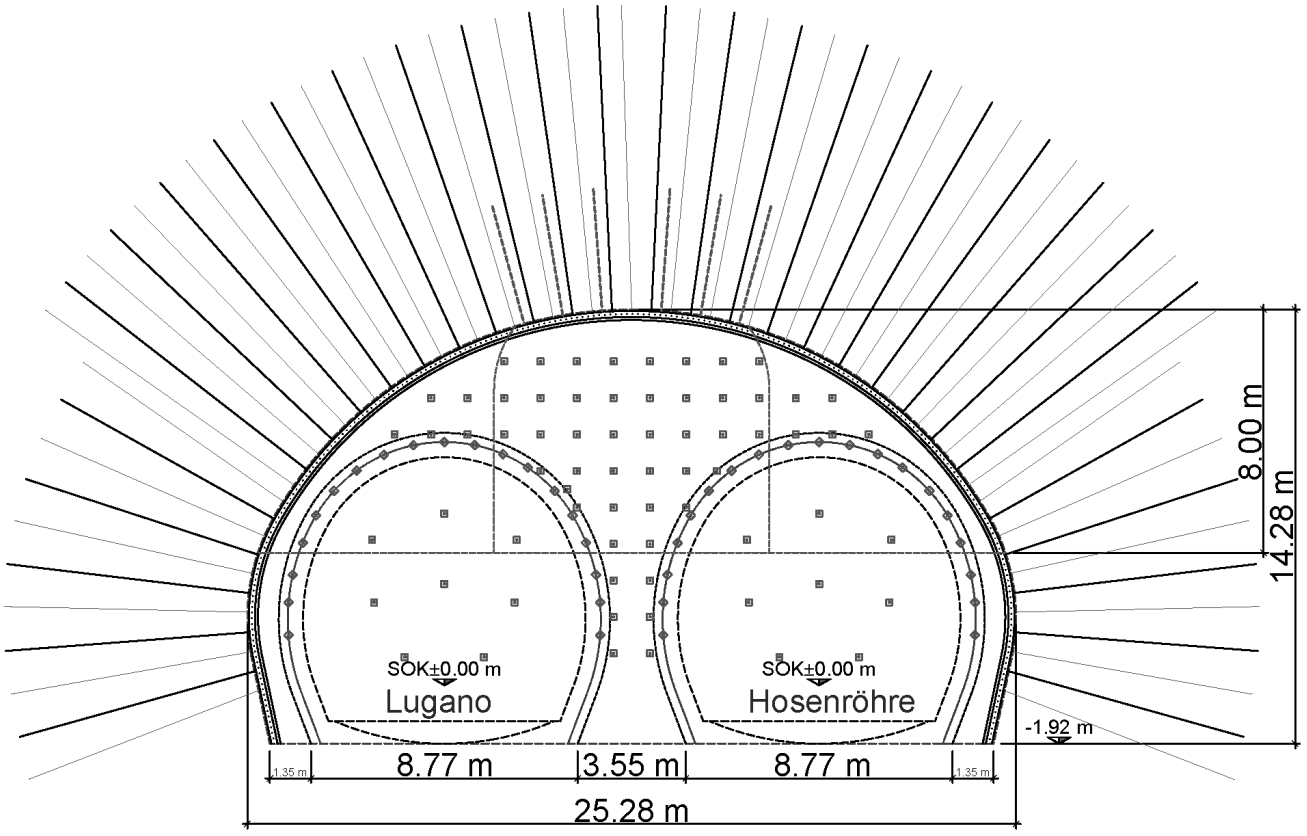


Fig. 11-40: Ausbruchsicherung an der Stirnwand Kaverne Ost im Verzweigungsbauwerk Sarè. Die Stirnwand wurde mit 6 m langen Mörtelankern gesichert, während im Firstbereich 10 m lange Mörtelanker und in beiden Paramenten 8 m lange Anker gesetzt wurden. Die grauen gestrichelten Linien symbolisieren die Unterteilung der Ortsbrust mit der Position des Kalottenstollens.

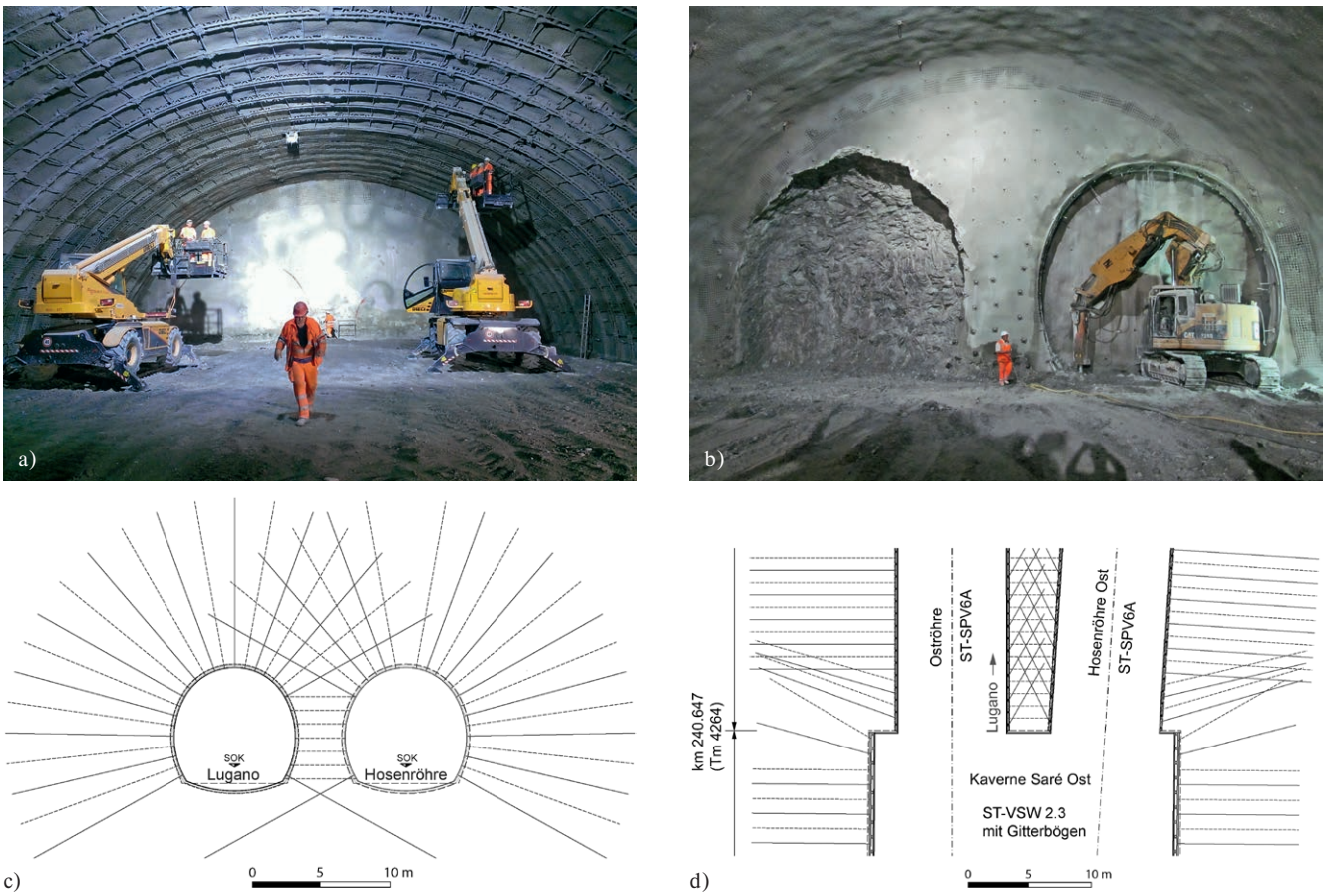


Fig. 11-41: a) Letzter Abschnitt (VSO 3) der Kalotte in der Kaverne Sarè Ost gesichert mit Gitterbögen bis zur Stirnwand. b) Stirnwand mit dem ersten Vortrieb des Einspurtunnel nach Lugano (links) und des Tunnelstumpens (rechts) bei Station km 240.650 gesichert durch Stahlbögen TH 29. c) Querprofil durch den Einspurtunnel und Tunnelstumpen. Der minimale Abstand des Pfeilers beträgt 3,1 m d) der Horizontalschnitt visualisiert die Systemankerung des Pfeilers südlich der Stirnwand (Fotos IG ITC).

lichen Lithologien, hatten auch eine unterschiedliche Auswirkung auf die bautechnische Relevanz. Während die Kalotte in der Kaverne Sarè Ost wegen der günstigeren Felsverhältnisse im Bernardo-Orthogneis im Bereich des Querschlags QS 40 hauptsächlich im Vollausbruch oder mit zwei Vortriebsphasen stattfand, verlief der Kalottenvortrieb in der Kaverne Sarè West mehrheitlich in drei Phasen.

Der Unterschied bestand darin, dass der Bernardo-Orthogneis bessere geomechanische Eigenschaften aufwies als der Stabbiello-Gneis, jedoch wegen seiner beschränkten Ausdehnung nicht gleichmässig in beiden Kavernen auftrat. Durch den tektonisierten Übergang am grösseren Bernardo-Orthogneiskörper zum Stabbiello-Gneis verliefen die Trennflächen tangential zur Tunnelachse und induzierten somit ein asymmetrisches Verformungsverhalten, welches hauptsächlich in der Kaverne Sarè West und im anschliessenden Hosentunnels sowie im darauf folgenden Einspurtunnel West eine höhere bautechnische Relevanz verursachte (Fig. 11-36).

11.4.8 Ausbruchsicherung an der Stirnwand im Verzweigungsbauwerk Sarè

Für die Ausbruchsicherung der Stirnwand wurden Gitterbögen, 12 m lange radiale IBO-Anker, ein Spiessschirm über den beiden nach Süden weiterverlaufenden Tunnelröhren, Injektionsanker von 6,0 m Länge und 5,0 m lange Ortsbrustanker eingebaut (Fig. 11-40). Die Dicke der Aussenschale beträgt insgesamt 64 cm und ist aus mehreren stahlfaserverstärkten Spritzbetonschichten aufgebaut. Als Kopfschutz dienten 12 cm Spritzbeton (SB1F). Darüber folgt eine weitere Schicht (12 cm), Gitterbögen im Abstand von 1,2 m mit 22 cm Spritzbeton und Bewehrungsnetz, abgedeckt mit einer letzten Schicht von 8 cm. Die Stirnwand enthielt zwei Schichten stahlfaserverstärkten Spritzbetons (SB1F), eine erste mit einer Dicke von 15 cm, abgedeckt mit einer zweiten, 10 cm dicken Schicht.

11.4.9 Bauhilfsmassnahmen im Bereich des Hosentunnels im Anschluss an das Verzweigungsbauwerk Sarè

Der gleichzeitige Vortrieb der Einspurtunnel nach Lugano zusammen mit den beiden 150 m langen Tunnelstumpen im Anschluss an das Verzweigungsbauwerk Sarè erforderte besondere Beachtung wegen dem geringen Abstand zwischen den Bauwerken (Fig. 11-41 und Fig. 11-42). Die Vorauserkundung mittels Kernbohrungen und zahlreichen Schlagbohrungen an der Stirnwand halfen die Gesteinsqualität der Pfeiler und die nötige Ausbruchsicherung im Vorfeld zu bestimmen. Wegen den nicht allzu ungünstigen Felsverhältnissen an der Stirnwand war kein Materialersatz im Pfeiler-

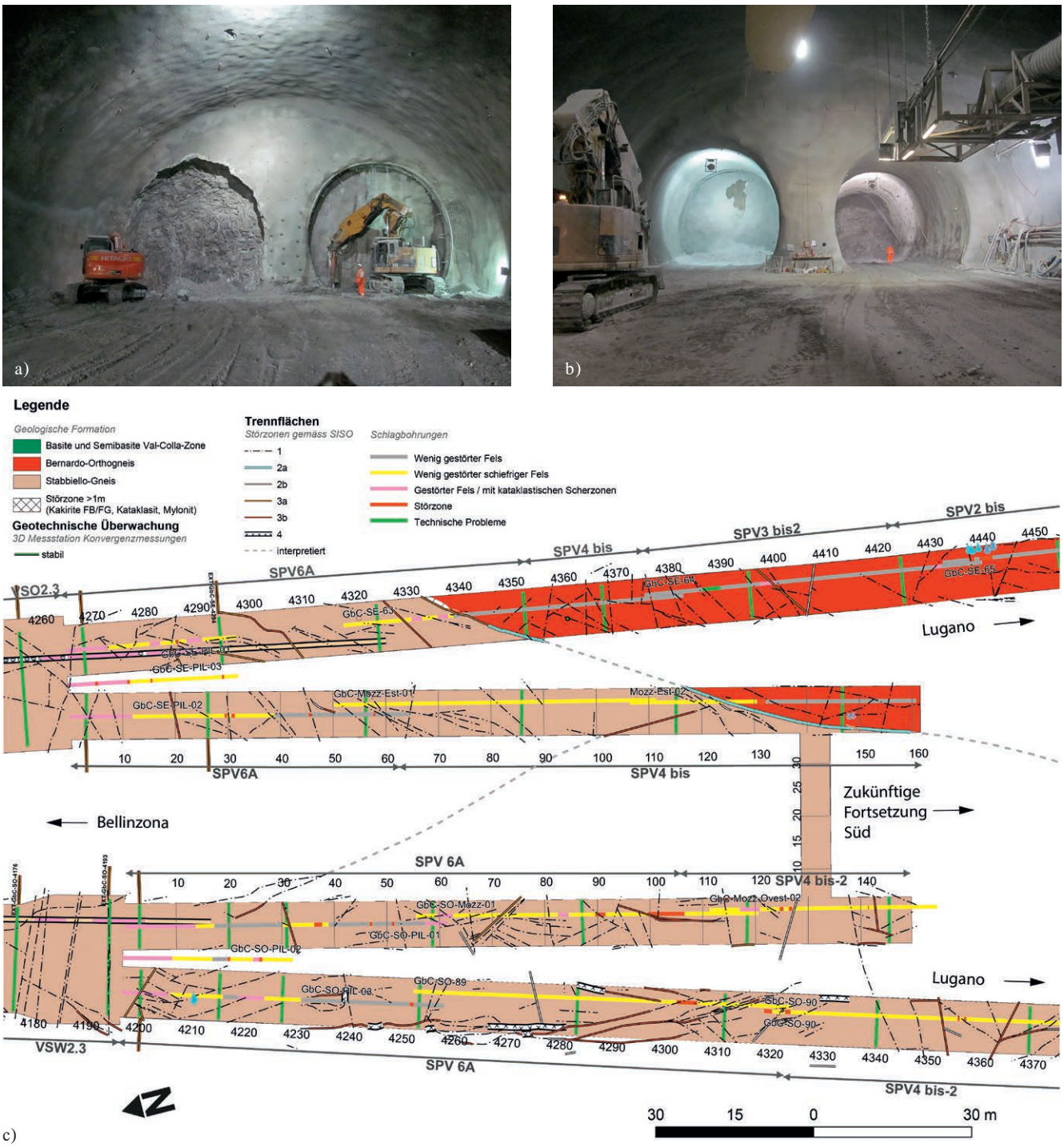


Fig. 11-42: a) Stirnwand beim ersten Vortrieb durch Abbauhammer im Einspurtunnel Richtung Lugano (links) und Tunnelstumpen (rechts) bei Station km 240.650, gesichert durch Stahlbögen TH 29. b) Fortgeschrittener Vortriebstand des Einspurtunnels nach Lugano (rechts) und Tunnelstumpen (links) in der Kaverne Sarè West km 340.680. c) Horizontalschnitt mit geologischem Befund (Fotos IG ITC).

bereich nötig, eine verstärkte Systemankerung zusammen mit einem Ausbruchsicherungstyp SPV-6A genügten als Massnahmen.

Die ersten Meter des Vortriebs wurden nur mit dem Abbauhammer ausgebrochen (Fig. 11-42 a) und anschliessend, je nach Felsverhältnissen, mit Teilsprengung der Ortsbrust oder im Vollausbruch weiter vorgetrieben. Aufgrund der Gesamtlänge der verstärkten Systemankerung entstand eine nachträgliche Klassenbereinigung für die Ausbruchsicherungstypen SPV 6A entlang der ersten 12 m in beiden Einspurtunnel sowie auf einer Länge von 18 m in den Tunnelstumpen in den Ausbruchsicherungstyp SPV 9. Der Übergang von Typ SPV 6A zu SPV 4 erfolgte nach einem Drittel im Hosentunnel Ost (Tm 62) und zwei Drittel im Hosentunnel West (Tm 106). In der Oströhre erfolgte der Wechsel auf Typ SPV 4 bei km 240.736, die Position entspricht dem lithologischen Kontakt zwischen Stabbiello-Gneis und Bernardo-Orthogneis. In der Weströhre konnten die Stahlbögen des Typs SPV 6A nach der Durchörterung der letzten Störungszonen bei km 340.773 weggelassen werden.

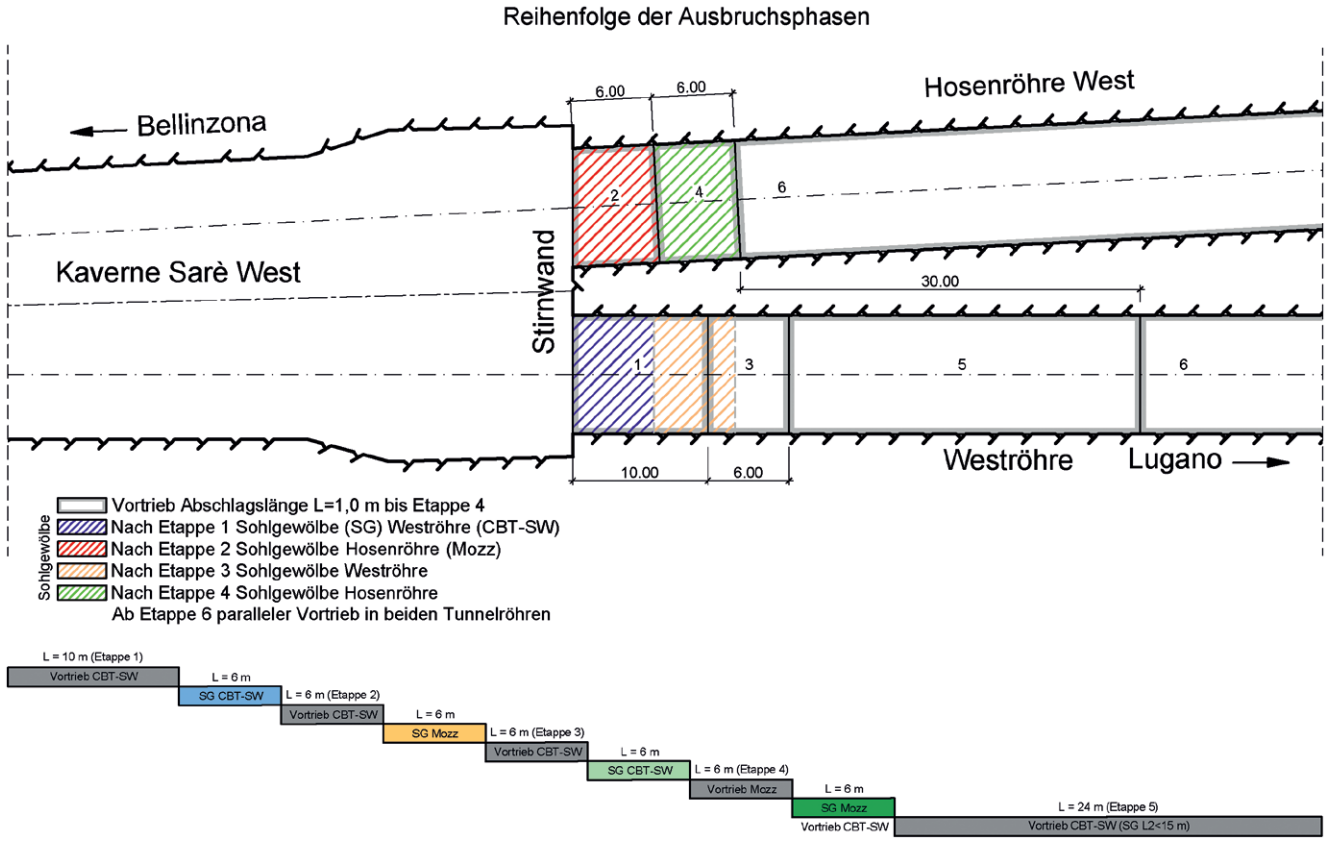


Fig. 11-43: Abfolge der Vortriebsetappen im Anschluss an das Verzweigungsbauwerk Sarè, Auszug aus dem Festlegeblatt Mozz-Ovest bei Tm 12.

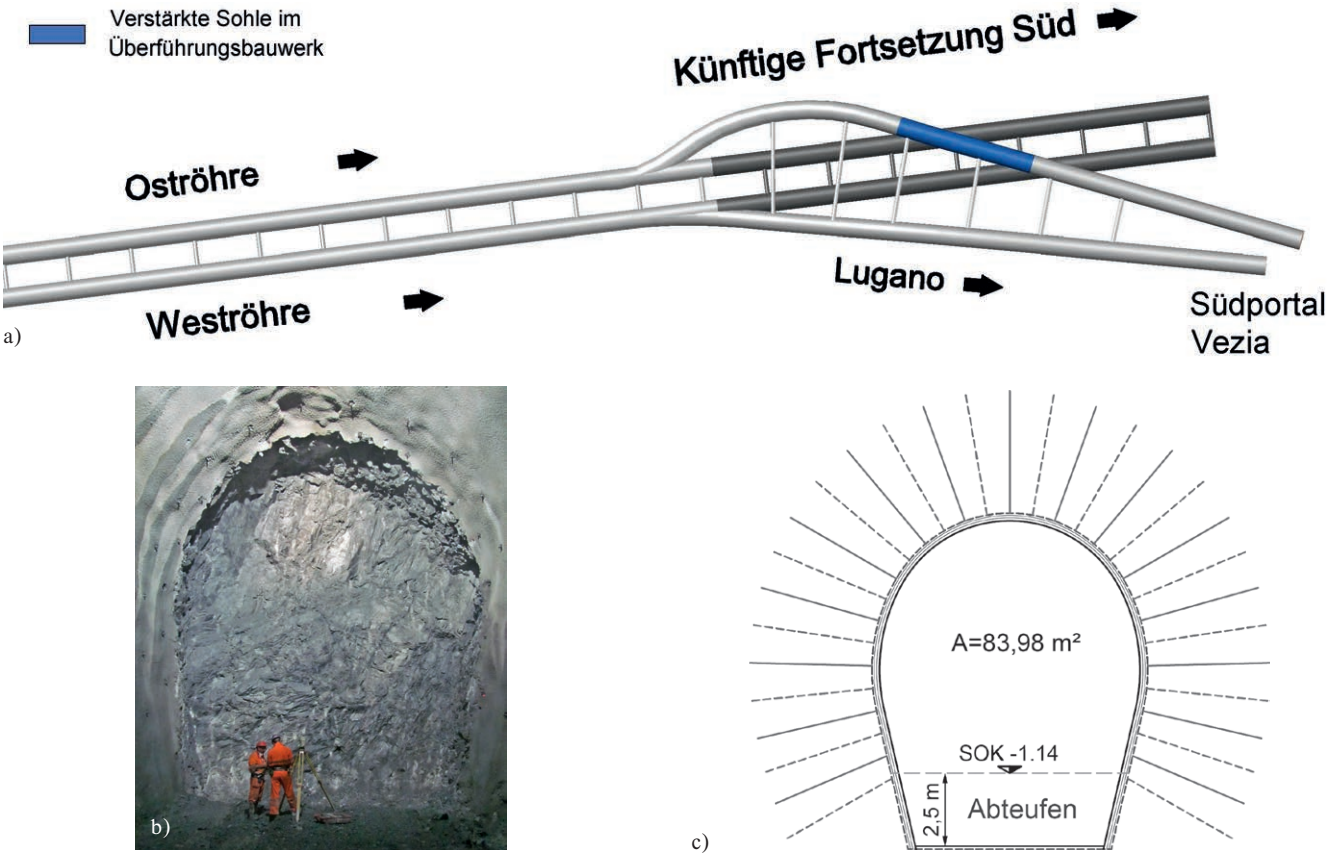


Fig. 11-44: a) Schematische Darstellung mit der Lage des Überführungsbauwerks der Fortsetzung Süd mit einer Länge von 170 m zwischen km 241.940 – 242.110. b) Muffinförmiges Ausbruchsprofil bei km 242.063 und c) Systemankerung im Querprofil der Oströhre. Das hufeisenförmige Profil wurde 2,5 m tiefer ausgebrochen (Foto IG ITC).

Die geotechnische Überwachung erfolgte mit Hilfe von Extensometern und auf den 30 ersten Metern mit radialen Verformungsmessstellen im Abstand von 10 und anschliessend alle 20 m (Kap. 9 und Fig. 11-42 c). Die aufgezeichneten Verformungen sowie die aufgetretenen Ereignisse wie Kleinsteinfall, Kluftkörper und Auflockerung erforderten keine zusätzlichen Bauhilfsmassnahmen zur Verstärkung oder Konsolidierung des Pfeilers und der darauffolgenden Strecken.

Die Vortriebsetappen für den Ausbruch der Einspurtunnel und des Hosentunnels erfolgten mittels Festlegeblatt (Fig. 11-43) abwechselnd in beiden Tunnelröhren, beginnend durch eine 10 m lange Etappe im Hosentunnel gefolgt von einer 6 m langen, zweiten Etappe im Einspurtunnel. Diese Vortriebsmethode reduzierte die Wechselwirkung beider Tunnelröhren, die Verformung sowie (Kap. 9) die Erschütterungen im Bereich des Pfeilers und der Felswand zwischen beiden Tunnels auf ein Minimum. Aus den Ergebnissen der radialen Verformungs- und Extensometermessungen konnte kein gegenseitiger Einfluss der Vortriebe beider Tunnelröhren festgestellt werden, weil die Vortriebe fast gleichzeitig erfolgten und daher keine klare Trennung des wechselseitigen Einflusses möglich war.

11.4.10 Bauhilfsmassnahmen im Bereich des Überführungsbauwerks

Der Vortrieb im Einspurtunnel Ost nach Lugano für die eventuelle künftige Fortsetzung des CBT Richtung Süden nach Como und Milano soll unter Eisenbahnbetrieb stattfinden (Fig. 11-44 a). Die minimale Felsdecke zwischen den beiden Bauwerken beträgt bei km 241.989 1,2 m (Fig. 11-45). Dieses Vorhaben konnte dank dem im Einspurtunnel Ost (km 241.940–242.110) realisierten Überführungsbauwerk mit einer 2,5 m starken bewehrten Sohle auf einer Länge von 170 m realisiert werden. Das Betonieren des Überführungsbauwerks erfolgte in zwei 85 m langen Etappen.

Der Vortrieb im Vollausbruch mit einem Querschnitt von 84 m² (Fig. 11-44 c) verlief ohne besondere geotechnische Schwierigkeiten. Die Ereignisse begrenzten sich auf einzelne Gleitkörper in der Ortsbrust, Kluftkörper mit Volumen von weniger als 5 m³ und einem lokalen Ereignis in der Oströhre bei km 242.081, welches durch Kombination von Kluftkörpern und Ablösungen im Firstbereich zu einem geologischem Überprofil von 18 m³ führte. Wegen ungünstiger Orientierung der Schieferung und Kluftscharen war das häufigste Ereignis systematischer Kleinsteinfall, welcher mit einem gründlichen Felsreinigen und Kopfschutz bewältigt wurde.

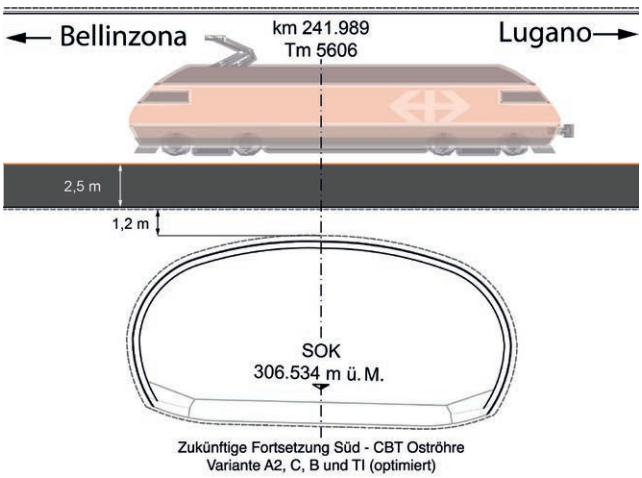


Fig. 11-45: Längenschnitt des Überführungsbauwerks am Kreuzungspunkt mit minimaler Felsüberlagerung von 1,2 m bei km 241.989 zeigt die verstärkte Sohle mit einer Stärke von 2,5 m (grau).

11.4.11 Unterquerung des Val Ponteggia

Die Unterquerung des Val Ponteggia (HB 43 und HB 44) ist gekennzeichnet durch eine geringe Gebirgsüberlagerung zwischen Firstpunkt und Flussbett von 13 m. Der Fluss «Gaggio» mit einer Breite zwischen 2 und 10 m (Fig. 11-46) schlängelt sich durch das Val Ponteggia, indem er die Achse des Weströhre mit unterschiedlicher Gebirgsüberlagerung insgesamt fünfmal kreuzt. In der Projektierungsphase hatten detaillierte geologische Untersuchungen im Flussbett gezeigt, dass dieses aus Fels besteht, der teilweise von Alluvion (Sand, Kies und Blöcke) bedeckt ist. Gemäss Prognose, die sich auf die Ergebnisse der Kernbohrungen und Strukturanalysen stützt, ist der Fels durch eine Schar kataklastischer Störungen mit unterschiedlicher Orientierung und Einfallswinkel durchtrennt (SZ 43.1–43.5). Obwohl der Gegenvortrieb Vezia unterhalb des Flusses «Gaggio» trocken blieb, waren für die Durchörterung aufgrund des Durchtrennungsgrad des Felses in der Prognose Wasserzutritte nicht auszuschliessen. Der Befund zeigte fünf Wasserzutritte mit initialen Schüttungsmengen <0,1 l/s. Mit nachträglichen Begehungen für die Abschätzung der stationären Wasserzutritte im Tunnel erkannte man an diesen Stellen einige wenige Tropfstellen mit vereinzelten feuchten Stellen. Der gesamte stationäre Wasserzutritt in diesem Abschnitt wurde auf <0,1 l/s geschätzt (Kap. 4.2).

Durch den Durchtrennungsgrad und die subhorizontale Schieferung mit variabler Orientierung, neigte die Kalotte zu Kluftkörperbilung mit geologischen Überprofilen bis zu 6 m³, was in der Oströhre bei km 242.346 und in der Weströhre bei km 342.106 eine lokale Verstärkung der Ausbruchsicherung mit zusätzlichen Ankern verlangte. Für die Durchörterung des gesamten Abschnittes im Val Ponteggia genügte ein Ausbruchsicherungstyp SPV 3.

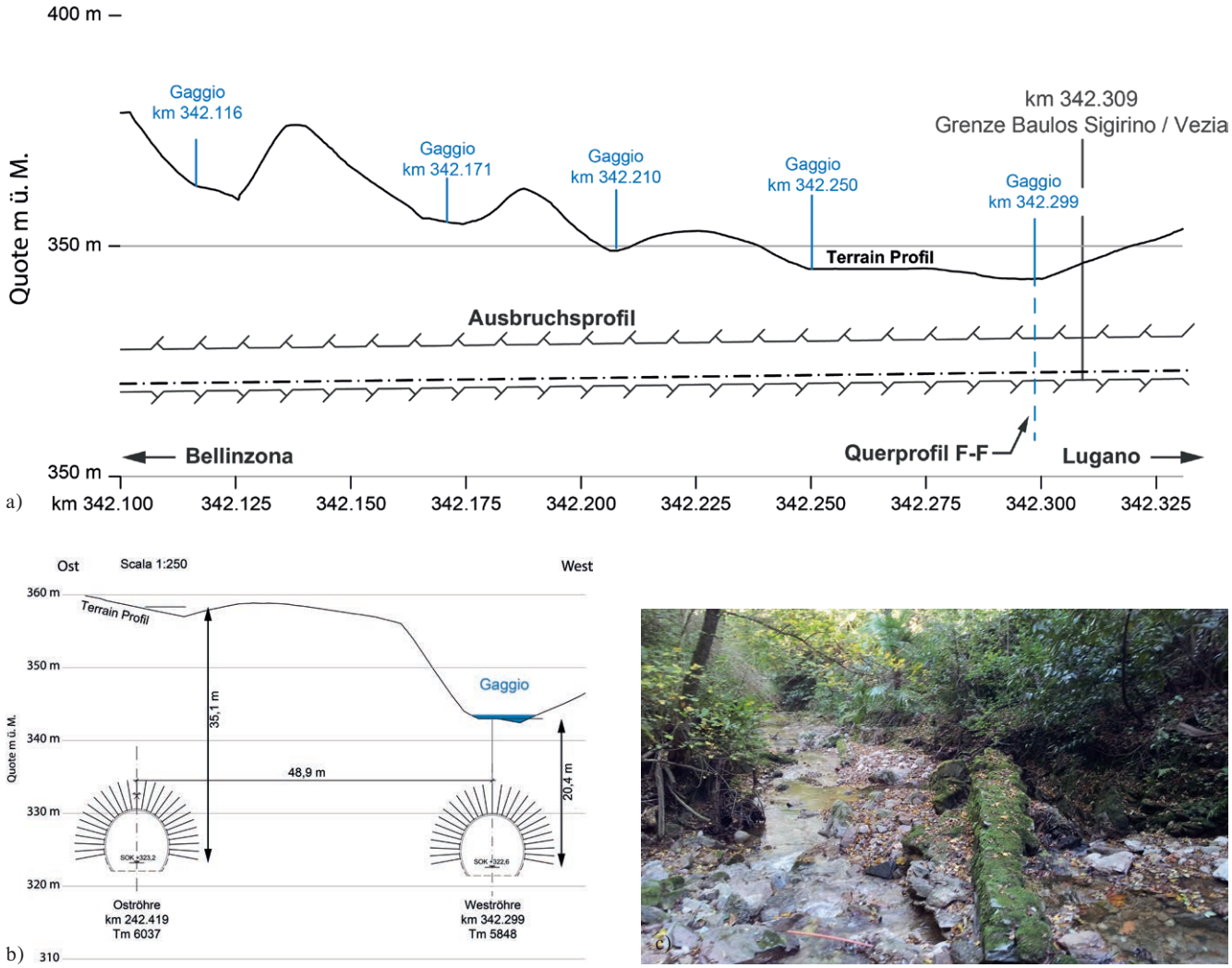


Fig. 11-46: a) Das Höhenprofil entlang der Tunnelachse West zeigt die wiederholte Querung des Tunneltrassees mit den Mäandern des Gaggio im Val Ponteggia. b) Querprofil F-F bei der Station km 342.399. Die Gebirgsüberlagerung hat zwischen Firstpunkt der Weströhre und dem Flussbett einen minimalen Abstand von 13 m. c) Flussbett des Gaggio an der Oberfläche mit lokalen Felsaufschlüssen und Alluvionen (Foto Dr. Baumer SA).

12. Naturgefahren und Aussenanlagen

12.1 Naturgefahren im Bereich der Übertagebaustelle in Sigirino

Zu Beginn der Vorarbeiten im Jahr 2006 ergaben sich während Forstarbeiten Hinweise, die zeigten, dass der Hang oberhalb der Übertagebaustelle in Sigirino im Bereich des Installationsplatzes zwischen den Portalen des Fensterstollens und Erkundungsstollens Naturgefahren (insbesondere Steinschlag) ausgesetzt ist. Das Gebiet erstreckt sich von der Höhenkote 390 m im Gebiet Prati di Regada bis 900 m bei Ferrino Motto. Die Felswände sind aus Biotit-, Zweiglimmer- oder Hornblende führendem Gneis des Ceneri-Orthogneises aufgebaut.

Der Fels, welcher z.T. mit einer dünnen Schicht Humus bedeckt ist, zeigt eine Durchtrennung, welche von drei Hauptkluftscharen gebildet wird, an denen sich Blöcke herauslösen können.

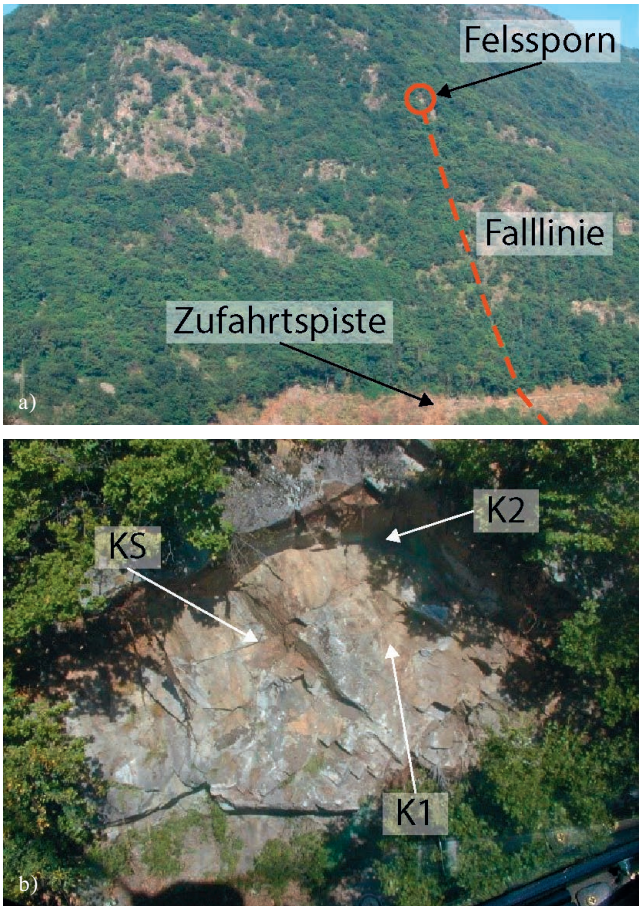


Fig. 12-1: Steinschlagereignis vom 05.09.2006 oberhalb des Baustellenplatzes in Sigirino. a) Falllinie des Steinschlags und b) Detail des Felssporns mit interpretierten Trennflächen (Fotos Dr. S. Morandi).

Am 05.09.2006 lösten sich von einem Felssporn 30–40 m³ Gestein, wobei mehrere Blöcke mit einer Dimension von bis zu 1 m³ auf die Zufahrtspiste des Materialzwischenlagers am Fusse des Hanges gelangten.

Aus der Untersuchung der Naturgefahren in diesem Gebiet mittels geomorphologischen und strukturgeologischen Geländeaufnahmen Fig. 12-13 und Steinschlagmodellierungen resultierten Ereignis- und Naturgefahrenkarten, welche als Grundlage für die Sicherungsmassnahmen mit Steinschlagnetzen dienten.

Während der Bauzeit des CBT wurden die Steinschlagnetze in regelmässigen Zeitabständen gewartet.

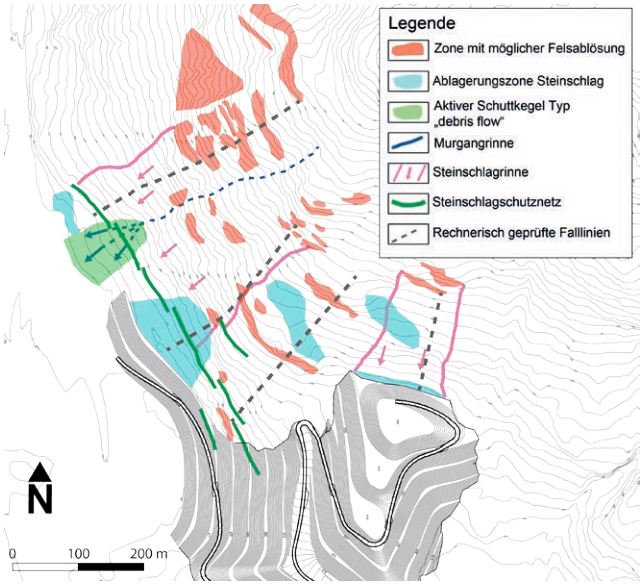


Fig. 12-2: Geomorphologische Karte mit der Position der Steinschlagnetze oberhalb des Installationsplatzes Sigirino.

12.2 Portaleinschnitt Fensterstollen Sigirino

Der Portaleinschnitt des Fensterstollens Sigirino bildet die Stirnwand für den Zwischenangriff mit TBM-Vortrieb (Fig. 12-3). Die Arbeiten des Portaleinschnittes begannen im November 2006 aussgehend von oben mit dem Bau der Zufahrtstrecke zur Kote 430 m (Fig. 12-6). Nach Fertigstellung der überhängenden Steinschlagnetze Ende Januar 2007, begannen die Ausbruch- und Felsreinigungsarbeiten des Portaleinschnittes und endeten Ende Juni 2007 auf der Kote 387 m. Am Ende der Ausbrucharbeiten erreichte die trapezförmige Stirnwand eine Gesamthöhe von 43 m.

Die Kluftkörper an den Seiteneinschnitten wurden mittels Drahtseilnetzen oberhalb der Kote 418 m gesichert. Die

Fig. 12-3: Portaleinschnitt des FIS (Foto IG ITC).

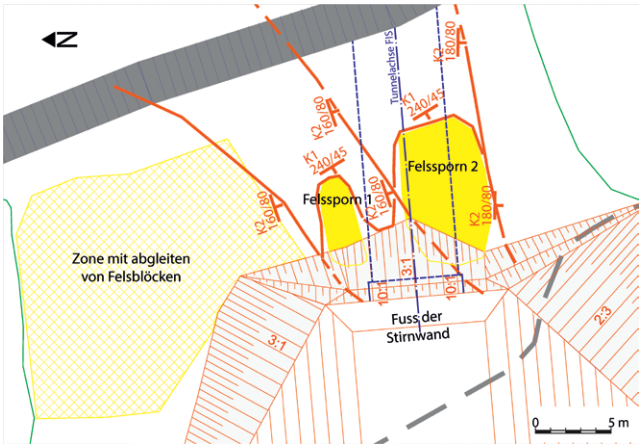


Fig. 12-4: Geotechnische Kartierung auf der linken Seite des Portaleinschnittes mit losen Felsblöcken. Über dem Portal des FIS sind instabile Felssporne zu erkennen (Graphik Dr. S. Morandi).

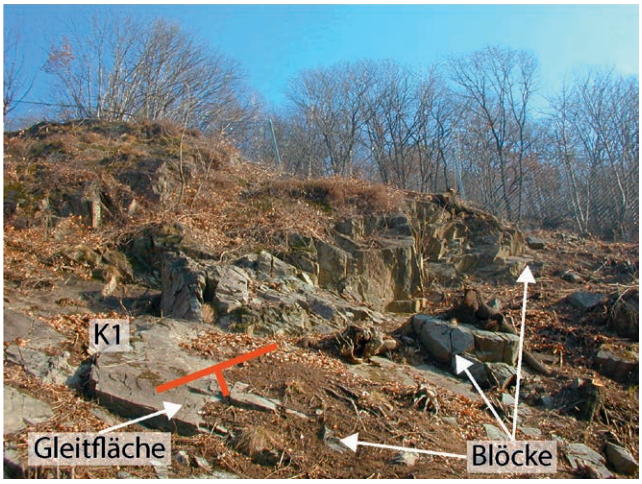


Fig. 12-5: Lose Felsblöcke zwischen Kote 430 und 445 m wurden gesprengt und von Hand gereinigt. Die Kluftschar K1 fällt hangauswärts und bildet Gleitflächen (Foto Dr. S. Morandi).

Stirnwand wurde mit Mörtelankern von 4–6 m Länge, Maschenweite 2 × 3 m und mit doppeltem Torsionsnetz (Typ Maccaferri) zwischen Kote 409 m und 430 m gesichert. Am Fuss der Stirnwand bis zur Kote 409 m beinhaltete die Sicherung 6 m lange Mörtelanker mit einer Maschenweite von 2 × 3 m, Bewehrungsnetze und Spritzbeton.

Die Arbeiten des Portaleinschnitts wurden von den Geologen in Abhängigkeit des Arbeitsfortschrittes begleitet. Mittels strukturgeologischer Aufnahmen erstellte der Geologe eine Trennflächenkarte, anhand welcher die Gefährdungsbilder abgeschätzt werden konnten. Das Ergebnis floss in die Festlegung der Felssicherung. Gleichzeitig wurden die kritischen Volumen der Kluftkörper statistisch bestimmt, um den rechnerischen Nachweis der Felssicherung zu erbringen. Die Kluftkörper erreichten im Mittelwert eine Seitenlänge zwischen 1,5 und 3,5 m mit Volumen von 0,7–6,0 m^3.

Während der Rodungsarbeiten und des Abtragens der Deckschicht konnten über dem Portal oberhalb der Kote 430 m mehrere instabile Felssporne identifiziert werden, die wegen der hangausfallenden Schieferung Gefahr liefen abzugleiten (Fig. 12-4). Zudem beinhaltete die nördliche Seite eine ganze Zone mit Kluftkörpern, die abzugleiten drohten (Fig. 12-5), und oberhalb der Felswand auf der Nord-Ostseite bei Kote 430 m befand sich eine verwitterte Zone im anstehenden Fels, welche intensiv durchtrennt war. An maschinell zugänglichen Stellen wurde die verwitterte Zone mit dem Abbauhammer gereinigt. Die Felsreinigung weiter oben an unzugänglichen Stellen erfolgte mit Sprengungen und anschliessender Felsreinigung von Hand (Fig. 12-5).

Die Felssporne mit einem Gesamtvolumen von rund 1000 m^3 konnten von oben herunter in stufenförmigem Abtragverfahren entfernt werden, wobei der Fels anschliessend mit 4 m langen Mörtelankern und Maschennetzen gesichert wurde (Fig. 12-6). Unterhalb der Kote 418 m wurde der gereinigte Bereich mit 6 m langen Mörtelankern und Spritzbeton gesichert.

In der Ausführungsphase des Portaleinschnitts haben Lage, Orientierung sowie Durchtrennung die Ausführung der Profilierung der Felsoberfläche erschwert. In der Ostwand führten regelmässige Kluftkörper mit grösserem Volumen im Vergleich zur Prognose zu systematischen Abweichungen der Felsböschungswinkel bergeinwärts während des Abtragens der einzelnen Terrassen.

Diese Abweichung der Felsböschung konnte nur im unteren Teil der FIS-Wand korrigiert werden. Diese Situation hatte jedoch keinerlei Folgen in Bezug auf die Gesamtstabilität des Portaleinschnittes, sondern trug lediglich dazu bei, beim Abtragen des Felsen in den oberen Höhenkoten grössere Volumen zu generieren. Die Stabilität konnte mittels geodätischer Messungen überwacht werden.

12.3 Baumethode der Ablagerung Sigirino

Die Materialbewirtschaftung umfasste mehrere Lose wie das Los für die Laborproben, den Bau, Unterhalt und Betrieb der Förderanlagen und Anlagen für die Materialaufbereitung sowie den Bau und Unterhalt der Ablagerung

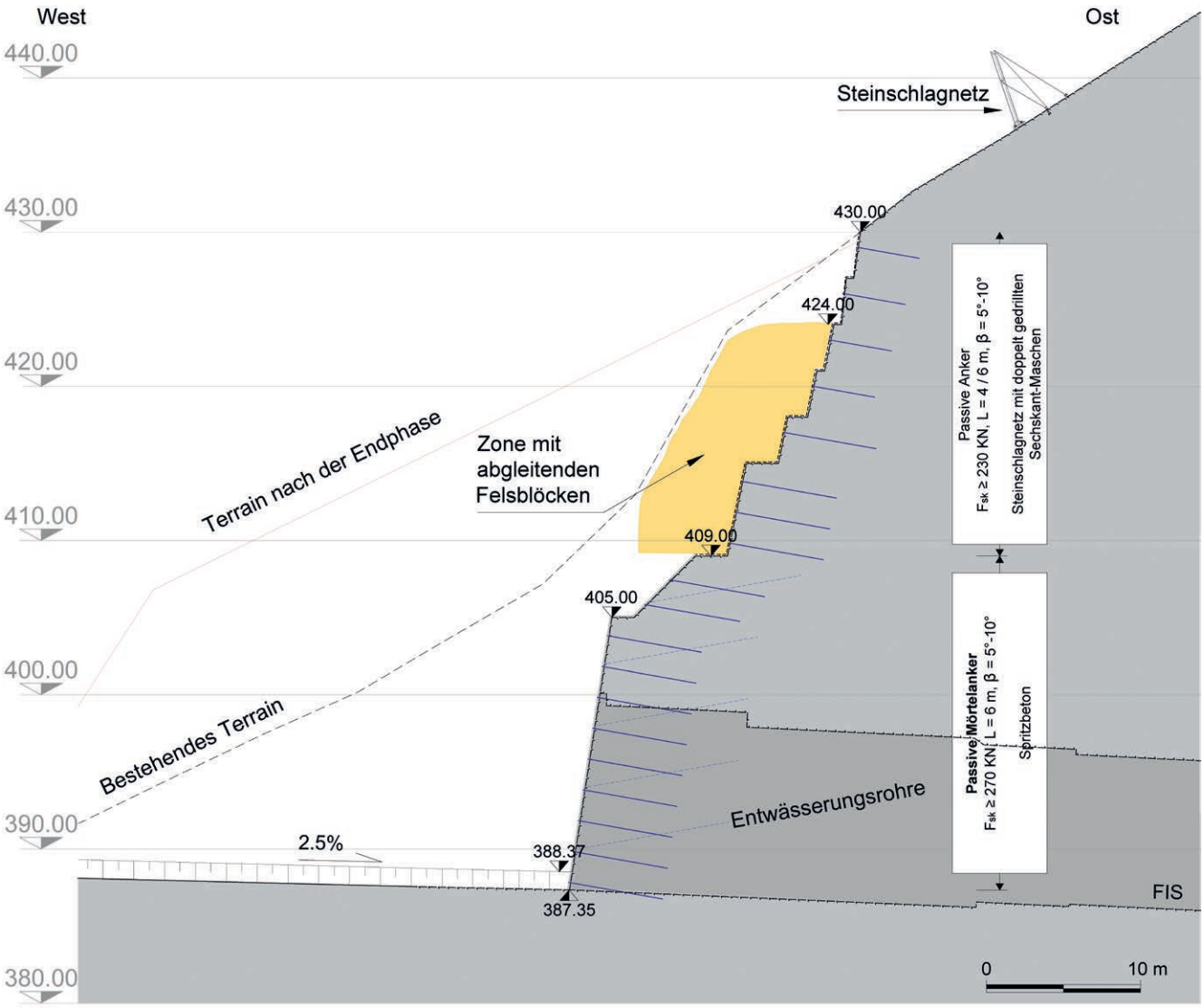


Fig. 12-6: Längenschnitt des Portaleinschnittes entlang der Tunnelachse des FIS mit einer Gesamthöhe von 43 m.

in Sigirino. Das zuletzt erwähnte Los betrieb die Ablagerung des Ausbruchmaterials (B Material) aus dem gesamten CBT in der Grössenordnung von 6,8 Mio t (Fig. 12-7, 12-8). Der Bau des Drainagesystems auf der Deponiesohle und die Bautechnik für das Erstellen der «bewehrten Böschungen» am Portaleinschnitt sind zwei Besonderheiten der Ablagerung.

Der Aufbau der Ablagerung des Ausbruchmaterials war ein komplexes Unterfangen, dessen Erfolg von verschiedenen geotechnischen und hydrogeologischen Faktoren abhing. Aus diesem Grund musste die Ablagerung überwacht werden, indem das Verformungsverhalten des Baugrundes, das Setzen und Verdichten des abgelagerten Materials und ebenso die vertikale Entwässerung zu überwachen waren.

Fig. 12-7: Das Panoramafoto zeigt die Struktur der Ablagerung am 06.06.2013 südlich des Installationsplatzes. Entlang des Portaleinschnittes des FIS lässt sich die 70° steile provisorische Erdwand erkennen (Foto IG ITC).

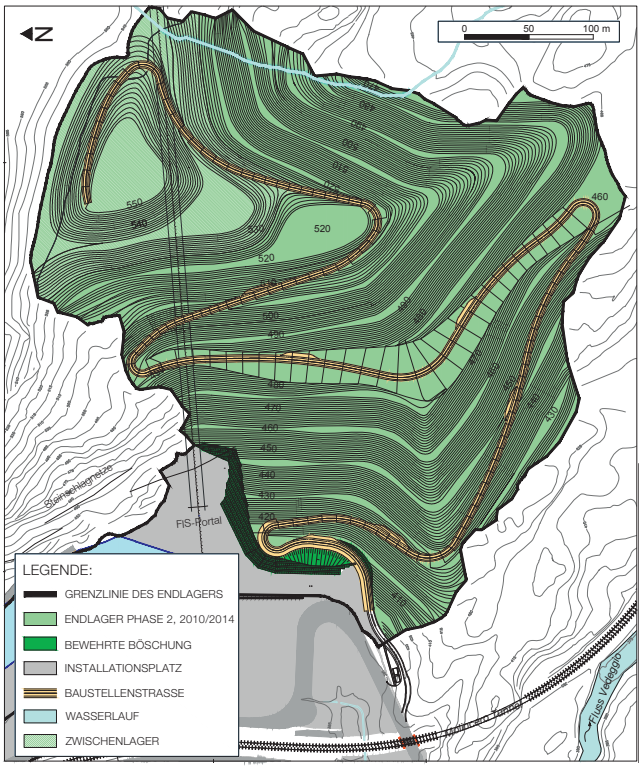


Fig. 12-8: Horizontalplan im Projekt für die Ablagerung während der Bauausführung im Zeitraum zwischen 2010 und 2014.

12.3.1 Drainagesystem

Die Dimensionierung und Bauweise des Entwässerungssystems (Fig. 12-9) hat eine signifikante Wirkung auf die gesamte Stabilität der Ablagerung. Diese wird durch ein konnektives System gewährleistet, bei dem das Wasser durch Gabionen an der Basis der Ablagerung gefasst, über Gabionen entlang der Bermen transportiert und entlang der Eingrenzung der Ablagerung abgeleitet wird (Fig. 12-10a). In der Ausführungsphase wurden je nach Position und Funktion verschiedene Typen von Gabionen eingesetzt. Die Herstellung des Füllgutes für die Gabionen erfolgte vor Ort während der Aussortierung des Ausbruchmaterials aus dem CBT. Ein Filtervlies trennt das Wasser vom Humus entlang der Gabionen, welche auf ein Betonfundament gelegt wurden (Fig. 12-10b). Das Drainagewasser wird in einem geschlossenen Becken gesammelt und je nach Wasserqualität in die Kläranlage oder direkt in den Fluss Vedeggio weitergeleitet. Die Qualität des Drainagewassers wurde mit einem automatisierten System überwacht.

Eine weitere geotechnische Herausforderung war der Baugrund. Dieser bestand aus Lockergestein, hauptsächlich aus Sand und Kies mit zwischengelagerten tonigen Siltlagen. Die schichtförmige Ablagerung mit dichten tonigen Siltlagen verursachten mit fortschreitendem Bau zunehmende Porenwasserdrücke. Um die Porenwasserdrücke im Untergrund auszugleichen, wurden Entlastungsbohrungen bis ins Fest-

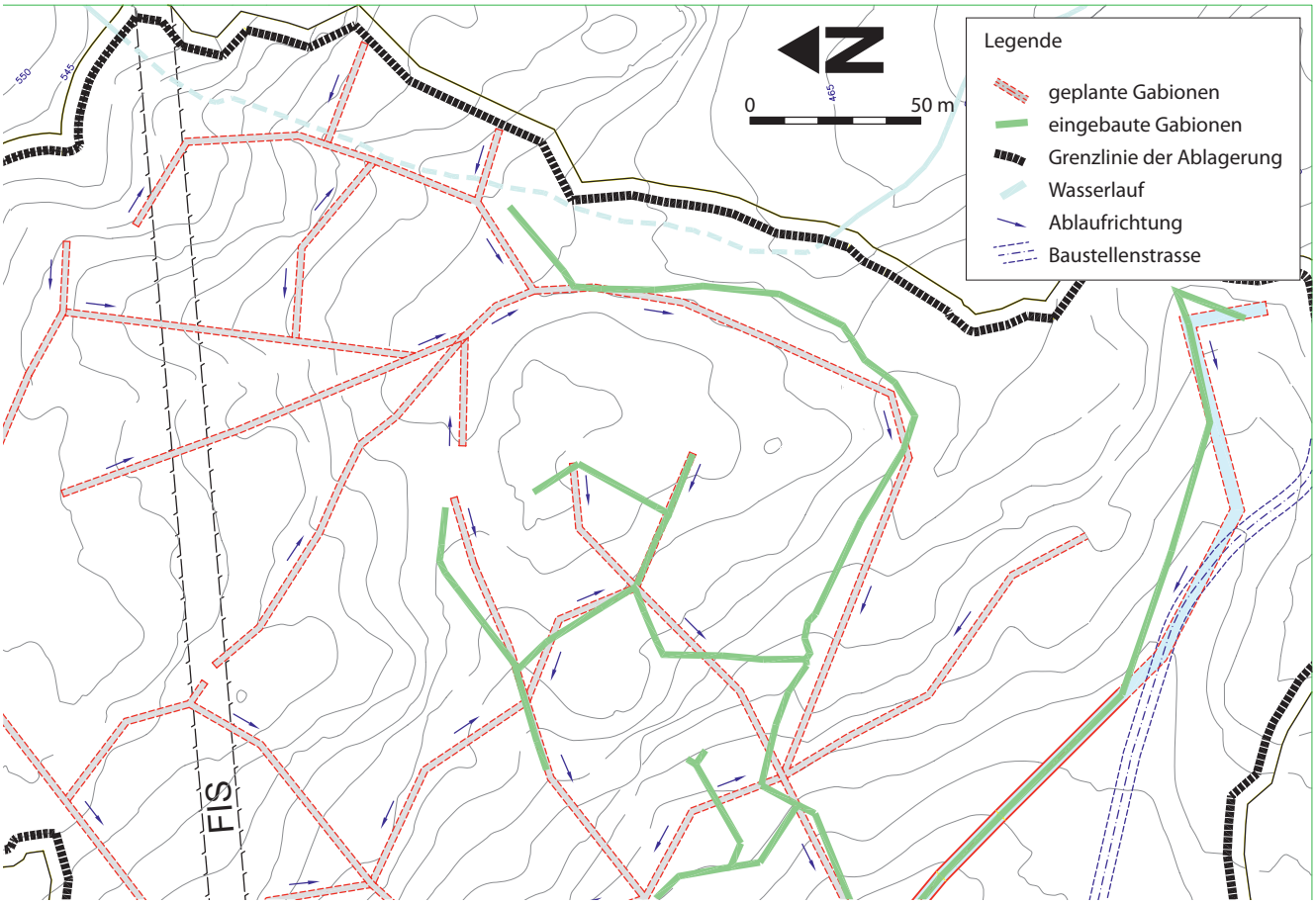


Fig. 12-9: a) Horizontalplan im Projekt für die Planung der Basisdrainage der Bauausführung im Jahr 2014. Die definitiven Gabionen entsprechen nicht ganz genau der Planung.

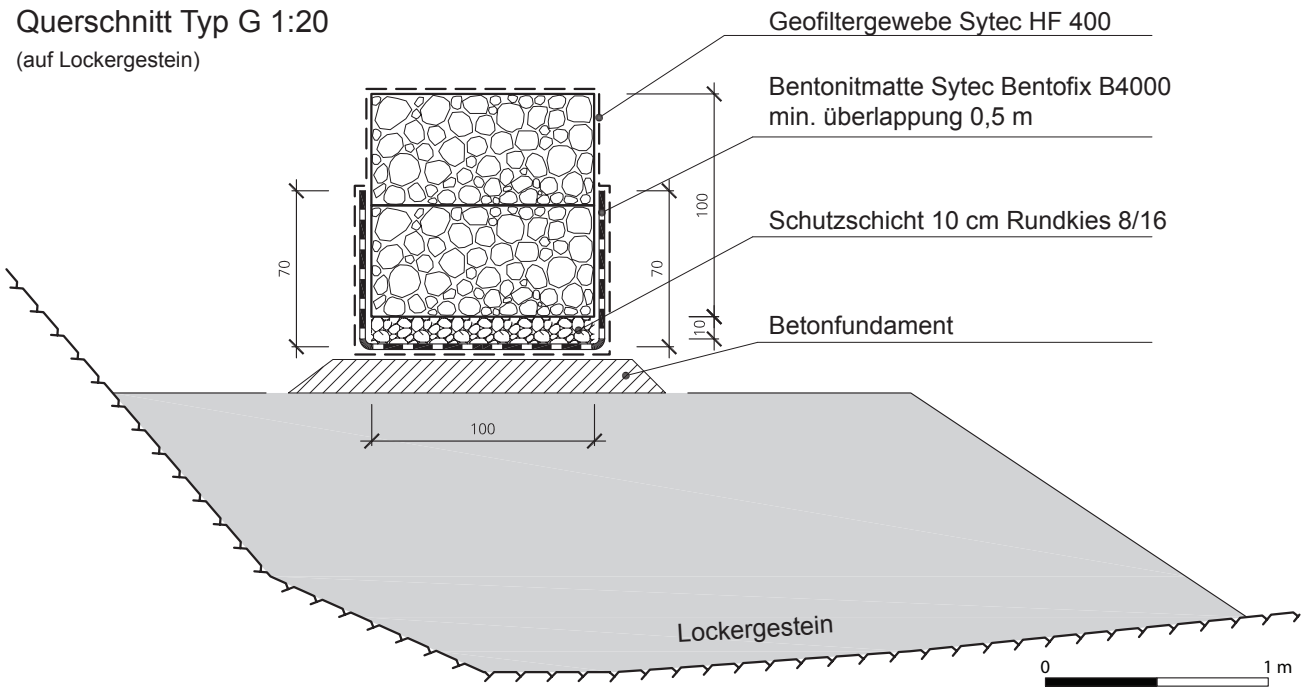


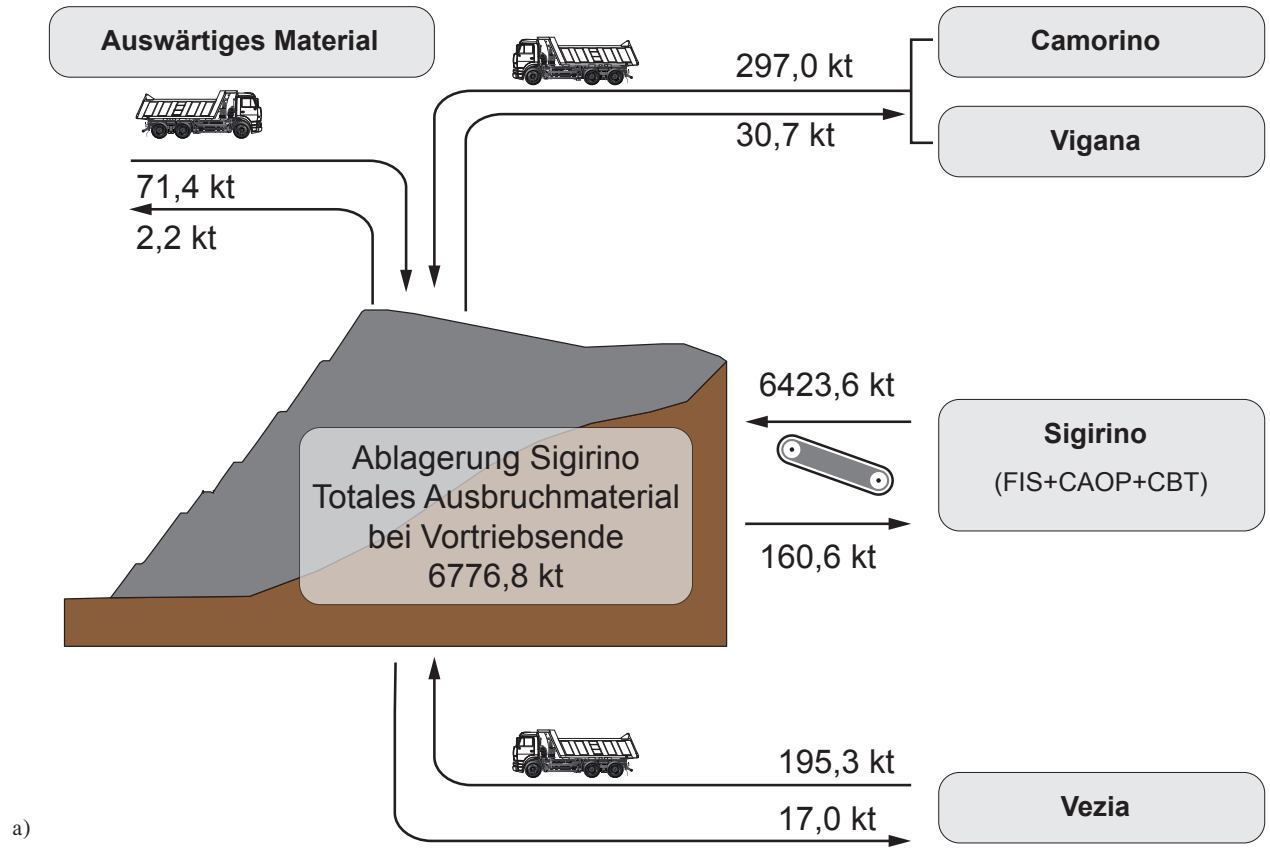
Fig. 12-9: b) Querschnitt durch eine Gabione Typ G erstellt auf Lockergestein.

Fig. 12-10: a) Einbau des Filtervlieses und Auffüllen der Gabionen mit Sickerkies am Südrand der Ablagerung (Juli 2017) auf der Kote 440–460 m. b) Planierarbeiten und Auftragen einer 50 cm Humusschicht nach Bedecken der Gabionen mit einer Kiesschicht auf Kote 430 m, März 2012. c) Bau der Gabionen entlang einer Berme. Im Hintergrund sind zwei Inklinometerstationen mit Schacht sichtbar. d) Schnitt durch die oberste Humusschicht mit Blick in die Gabione und das Ausbruchmaterial (Fotos IG ITC).

gestein abgeteuft. Die Bohrlöcher wurden im Bereich des Lockergesteins mit doppellagigen Vliesstreifen versehen, die eine vertikale Entwässerung erlaubten.

12.3.2 Innenkörper der Ablagerung

Der Bau des Innenkörpers der Ablagerung erfolgte in drei Phasen. Gemäss Planung wird der Abschluss der letzten Phase nicht vor dem Jahr 2022 erwartet. Zu Beginn der Phase 1, in der Zeit vor 2010, wurde das nicht wiederverwendbare Ausbruchmaterial der CPS, FIS und CAOP per LKW in die Ablagerung transportiert. Ab Phase 2, von 2010 bis 2014, wurde der westliche Bereich der Ablagerung mit Förderbandtransport im Schutz einer bewehrten Böschung aufgeschüttet. Gegen Ende der Vortriebe des Bauloses Sigirino wurde das Aufschüttmaterial für das FIS-Portal in einem Zwischenlager im oberen Bereich der Ablagerung vorbereitet. Die Aufschüttungs- und Planierarbeiten (Fig. 12-



a)

b)

c)

Fig. 12-11: a) In der Ablagerung kumuliertes Ausbruchmaterial nach Vortriebsende des CBT. b) Einblick in die Baumethodik im Innern der Ablagerung, Februar 2013. Das Foto zeigt die verschiedenen Bauausführungen der Aufschüttung bis zur Verdichtung des Ausbruchmaterial auf der Höhenkote 460 m. In der Bildmitte ist der Einbau eines Inklinometers zu erkennen. c) Bau der Böschung bei Höhenkote 430 m im März 2012 mit 50 cm dicken Humusschicht (Fotos IG ITC).

11 b) wurden gemäss der Norm SN 640 588 durchgeführt. Dabei prüfte die öBL die Verdichtung und die Setzungen unter Verwendung von Penetrationstests und Plattendruckversuchen in regelmässigen Abständen. Das aufgeschüttete Ausbruchmaterial musste im Innenkörper einen minimalen Verdichtungswert (ME) von 40 MN/m² erreichen (s. SN 640 585 b). Bei darunterliegenden Messergebnissen wurde das Ausbruchmaterial weiter verdichtet. Im Fall, dass der Verdichtungswert unterhalb von 15 MN/m² lag, wurde eine zusätzliche Zwischenschicht zur Verstärkung eingebracht. Für den Bau der Böschung sollte der innere Reibungswinkel des Ausbruchmaterials gemäss Korngrössenverteilungskurve nach der Dhawan-Methode $\phi \geq 34°$ betragen. Die Böschung, welche ein Neigungsverhältnis von 2:3 aufweist, wurde nach dem Planieren mit einer 50 cm dicken Humusschicht abgedeckt und während den geeigneten Jahreszeiten angesät (Fig. 12-11 c).

12.3.3 Bautechnik beim Bau der Böschung

Der Standort der Ablagerung und die Dimensionierung seiner Grösse waren die entscheidenden Faktoren für ihre geometrische Gestaltung. Für die Realisierung dieses Bauwerkes war es notwendig, mit dem Bau einer temporären Erdwand genügend Platz für die Ablagerung zu schaffen (Fig. 12-7, 12-8), da im Bereich des definitiven Böschungsfusses das Portal des FIS liegt und ausserdem Platz für die Werkstätten der ausführenden Unternehmung geschaffen werden musste. Die abschliessenden Arbeiten sehen vor, den Portalbereich des FIS gegen die Erdwand hinzu aufzuschütten. Die Böschung wird dann für den Bau der definitiven Forststrasse angepasst. Auf der Südseite des Portals erreicht die bewehrte Erdwand mit einer Neigung von 70° terrassenförmig eine Höhe von 29 m (Fig. 12-12), die sich aus fünf ca. 6 m hohen Terrassen zusammensetzt. An jedem Terrassenrand verläuft eine Berme, die an das Drainagesystem angeschlossen ist. In der Projektphase wurde die Stabilität der temporären Erdwand mittels statischer Berechnung verifiziert. Die statische Berechnung beinhaltet eine Rückanalyse, die von Überwachungsdaten aus der Zeit der Aufschüttung mit Ausbruchmaterial des CPS stammen. Die Messwerte aus der Überwachung, kombiniert mit den zusätzlichen bodenmechanischen Tests (Standard Penetration Test), erlaubten, in einem zweiten Schritt die Bewehrung der Erdwand unter Berücksichtigung der vertikalen Entwässerungsfaktoren zu überprüfen. Mit diesem statischen Nachweis konnten folgende Ziele erreicht werden:

- Abschätzung der erwarteten Verformungen in vertikaler und horizontaler Richtung, einschliesslich Porenwasserdruck
- Stabilität der Ablagerung in Bauausführung und am Ende der Bauausführung
- Grunddokumentation, die dem Vergleich zwischen Prognose und Befund von Neigungsmessungen dient
- Grundlagen für die Dimensionierung von Geogittern

Die Untersuchung ergab, dass die raue Felsoberfläche den Widerstand der Grenzfläche zwischen abgelagerten Ausbruchmaterial und dem Fels erhöhte und so einen positiven Einfluss auf die Stabilität des Systems hatte.

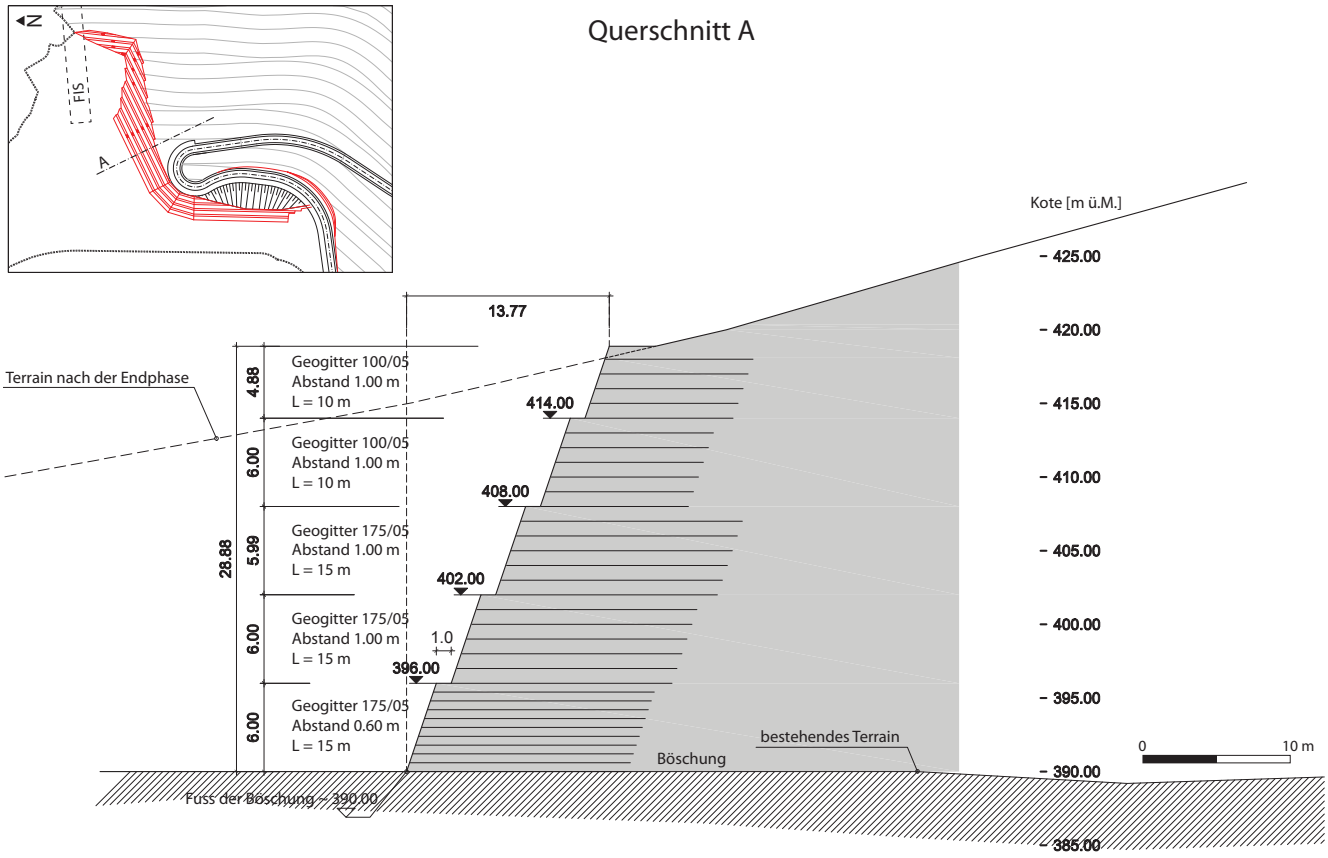


Fig. 12-12: Querschnitt der bewehrten Böschung mit einer Neigung von 70° und einer Gesamthöhe von 29 m, mit Terrassen.

Fig. 12-13: a) Bewehrte Böschung im Bereich des FIS-Portals mit Geogitter der Schicht 128 bei Höhenkote 464 m (Juni 2013), Bewehrungsnetz, Drahtgitter und Erosionsmatte am Rand. b) Detail der Konstruktion der bewehrten Böschung mit Geogitter Typ 3 und der Verlegung der Schicht 116 bei Höhenkote 457 m (April 2013, Fotos IG ITC).

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass im unteren Teil am Fuss der bewehrten Böschung über der FIS Geogitter mit einer Länge von 10 m verlegt werden mussten, während im oberen Teil der Wand Geogitter mit einer Länge von 20 m erforderlich waren (Fig. 12-13).

Literaturverzeichnis

Anagnostou, G., Pimentel, E. & Dong, W. (2011): Ceneri Base Tunnel AlpTransit project L841-01. – Laboratory triaxial tests on rock material.

Bächlin, R., Bianconi, F., Codoni, A., Vesco, E. dal, Knoblauch, F., Kündig, E., Reinhard, M., Spaenhauer, F., Spicher, A., Trommsdorff, V. & Wenk, E. (1974): Blatt 1313 Bellinzona. – Geologischer Atlas der Schweiz 1:25000, Blatt 66.

Bea, F. & Montero, P. (1999): Behaviour of accessory phases and redistribution of Zr, REE, Y, Th and U during metamorphism and partial melting of metapelites in the lower crust: An example from the Kinzigite Formation of Ivrea-Verbano, NW Italy. – Geochim. Cosmochim. Acta *63*, 1133–1153.

Berg, S.S. (2004): The architecture of normal fault zones in sedimentary rocks: Analysis of fault composition, damage zone asymmetry, and multi-phase flow properties. – Ph.D. thesis, Univ. Bergen, 118 pp.

Bertotti, B. (1991): Early Mesozoic extension and Alpine shortening in the western Southern Alps: the geology of the area between Lugano and Menaggio (Lombardy, Northern Italy). – Mem. Sci. geol. (Padova) *43*, 17–123.

Boriani, A. & Burlini, L. (1974): Carta Geologica della Valle Cannobina. s.l. – CNR, Milano.

Boriani, A., Bigioggero, B. & Giobbi Origoni, E. (1977): Metamorphism. tectonic evolution and tentative stratigraphy of the Serie dei Laghi. Geologic map of the Verbania Area (Northern Italy). – Mem. Sci. geol. (Padova) *32*, 1–26.

Boriani, A., Burlini, L. & Sacchi, R. (1990): The Cossato-Mergozzo-Brissago Line and the Pogallo Line (Southern Alps, Northern Italy) and their relationships with the late-Hercynian magmatic and metamorphic events. – Tectonophysics *182*, 91–102.

Boriani, A., Giobbi Origoni, E. & Pinarelli, L. (1995): Palaeozoic evolution of southern Alpine crust (northern Italy) as indicated by contrasting granitoid suites. – Lithos *35*, 47–63.

El Tahlawi, M.R. (1965): Geologie und Petrographie des nordöstlichen Comerseegebietes (Provinz Como, Italien). – Zürich: Eidgenössische technische Hochschule Zürich 199.

Piana, F., Fiorasco, G., Irace, A., Mosca, P., d'Atri, A., Barale, L., Falletti, P., Monegato, G., Morelli, M., S. Tallone, S. & Vigna, G.B. (2017): Geological map of Piemonte region (NW Italy). Torino: CNR-IGG, Turin/Arpa Piemonte, Turin/DST – Torino University/DIATI – Polytechnic University of Torino.

Fountain, D.M. (1976): The Ivrea-Verbano and Strona-Ceneri Zones, Northern Italy: A cross-section of the continental crust — New evidence from seismic velocities of rock samples. – Tectonophysics *33*, 145–165.

Fredmann, N. (2007): Quantification of fault zone features in siliciclastic rocks: implications for 3D fault modeling and fluid flow. – Ph.D. thesis, Univ. Bergen.

Gamisch, T. & Girmscheid, G. (2007): Versinterungsprobleme in Bauwerksentwässerungen.

Gautschi, M., Weber, R., Weber, R., Heierli, W., Peter, J. & Schurter, M. (1996): Versinterung von Entwässerungsleitungen, Ursachen und Gegenmassnahmen. – Forschungsauftrag 16/90 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS).

Gebauer, D. (1993): The Pre-Alpine evolution of the continental crust of the Central Alps – an overview. In: Raumer, J.F. von, and Neubauer, F. (eds.): "Pre-Mesozoic Geology in the Alps", Springer Verlag, 93–117.

Giobbi Origioni, E., Testa, B., Carimati, R. (1982): Contributo alla ricostruzione stratigrafica della «Serie dei Laghi»: litofacies principali della «Strona-Ceneri» a NE del Lago Maggiore (Alpi Meridionali – Italia). – Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol. *38* (3) 1337– 1350.

Girmscheid, G., Gamisch, T., Klein, T. & Meinlschmidt, A. (2003): Versinterung von Tunneldrainagen – Mechanismen der Versinterungsentstehung. – Der Bauingenieur, *35*/7 *78*, 292–300.

Hammah, R.E. & Curran, J.H. (1998): Fuzzy Cluster Algorithm for the Automatic Identification of Join Sets. – Rock Mech. Min. Sci. *35*/7, 809–905.

Handy, M.R. (1987): The structure, age and kinematics of the Pogallo fault zone; Southern Alps, northwestern Italy. – Eclogae geol. Helv. *80*, 593–632.

Handy, M.R., Franz, L., Heller, F., Janott, B. & Zurbriggen, R. (1999): Multistage accretion and exhumation of the continental crust (Ivrea crustal section, Italy and Switzerland). – Tectonics *18*/6, 1154–1177.

Hurford, A. (1986): Cooling and uplift pattern in the Lepontine Alps, South Central Switzerland and an age of vertical movement on insubric fault line. – Contributions to Mineralogy and Petrology *92*, 413–427.

Köppel, V. & Grünenfelder, M. (1971): A study of inherited and newly formed zircons from paragneisses and granitised sediments of the Strona-Ceneri-Zone (Southern Alps). – Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. *51*, 2/3, 385–409.

Hodges, K.V. & Fountain, D.M. (1984): Pogallo line, South Alps, northern Italy: An intermediate crustal level, low-angle normal fault? – Geology *12*, 151–155.

Lauffer, H. (1958): Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau. – Geol. Bauwesen *24*/1, 46–51.

Malaguti, A., Morandi, S. & Stocker, D. (2003): Anisotropic geomechanical behaviour of Tunnelling Val Colla Line, Ceneri base Tunnel, Switzerland. – World Tunnel Congress, Geneva.

Marzocchi, R. (2012): Integrated application of geochemical and geophysical methods for hydrogeological impact assessment for tunneling in fractured rock. – PhD Thesis, University of Lausanne, 224 pp.

Metzger, F. & Anagnostou, G. (2015): On the non-uniformity of squeezing deformations in the Ceneri Base Tunnel. – EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium. Schubert (ed.) © ÖGG.

Neubauer, F. & Frisch, W. (1993): The Austroalpine metamorphic basement east of the Tauern window. – In: Raumer, J.F. von & Neubauer, F., (eds.): Pre-Mesozoic Geology in the Alps. Springer, Berlin, 515–536.

Oppizzi, P. (1995): Tettonica e metamorfismo nella parte centrale del settore W dello zoccolo pre-varisico delle Alpi meridionali. – Tesi di dottorato, Facoltà di Scienze della Terra dell'Università di Losanna.

Pinarelli, L., Bergomi, M.A. & Giobbi, E. (2008): Pre-metamorphic melt infiltration in metasediments: geochemical, isotopic (Sr, Nd, and Pb), and field evidence from Serie dei Laghi (Southern Alps, Italy). – Mineralogy and Petrology *93*, 213–242.

Pozzorini, D. (2017): Ceneri-Basistunnel – Umgang mit prognostizierten und unerwarteten Störungen: Fallbeispiel von schleifend zur Tunnelachse streichenden Störungszonen bei komplexen Baugrundverhältnissen. – Swiss Bull. angew. Geol. *22/2*, 21–31.

Price, N.J. & Cosgrove, J.W. (1990): Analysis of geological structures. – Cambridge University Press.

Quick, J.E., Sinigoi, S. & Snoke, W. (2003): Geologic map of the southern Ivrea-Verbano zone, northwestern Italy. s.l.: U.S. Geological Survey.

Raumer, J.F. von & Neubauer, F. (1993): The Pre-Mesozoic geology in the Alps. s.l.: Springer, 671.

— (1994): The Paleozoic evolution of the Alps. – Schweizerische Mineralogisch Petrographische Mitteilungen *74*, 459–467.

Reinhard, M. (1953): Über das Grundgebirge des Sottoceneri im südlichen Tessin. – Eclogae geol. Helv. *46*, 214–222.

Reinhard, M., Bächlin, R., Graeter, P., Lehner, P. & Spicher, A. (1962): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000, Blatt 1333 Tesserete.

Romer, R.L. & Franz, L., 1998: Ordovician Barrow-type metamorphism in the Strona-Ceneri Zone (northern Italy) dated by U-Pb on staurolite. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *78*, 383–395.

Rutter, E., Brodie, K., James, T. & Blundell, D. (2003): Seismic Modeling of lower and midcrustal structure as exemplified by the Massiccio Dei Laghi (Ivrea-Verbano zone and Serie Dei Laghi) crustal section, northwestern Italy. In: Heterogeneity in the Crust and Upper Mantle: Nature, Scaling and Seismic Properties, Nature, Scaling and Seismic Properties, 67–97.

Schmid, S.M. (1993): Ivrea Zone and Adjacent Southern Alpine Basement. – In: Raumer, J.F. von and Neubauer, F., (eds.): Pre-Mesozoic Geology in the Alps: Berlin Heidelberg Springer-Verlag, 567–583.

Schmid, S.M., Zingg, A. & Handy, M. (1987): The kinematics of movements along the Insubric line and the emplacement of the Ivrea zone. – Tectonophysics *135*, 47–66.

Schumacher, M.E. (1990): Alpine basement thrusts in the eastern Seengebirge, Southern Alps (Italy/Switzerland). – Eclogae geol. Helv. *83*.

Schumacher, M.E. (1997): Geological interpretation of the seismic profiles through the southern Alps (lines S1-S7 and C3-south), in: Pfiffner, O.A., Lehner, P., Heitzmann, P. and Mueller S., (eds.): Results of NRP 20: Deep structure of the Swiss Alps: Basel, Switzerland. s.l.: Birkhäuser Verlag, 380.

Siegesmund, S., Layer, P., Dunkl, I., Vollbrecht, A., Steenken, A., Wemmer, K. & Ahrendt, H. (2008): Exhumation and deformation history of the lower crustal section of the Valstrona di Omegna in the Ivrea Zone. – Geological Society *298*, 45–68.

Surace, I., Torri, R., Murgese, D. & Dematteis, A. (2011): Gestione dei materiali di scavo: valutazione della presenza di amianto in roccia e suoli tramite microscopia ottica a luce polarizzata. – Associazione Georisorce e Ambiente (GEAM) *2*, 27–46.

Thalmann, C. (1996): Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Ausbruchmateriel aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen. Zürich: Eidgenössischen Technische Hochschule Zürich.

Thuro, K., Singer, J., Käsling, H. & Bauer, M. (2006): Soil abrasivity assessment using the LCPC testing device. – Felsbau *24*, 37–45.

Vai, G.B., Boriani, A., Rivalenti, G., Sassi, F.P. (1984): Catena Ercinica e Paleozoico nelle Alpi Meridionali – in: Volume giubilare i centenario, Società geologica Italiana 133–154.

Wegmüller, M.C. (2001): Einflüsse des Bergwassers auf Tiefbau/Tunnelbau. s.l.: Stäubli.

Wolff, R., Kiesselbach, G., Dunkl, I., Siegesmund, S. & von Eynatten, H. (2012): Thermochronology of the Ivrea-Verbano Zone of the Western Alps using zircon fission track, (U-Th)/He and K/Ar dating. – Tectonophysics *579*, 104–117.

Zingg, A., Handy, M.R., Hunziker, J.C. & Schmid, S.M. (1990): Teotonometamorphic history of the Ivrea Zone and its relationship to the crustal evolution of the Southern Alps. – Tectonophysics *182*, 169–192.

Zurbriggen, R. (2015): Ordovician orogeny in the Alps – a reappraisal. – International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau) *104*, 335–350.

— (2017): The Cenerian orogeny (early Paleozoic) from the perspective of the Alpine region. – International Journal of Earth Sciences *106*, 517–529.

Zurbriggen, R., Leander, F. & Handy, M.R. (1997): Pre-Variscan deformation, metamorphism and magmatism in the Strona-Ceneri Zone (southern Alps of northern ltaly and southern Switzerland *77*, 361–380.

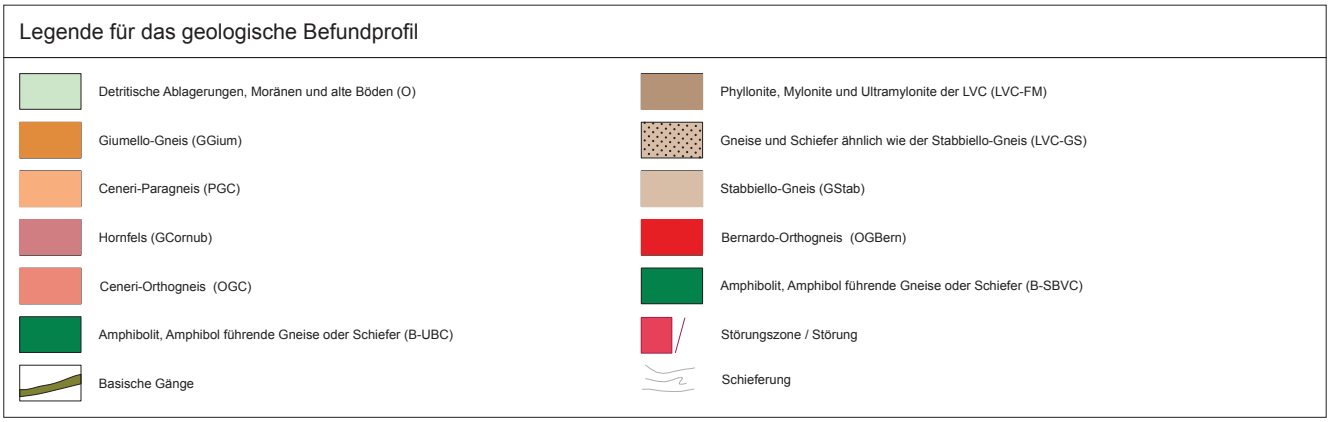
EKAS Richtlinie Nr. 6503 (2008) Schweizerische Eidgenossenschaft, Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit EKAS
SIA 118/198 (2007) Allgemeine Bedingungen für Untertagbau – Allgemeine Vertragsbedingungen zur Norm SIA 198 Untertagbau – Ausführung
SIA 198 (2004) Untertagbau – Ausführung
SIA 199 (2015) Erfassen des Gebirges im Untertagbau
SIA 267 (2013) Geotechnik
SN-67008-A (1997) Identifikation der Lockergesteine Labormethode mit Klassifikation nach USCS
SN 640 588
N 640 585 b
VDI 3492 Verein Deutscher Ingenieure: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messen von Immissionen – Messen anorganischer faserförmiger Partikel – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren.
VSS SN 640 312a (1992) Erschütterungseinwirkung auf Bauwerke
1903.D (2012) SuvaPro – Grenzwerte am Arbeitsplatz

Projektinterne Dokumente

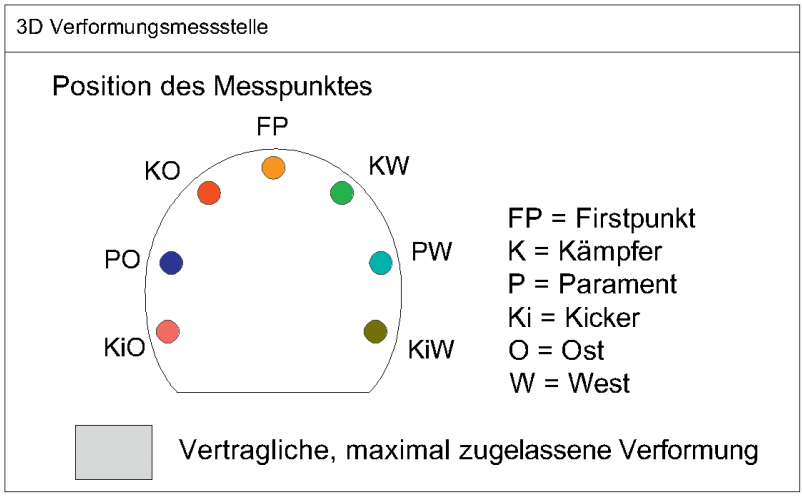
Referenz	Beschreibung	Dokument Nr.
A 1	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Linee guida per l'adozione di un profilo tipo di sostegno SPV 1–10, QS 1–3 – 15.02.2013.	ITC.PES.852.0309B
A 2	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Tracciato GbC/Procedura di confronto, Relazione descrittiva e documentazione grafica, 03.12.1999.	9907.01
A 3	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Lotto 821, Rapporto geologico conclusivo Trincea Vezia, 15.09.2011.	–
A 4	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Lotto 851, Rapporto geologico conclusivo FIS, 19.12.2011.	–
A 5	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Lotto 851, Rapporto geologico conclusivo CAOP, 19.12.2011.	–
A 6	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Lotto 852, Rapporto geologico conclusivo parte 1 Avanzamento Gneiss Giumello e Linea Val-Colla, 28.03.2017.	–
A 7	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Lotto 852, Rapporto geologico conclusivo parte 2 Avanzamento zona Val-Colla, 21.12.2017.	–
A 8	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Lotto 852, Rapporto geologico conclusivo parte 3 Zona Ceneri Nord e Intermedio, 30.11.2017.	–
A 9	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Lotto 853, Rapporto geologico conclusivo Interventi zona Portale Nord (Vigana), 25.11.2012.	–
A 10	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Lotto 854, Rapporto geologico conclusivo Controavanzamento Vezia, 30.03.2012.	–
A 11	AlpTransit San Gottardo SA, Galleria di base del Ceneri, Rapporto geologico, geotecnico e idrogeologico – Documentazione finale, 30.11.2018.	ITC.PES.GbC.0091

13. Anhang

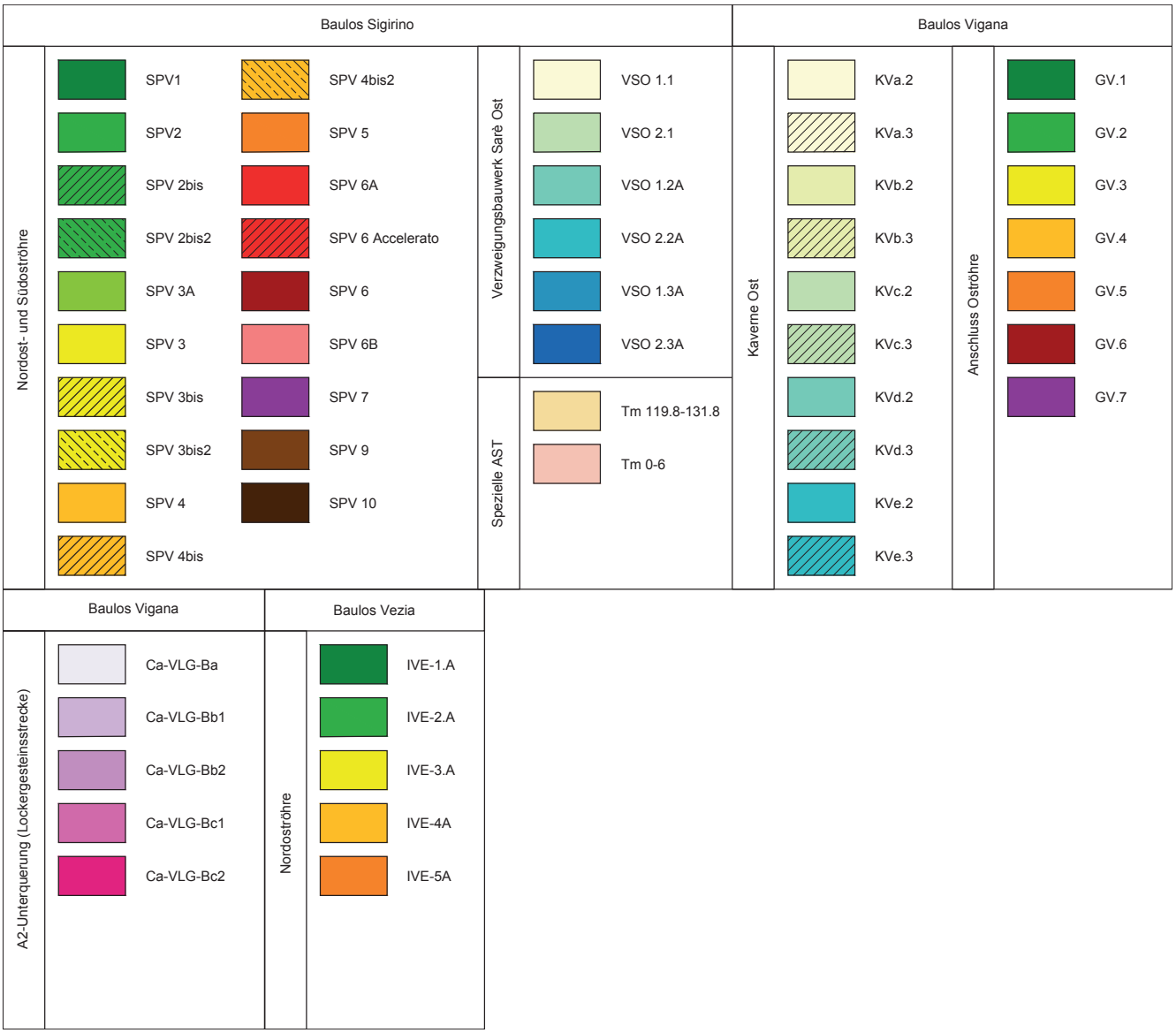
Anhang 13-a: Allgemeine Legende mit den Signaturen für die Beschreibung der Geologie, Hydrogeologie und Geotechnik.



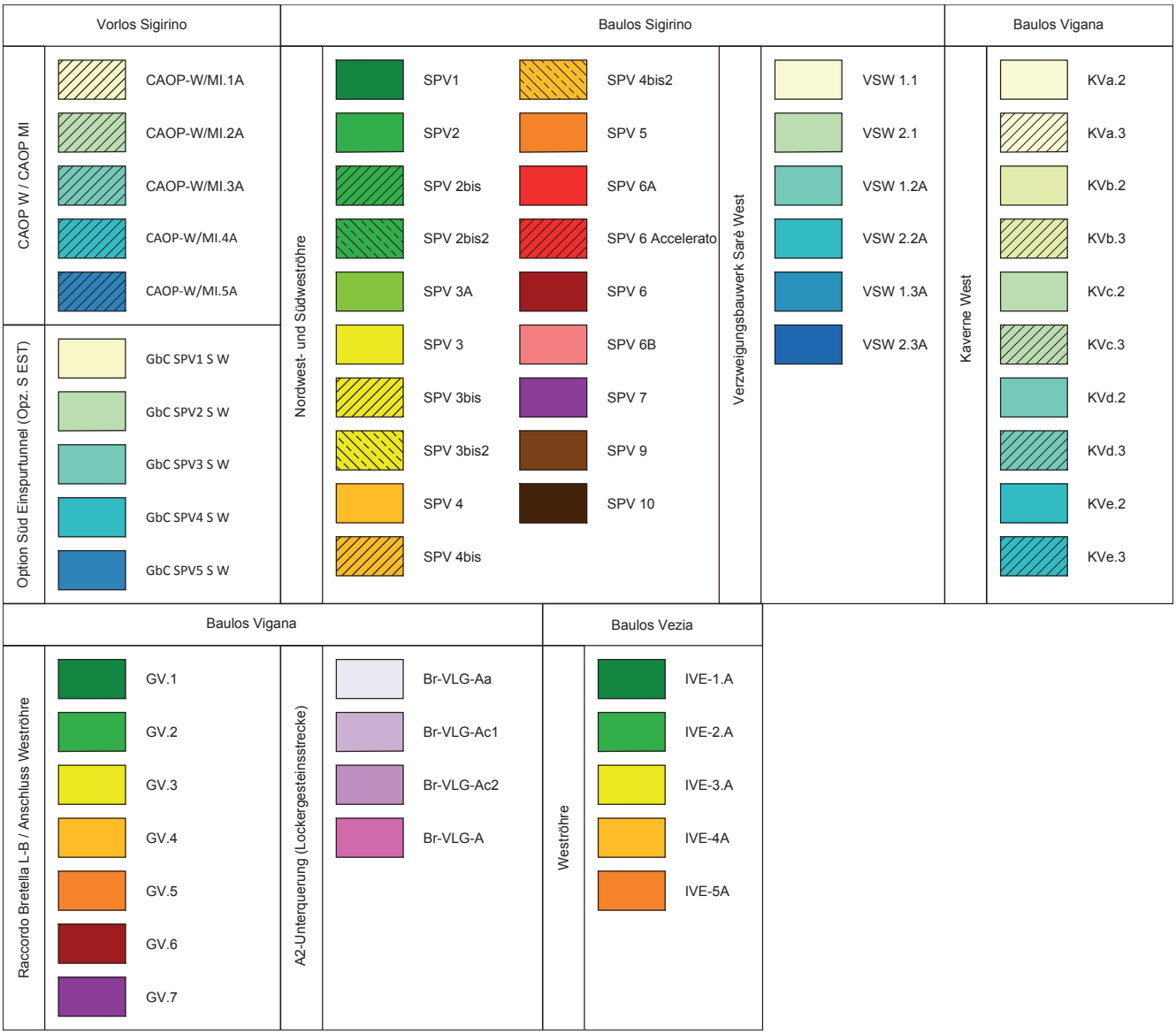
Anhang 13-b: Legende für die Beschreibung der radialen Verformungsmessungen und die Messpunkte.



Anhang 13-c: Legende für die Beschreibung der eingebauten Ausbruchsicherungstypen in der Oströhre.



Anhang 13-d: Legende für die Beschreibung der eingebauten Ausbruchsicherungstypen in der Weströhre.



Anhang 13-e: Zusammenfassung der Orientierungen der Schieferungsfamilien geordnet nach Homogenbereich. Die Daten der Weströhre sind auf die Oströhre projiziert. Die Farben der Schieferungsfamilien erleichtern den Vergleich mit den stereographischen Projektionen.

Schieferungs-familien	133/58	211/09	360/22	105/66	204/44	342/58	000/77	358/60	294/54	308/46	308/46	185/68	093/42	105/30	243/78
Häufigkeit	**19,8 %**	**18,2 %**		**13,8 %**	**12,7 %**	**5,2 %**			**5,0 %**			**3,9 %**	**0,8 %**		**0,3 %**
0B						351/77									
1A						347/70									
1Bbis						348/64									
1Abis		337/14				346/58									
1B		315/05				345/63									
1Cbis		177/16													
1D		184/23													
1Dbis Vigana		203/13													
1Dbis					198/33										
3					187/43										
6A					218/39										
6B					250/41	327/48									
6C		346/03			209/53							176/72			
10A					216/31	319/29									
10B	136/65	327/07			216/44	342/66						184/73			
10C	139/73	253/13			219/45							183/72			
12Abis		159/27			176/64	358/73									
10Cbis	134/34														
11	142/30														
13A	133/42														
14	140/65														
15Bbis	138/66														
15C	145/61														
16A	142/73														
16B	143/75														
17	138/81														
20	125/61														
21bis	114/54														
22	120/53														
24+25bis	117/63														
26A	117/58														
26Bbis				107/57											
27Bis				104/69										105/30	
26Bbis				107/57											
28A				104/63				358/60							
27				104/64											
28A				104/63				358/60							
28B				101/71											
28C				106/69											
30A				103/76				355/45		302/62	317/27				
30B								358/60		308/44					
31							003/78		306/64						247/79
32		191/29										188/68			
33		194/30										193/46			
35-38A	153/60	169/24					356/63		294/65				096/33		
38C							003/77		292/44						
35-38A	153/60	169/24					356/63		294/65				096/33		
38C							003/77		292/44						
39-42		270/06													
43	133/66	167/05										176/61	107/39		
44		327/15													
45A			360/22												

Anhang 13-f: Zusammenfassung der Orientierungen der Schieferungsfamilien im FIS, geordnet nach Homogenbereich.

Hauptschieferungsfamilie	105/66									
HB	FIS 1a	FIS 1b	FIS 2	FIS 3	FIS 4	FIS 5	FIS 6	FIS 7	FIS 10	FIS 11
Familie	100/51	093/63	090/71	084/77	087/73	103/73	110/80	094/71	090/85	091/74

Anhang 13-g: Störungszonenkataster der angetroffenen, bautechnisch relevanten Störungszonen.

		Oströhre					Weströhre				
SZ Nr.	Beschreibung	HB	Km	Länge [m]	Mächtigkeit [m]	Orientierung [360°/90°]	HB	Km	Länge [m]	Mächtigkeit [m]	Orientierung [360°/90°]
	kataklastische SZ mit FG-Linsen	1Bbis	227.620–227.629	9	0,2–3	355/70	1Bbis	327.608–327.613	5	0,2–3	355/70
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ, z.T. intakter Fels		227.643–227.653	10	1–7	345/70		327.647–327.654	7	1–7	345/70
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ, z.T. intakter Fels	1Abis			–		1Abis	327.698–327.705	7	1,5–5	345–015/50–80
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ, z.T. intakter Fels	1B	227.698–227.708	10	1,5–5	345–015/50–80	1B			–	
	kataklastische-kakiritische SZ, z.T. intakter Fels		227.723–227.740	17	3–8	015–050/50–70		327.698–327.723	25	3–8	015–050/50–70
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ		227.826–227.835	9	4–5	345/50–70		327.831–327.842	11		
	kataklastische SZ, z.T. intakter Fels		227.885–227.895	10	5–9	350–030/70–90		327.866–327.879	13	5–9	350–030/70–90
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ, z.T. intakter Fels		227.994–228.014	20	1–9	175–210/35–80 330/80		328.002–328.029	27	1–9	175–210/35–80 330/80
1C.bis	kakiritische SZ Typ FG, verfächert mit kataklastischen Störungen und z.T. intaktem Fels	1Cbis	228.094–228.173	79	>12	300–000/05–30 135–300/05–25	1Cbis	328.072–328.193	121	>12	300–000/05–30 135–300/05–25
	kataklastische-kakiritische SZ	1Dbis			–		1Dbis	328.285–328.291	6	0,3	020/85
2.1	kataklastische-kakiritische SZ	3	228.641–228.648	7	<1	205/65	3	328.618–328.628	10	<1	215/60
	kataklastische SZ		228.670–228.675	5	0,2	145/50		328.666–328.669	3	0,2	155/30
	kataklastische-kakiritische SZ		228.691–228.699	8	0,2	045/70		328.640–328.660	20	0,2	060/70
	verfächerte kataklastische SZ mit Störungen <m		228.699–228.709	10	0,2	205/70		328.679–328.689	10	<1	205/60
	kataklastische-kakiritische SZ		228.743–228.748	5	1,3	340/60		328.748–328.751	3	0.3	340/70
	kataklastische-kakiritische SZ		228.815–228.823	8	0,2	210/85		328.798–328.804	6	1	205/80
	verfächerte kataklastische SZ mit Störungen <m				–			328.835–328.849	14	<0,4	205/45–80 e 240/75
	kataklastische SZ		228.887–228.891	4	1	200/40		328.874–328.878	4	1	195/50
	kataklastische SZ		228.971–228.984	13	0,2	220/75		328.943–328.958	15	<0,2	230/80
	kataklastische-kakiritische SZ mit verfächerten Harnisch-flächen				–			329.151–329.158	7	<1	190/50–80
6A.2bis	kataklastische-kakiritische SZ		229.393–229.398	5	0,2	030/70		329.366–329.374	8	<1	030/70
	kataklastische SZ <0,2 m mit verfächerten Harnisch-flächen				–			329.561–329.598	37	3	110/70
6A.1bis	kataklastische-kakiritische SZ		229.621–229.623	2	0,2	355/80		329.623–329.625	2	1	355/80
	kataklastische-kakiritische SZ	6A	229.770–229.778	8	1,5	220/40	6A	329.739–329.751	12	<1	230/40
	kataklastische SZ		229.881–229.888	7	1	215/45		329.848–329.857	9	0,05	225/60
	kataklastische SZ		229.894–229.900	6	0,2	330/60		329.909–329.915	6	0,05	330/60
	kataklastische SZ		230.318–230.321	3	0,2	355/70		330.313–330.318	5	<1	230/60

		Oströhre					Weströhre				
SZ Nr.	**Beschreibung**	**HB**	**Km**	**Länge [m]**	**Mächtigkeit [m]**	**Orientierung [360°/90°]**	**HB**	**Km**	**Länge [m]**	**Mächtigkeit [m]**	**Orientierung [360°/90°]**
	kataklastische SZ	6A	230.332–230.343	11	1	220/70	6A			–	
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ		230.421–230.434	13	1	210/60, 240/75				–	
	kataklastische-kakiritische SZ		230.439–230.451	12	1–2	220/65		330.401–330.405	4	3	230/60
	verfächerte kataklastische SZ mit Harnischflächen		230.488–230.511	23	0,7	240/40		330.401–330.421	20	<1	250/40
	kataklastische SZ				–			330.435–330.444	9	3	200/45
	kataklastische SZ	6B	230.623–230.625	2	2	000/45	6B			–	
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ	6C	230.695–230.705	10	5	175/80, 015/20	6C	330.672–330.683	11	1,5	205/85, 015/20
	kataklastische-kakiritische SZ		230.712–230.721	9	4	335/85				–	
	Serie mit verfächerten kataklastischen-kakiritischen SZ 1–4 m		230.721–230.740	19	1	175/75		330.715–330.719	4	>1	185/85
	Serie mit verfächerten kataklastischen-kakiritischen SZ 1–4 m		230.740–230.766	26	<1	160–180/40–70		330.719–330.743	24	<10	150–180/75
	kataklastische-kakiritische SZ	10A	230.771–230.778	7	<1	165/65	10A				
	kataklastische-kakiritische SZ	10B	230.818–230.824	6	1	220/65	10B	330.796–330.800	4	3	210/70
	kataklastische SZ		230.821–230.868	47	<1	120/30, 230/35		330.842–330.810	32	5	000/020, 240/30
	kataklastische SZ		230.863–230.868	5	<1	220/40		330.811–330.821	10	5	220/35
10B.1	Serie mit verfächerten kataklastischen-kakiritischen SZ 1–3 m		230.879–230.915	36	3	190–230/75, 250– 270/50–80, 335–350/60–75		330.845–330.895	50	15	170–200/50–85, 250/70, 315–340/50–75
10B.2bis	Serie mit verfächerten kataklastischen-kakiritischen SZ 1–3 m		230.915–230.946	31	3	350–360/75, 320–330/75		330.895–330.923	28	5	300–330/45–75, 350/50–85
	Serie mit verfächerten kataklastischen-kakiritischen SZ		230.946–230.973	27	12	185–205/70–85, 230/35–50		330.923–330.945	22	3	180/65–85, 085/85
	kataklastische-kakiritische SZ, in der Oströhre nur verfächerte Harnischflächen	10C	231.109–231.115	6	0,05	035–215/65	10C	331.071–331.080	9	0,2	060/65
	kataklastische SZ und verfächerte Harnischflächen		231.155–231.163	8	1	010/80				–	
	kataklastische SZ		231.173–231.176	3	0,05	215/70		331.957–331.956	1	0,5	210/70
	kataklastische SZ		231.209–231.208	1	0,05	010/35		331.207–331.203	4	0,5	350/30
10C.1	kataklastische SZ		231.257–231.260	3	0,2	215/60		331.226–331.232	6	0,8	210/55
	Oströhre: Serie kataklastische SZ mit Harnischflächen Weströhre: Kataklastische-kakiritische SZ <1,5 m		231.273–231.298	25	<4	185–225/50–75		331.236–331.284	48	<1.5	195–225/75, 160/50–80, 015/70
	Serie mit kataklastischen SZ und Harnischflächen		231.321–231.366	45	8	185–005/05–75, 220/50		331.336–331.296	40	1–2	185–220/20–75
	kataklastische SZ		231.381–231.383	2	<0,2	225/70		331.343–331.350	7	0,05	230/65
	verfächerte, kataklastische-kakiritische SZ <1,5 m mit Harnischflächen				–			331.368–331.383	15	10	170–350/40–80
	verfächerte, kataklastische SZ <0,5 m mit Harnisch-flächen				–			331.422–331.404	18	0,5	040/30 e 160/60
	Serie mit kataklastischen SZ <0,2 m und Harnischflächen		231.401–231.419	18	0,4	175/70					
	Serie mit kataklastischen SZ und Harnischflächen		231.433–231.463	30	<1	180/75		331.423–331.468	45	40	175/80

		Oströhre					Weströhre				
SZ Nr.	Beschreibung	HB	Km	Länge [m]	Mächtigkeit [m]	Orientierung [360°/90°]	HB	Km	Länge [m]	Mächtigkeit [m]	Orientierung [360°/90°]
	Serie mit kataklastischen SZ 1–2 m und Harnischflächen	12Abis	231.523–231.585	62	50	180–205/80, 045/80	12Abis	331.508–331.568	60	50	175–185/80
	Serie mit kataklastischen SZ 0,2–2 m und Harnischflächen		231.585–231.603	18	18	180–225/70–85					
	kataklastische-kakiritische SZ		231.611–231.606	1	>0,2	010/80		331.572–331.580	4	<1	190/75
12Abis.1	kataklastische-kakiritische SZ			5	3,5	040/70				2,5	035/50
	kataklastische-kakiritische SZ		231.616–231.613	3	3	160/25					
	kataklastische-kakiritische SZ Weströhre nur kataklastisch		231.630–231.635	5	1,5	165/80		331.626–331.630	4	1	170/55
	kataklastische-kakiritische SZ Oströhre nur kataklastisch		231.631–231.638	7	4	190/80		331.630–331.635	5	1,5	180/65
	kataklastische-kakiritische SZ Oströhre nur kataklastisch		231.637–231.640	3	<0,2	180/70		331.634–331.638	4	<1	180/70
	kataklastische-kakiritische SZ Oströhre nur kataklastisch		231.648–231.649	1	<0,2	195/80		331.642–331.647	5	<1	170/80
	kataklastische-kakiritische SZ		231.658–231.660	2	<1	005/40				–	
	verfächerte, kataklastische SZ		231.617–231.632	15	<1	125/70		331.643–331.683	40	8	130/80
	kataklastische SZ	11	231.787–231.795	8	<1	160/40	11	331.788–331.795	7	0,2	170/60
	kataklastische SZ	13A	231.798–231.808	10	0,2	145/30–55	13A	331.817–331.833	16	0,2	145/25
	verfächerte, kataklastische SZ				–			332.385–332.393	8	<1	060/50
	Oströhre: Kakiritische SZ, Weströhre verfächerte kataklastische SZ <0,2 m mit Harnischflächen		232.448–232.473	25	0,2	095/85		332.233–332.269	36	5	100/85
	kataklastische-kakiritische SZ				–			332.628–332.665	37	1–2	130/75
	kataklastische-kakiritische SZ Oströhre nur kataklastisch		232.611–232.633	22	0.2	320/70		332.703–332.714	11	<1	330/75
	kataklastische-kakiritische SZ	14	232.943–233.011	68	5	145/70	14				
	Oströhre: kataklastische SZ, Weströhre Serie kataklastische-kakiritische SZ <4 m mit Harnischflächen		233.018–233.022	4	1	185/80		333.006–333.017	11	10	185/85
	kataklastische SZ		233.016–233.055	39	5	160/85		333.039–333.067	28	1,5	160/60
	kataklastische SZ		233.075–233.085	10	1–2	175/70					
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ, in der Weströhre nur kataklastisch		233.080–233.104	24	2	140/75		333.162–333.203	41	7	135/70
15Bbis.1	Oströhre: Serie mit kataklastischen SZ 5–10 m und Harnischflächen, Weströhre: z.T. kakiritisch	15Bbis	233.098–233.208	110	<20	130/80	15Bbis	333.193–333.333	140	25	140/80
15Bbis.2	Oströhre: kataklastische-kakiritische SZ, Weströhre: Serie mit kataklastischen-kakiritischen SZ <3 m und zahlreichen Harnischflächen		233.223–233.258	35	<2	140/80		333.353–333.445	92	7	135/70
	kataklastische SZ		233.282–233.290	8	<2	160/80				–	
	kataklastische SZ		233.307–233.320	13	2	160/75				–	
15Bbis.3	Serie mit kataklastischen-kakiritischen SZ, in der Weströhre nur kataklastisch		233.323–233.373	50	2	140/75		333.418–333.493	75	5	140/75
	Serie mit kataklastischen-kakiritischen SZ		233.363–233.387	24	1–2	155/75				–	
	kataklastische SZ				–			333.505–333.521	16	1–3	160/80

		Oströhre					Weströhre				
SZ Nr.	Beschreibung	HB	Km	Länge [m]	Mächtigkeit [m]	Orientierung [360°/90°]	HB	Km	Länge [m]	Mächtigkeit [m]	Orientierung [360°/90°]
	kataklastische-kakiritische SZ	15Bbis			–		15Bbis	333.528–333.553	25	3	145/70
15Bbis.4	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ, in der Oströhre nur kataklastisch		233.393–233.503	110	<5	135/70		333.598–333.675	77	8	140/70
	verfächerte kataklastische SZ				–			333.571–333.583	12	0,2	000/85
	kataklastische-kakiritische SZ		233.547–233.575	28	<10	155/80	16A			–	
	Kataklastische-kakiritische SZ	16A	233.595–233.599	4	1–2	195/80				–	
	kataklastische SZ, in der Weströhre kataklastisch-kakiritsch		233.610–233.613	3	0,2	010/75		333.592–333.603	11	1,5	205/80
	kataklastische SZ		233.643–233.648	5	0,2	010/85		333.631–333.634	3	0.2	185/85
	kataklastische SZ		233.777–233.803	26	1	145/70		333.838–333.854	16	0.5	160/70
17bis.0	kakiritische SZ	16B	234.139–234.140	1	0,2	040/50	16B	334.101–334.103	2	1–3	040/40
17.1	Serie mit kataklastischen SZ <3 m	17					17	334.125–334.188	63	8	140/80
17.2bis	Serie mit kataklastischen-kakiritischen SZ <1,5 m, in der Oströhre nur kataklastisch		234.139–234.159	20	<7	150/80		334.203–334.264	61	10	140/80
	kataklastische SZ	20	234.305–234.331	26	<0,2	320/75	20	334.378–334.405	27	1	325/80
17.3bis	kataklastische SZ		234.338–234.367	29	3	315/80		334.418–334.436	18	0,7	325/80
	kataklastische-kakiritische SZ							334.581–334.601	20	0,2	260/70
	kataklastische SZ							334.615–334.660	45	0,4	125/80
	kataklastische SZ		234.538–234.555	17	0,2	145/80					
	kataklastische SZ		234.652–234.669	17	<1	325/80		334.700–334.723	23	0,2	315/85
	kataklastische-kakiritische SZ, in der Weströhre nur kataklastisch		234.718–234.735	17	<3	145/80		334.775–334.813	38	1,5	130/80
	kataklastische SZ		234.751–234.771	20	0,2	270/60					
	kataklastische SZ		234.803–234.818	15	<2	150/85		334.848–334.870	22	0,3	145/85
	kataklastische SZ		234.914–234.922	8	0,5	160/85		334.931–334.943	12	0,2	155/80
	kataklastische-kakiritische SZ	21bis	235.083–235.100	17	1,5	150/60	21bis	335.173–335.191	18	1,5	140/80
	kataklastische-kakiritische SZ, n der Weströhre nur kataklastisch		235.106–235.123	17	1,2	325/80		335.215–335.226	11	0,2	310/85
	kataklastische-kakiritische SZ, in der Oströhre nur kataklastisch	22	235.171–235.191	20	0,2	270/30	20	335.037–335.079	42	0,3	280/50
	kataklastische-kakiritische SZ		235.243–235.258	15	2–3	315/50	22	335.324–335.343	19	0,2	330/70
	kataklastische-kakiritische SZ, n der Weströhre nur kataklastisch	22+24bis	235.284–235.308	24	3–4	160/85		335.315–335.318	3	0,2	190/85
26A.1	kataklastische-kakiritische SZ	26A	237.444–237.412	32	1–2	125/85	26A	337.016–336.977	39	1–2.5	130/85
26Bbis.1	verfächerte kataklastische SZ <0,2 m	26Bbis	237.333–237.298	35	<0,2	100–125/70–85	26Bbis				
26Bbis.2	kataklastische SZ							336.894–336.887	7	<2	180/80
27bis.1	kataklastische-kakiritische SZ	27bis	237.198–237.183	15	1–4	140/75	27bis	336.867–336.832	34.9	<2	317/70

		Oströhre					Weströhre				
SZ Nr.	Beschreibung	HB	Km	Länge [m]	Mächtigkeit [m]	Orientierung [360°/90°]	HB	Km	Länge [m]	Mächtigkeit [m]	Orientierung [360°/90°]
26Bbis.3	verfächerte kataklastische, z.T. kakiritische SZ <0,3 m	26Bbis-28A	237.165–237.148	17	<1	320/80	26Bbis-28A				
27.1	Oströhre: kataklastische SZ, Weströhre: verfächerte kataklastische, z.T. kakiritische SZ <0,5 m	27	237.139–237.112	27	0,2–1,5	310/70	27	336.785–336.763	22	<0,5	310/80
28A.0	Oströhre: Zerscherter Fels mit zahlreichen Harnischflächen und kataklastischer, z.T. kakiritischer SZ, Weströhre: kataklastischer, z.T. kakiritischer SZ	28A	237.040–236.988	52	2–3	HF:110–130/60–80 SZ:145/80	28A	336.725–336.682	43	18	145/80
28A.0bis	kataklastische SZ		236.916–236.859	57	<5	125/80		336.501–336.456	45	<4	115/80
28A.1	verfächerte kataklastische SZ		236.655–236.583	72	<0,2	300/85		336.143–336.193	50	<0,5	300/70–80
28B.1	kataklastische SZ		236.538–236.513	25	<0,5	300/85		336.353–336.413	60	<1	300/80
28C.2	kataklastische SZ	28C	236.838–236.892	54	1–3	295/80	28C	336.950–336.994	44	1–2,5	300/75
	kataklastische SZ		236.949–236.995	46	0,05–0,2	120/80				–	
	kataklastische SZ		237.075–237.117	42	0,05–0,2	300/60				–	
	kataklastische SZ		237.235–237.302	67	0,05–0,2	300/75				–	
	kataklastische-kakiritische SZ mit zahlreichen Harnischflächen		237.309–237.358	49	6	295/75		337.468–337.501	33	10 m	020/60
30A.1	kataklastische-kakiritische SZ mit zahlreichen Harnischflächen und Scherbändern, z.T. stark verfaltet. Kakirite bis 1 m mächtig	30A	237.364–237.541	177	45	N-Grenze 290/65 S-Grenze 320/70	30A	337.492–337.615	123	42	N-Grenze 295/75 S-Grenze 305/80
	kataklastische SZ	30B	237.563–237.569	6	1	165/85	30B			–	
	verfächerte kataklastische SZ		237.618–237.641	23	<2,5	015–030/20–45		337.626–337.648	22	<1?	340/70
	kataklastische SZ		237.714–237.737	23	<0,2	320/40–50				–	
	kataklastische-kakiritische SZ mit zahlreichen Harnischflächen, in der Weströhre nur kataklastisch		237.964–237.995	31	<1	180/10		337.966–337.980	14	<1	290/10
	kataklastische SZ	31	238.020–238.027	7	<0,2	355/65	31			–	
	kataklastische SZ		238.053–238.058	5	1	180/75				–	
31.1bis	kataklastische-kakiritische SZ		238.154–238.165	11	2	025/45		338.142–338.146	4	2	020/80
31.1bis	kataklastische-kakiritische SZ		238.169–238.173	4	1,5	010/75		338.149–338.161	12	5–6	020/80
	kataklastische SZ		238.316–238.324	8	<0,3	170/60				–	
	kataklastische SZ		238.332–238.349	17	0,8	020/30				–	
	kataklastische SZ				–			338.340–338.353	13	0,5	020/40
	kataklastische SZ		238.442–238.449	7	1	220/70				–	
	kataklastische SZ		238.609–238.626	17	1	300/50				–	
	verfächerte kataklastische SZ	32			–		32	338.737–338.744	7	<1	200/70 e 000/70
	kataklastische SZ				–			338.754–338.761	7	<1	200/65
	kataklastische SZ		238.774–238.778	4	<1	005/70				–	
	kataklastische SZ		238.823–238.826	3	<1	175/80				–	

		Oströhre					Weströhre				
SZ Nr.	Beschreibung	HB	Km	Länge [m]	Mächtigkeit [m]	Orientierung [360°/90°]	HB	Km	Länge [m]	Mächtigkeit [m]	Orientierung [360°/90°]
	kataklastische-kakiritische SZ	32			–		32	338.940–338.946	6	<0,5	335–360/80–85
	kataklastische-kakiritische SZ				–			339.006–339.014	8	<1	350–360/70–85
	kataklastische-kakiritische SZ				–			339.130–339.136	6	<1	195–200/70–85
	kataklastische SZ	32	239.323–239.326	3	<1	195/75	32			–	
	verfächerte kataklastische SZ				–			339.324–339.330	6	<1	005/60–80
	kataklastische SZ	33	239.356–239.362	6	<1	180/60	33			–	
	kataklastische SZ		239.454–239.459	5	<1	350/75				–	
	kataklastische-kakiritische SZ	35-38A	239.506–239.529	23	<1	240/55				–	
	kataklastische SZ		239.529–239.537	8	<1	200/75				–	
	verfächerte kataklastische SZ				–		35-38A	339.545–339.563	18	<1	180–195/85
	kataklastische-kakiritische SZ, in der Oströhre nur kataklastisch		239.566–239.571	5	<1	010/90 e 195/85		339.560–339.564	4	<1	195/85
	kataklastische-kakiritische SZ		239.580–239.583	3	<1	180/80				–	
	kataklastische SZ		239.845–239.847	2	<1	005/85				–	
	verfächerte kataklastische SZ				–			339.855–339.874	19	<1	190/45–85
	kataklastische-kakiritische SZ		239.889–239.900	11	<1	070/80				–	
	kataklastische SZ		239.932–239.936	4	<1	005/85				–	
	kataklastische-kakiritische SZ				–			340.003–340.027	24	2	125/75
	kataklastische-kakiritische SZ		240.083–240.098	15	1	360/25					
	kataklastische SZ				–			340.140–340.149	9	<1	330/75
35–38A.0 bis	kataklastische SZ		240.149–240.151	2	1	010/85				–	
35–38A.0 bis	mylonitische SZ		240.208–240.221	13	2	160/70		340.208–340.220	12	3	180/85
35–38A.0 bis	mylonitische SZ, z.T. kataklastisch-kakiritisch		240.221–240.291	70	60	170–190/70		340.239–340.281	42	40	160–180/75–80
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ				–			340.285–340.321	36	<1	175–190/75–80, 015/80
	kataklastische SZ				–			340.389–340.414	25	<1	155/25
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ				–			340.468–340.551	83	<2	165–190/20–30
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ		240.504–240.520	16	<1	165–170/50–55				–	
	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ				–			340.683–340.849	166	<1	100/70 e 265–280/40–50
38C.1bis	mylonitische SZ, in der Weströhre z.T. kataklastisch u/o kakiritisch		240.705–240.747	42	1	290/65		340.995–341.118	123	<2	285/45 (milonite) e 195/80–005/85 (cat-kak)
38C.3bis	verfächerte kataklastische-kakiritische SZ	38C	241.019–241.036	17	<1	350–360/80		341.041–341.052	11	<2	360–005/85
	mylonitische SZ, z.T. kataklastisch u/o kakiritisch	39-42			–		38C	341.058–341.094	36	<10	025/80–330/80
39-42.1bis	kataklastische SZ		241.095–241.105	10	<1	175–185/70–80				–	
	kataklastische-kakiritische SZ				–		39–42	341.209–341.214	5	<1	170/80
	mylonitische, z.T. kataklastische SZ		241.223–241.231	8	2	020/80 e 207/75 (milonite)				–	
	kataklastische SZ				–			341.235–341.247	12	1	205/60
	kataklastische SZ		241.302–241.339	37	<1	190/70					

		Oströhre					Weströhre				
SZ Nr.	**Beschreibung**	**HB**	**Km**	**Länge [m]**	**Mächtigkeit [m]**	**Orientierung [360°/90°]**	**HB**	**Km**	**Länge [m]**	**Mächtigkeit [m]**	**Orientierung [360°/90°]**
	kataklastische SZ	39-42			–		39–42	341.419–341.427	8	<1,5	010/85 e 310/80
	kataklastische SZ				–			341.458–341.472	14	<1	135/80
	kataklastische-kakiritische SZ		241.52–241.523	3	<1	190/85				–	
	kataklastische SZ				–			341.601–341.605	4	<1	005/75
	kakiritische SZ				–			341.636–341.640	4	3	005/80
	kakiritische SZ		241.710–241.720	10	2	060–070/75–80				–	
	kataklastische SZ				–			341.688–341.698	10	<1	230/60
	kataklastische SZ				–			341.714–341.722	8	<1	230/80
	kataklastische SZ				–			341.729–341.733	4	<0,4	231/80
	kataklastische SZ		241.753–241.783	30	2	170/30				–	
	kataklastische SZ				–			341.819–341.824	5	<1	010/80
	kataklastische SZ				–			341.840–341.846	6	<1	205/70–85
	kataklastische SZ		241.801–241.812	11	<1	195/80 e 015/80				–	
	verfächerte kataklastische SZ				–			341.979–341.982	3	<1	025/80
	verfächerte kataklastische SZ		242.039–242.043	4	<1	200/85		342.038–342.075	37	<1	250–255/20–40
	kataklastische-kakiritische SZ						43	342.149–342.159	10	1	165/70

Anhang 13-h: Zusammenfassung der Orientierungen der angetroffenen Hauptstörungszonenfamilien, geordnet nach Homogenbereich. Die Daten der Weströhre sind auf die Oströhre projiziert. Die Farben der Schieferungsfamilien erleichtern den Vergleich mit den stereographischen Projektionen.

Hauptfamilien	127/81, 294/84	141/76, 272/76	177/84	193/83	330/73	348/65	132/10	003/11	022/37	232/76	248/67	144/53	017/66	302/50	102-111/44-56, 065-077/63-69	283/44	248/67
0B						345/78				220/80	258/75				075/55		
1A						348/71				228/75							
1Bbis				211/78	315/70	348/65											
1Abis			172/72			349/68		329/12	046/53				012/63				
1B				191/80		348/66	202/03								073/43		
1Cbis			160/80				213/10	335/14		235/71							
1D		265/85				343/55	226/17			223/77					060/79		
1Dbis Vigana			346/89				212/09			225/70			027/81				
1Dbis				189/82						241/81		126/36		315/49			203/38
3					331/65					233/71		154/39					204/40
6A	149/79	260/73		200/80	334/62												214/52
6B		266/69		197/86		350/68			351/34								210/62
6C	297/74			189/66		345/67			357/23								
10A	136/65	258/73		198/76					027/41								210/59
10B				200/73	333/67												235/41
10C	100/73			187/90		354/62			346/23								227/61
12Abis	144/77			201/84					005/60	052/80							
10Cbis	139/65								349/46	228/70		122/29					
11	100/80								007/33			146/42					
13A	097/82			012/78	329/67				034/40					284/44			
14	137/73			192/75					046/60					316/43			
15Bbis	127/81								058/18								
15C	129/87			001/89					058/42								
16A	315/85								051/48			125/30		319/21			
16B	137/74				329/78				031/37	225/73				296/39			
17	144/77											128/33					
20	127/88								028/50								
21bis	115/83				333/77					233/82		115/42		285/23			
22	115/89				316/56									292/40			230/59
24+25bis	297/81																
26A	294/89											116/36					
26Bbis	289/90	141/76			320/77								018/53				
27Bis	313/74, 101/80	275/75															
26Bbis	289/90	141/76			320/77								018/53				
28A	108/82			353/75											108/44		
27	301/79								032/47						102/48		
28A	108/82			353/75											108/44		
28B	288/83							025/20					026/73		065/69		
28C	288/76							014/15					028/56		100/46		
30A	296/76						337/08						015/67		290/44		
30B	298/78												008/72		087/51		
31	297/75		009/86				099/13		025/37						080/74		
32	299/90		174/75				117/08				252/75				080/74		
33	123/75		012/71				197/22				248/69				068/73	288/48	
35-38A	089/77		187/81				130/09		016/36		245/59				112/57	285/36	
38C	124/67		185/71				087/32								076/67	287/46	
35-38A	089/77		187/81				130/09		016/36		245/59				112/57	285/36	
38C	124/67		185/71				087/32								076/67	287/46	
39-42	098/79		360/90				230/03				231/61					274/48	
43	278/72		152/78				172/33		348/38								
44	295/60		338/78				263/16										
45A							132/10					144/53	017/66				

Anhang 13-i: Zusammenfassung der Orientierungen der angetroffenen Hauptstörungszonenfamilien im FIS. Die obere Reihe zeigt die zu den Störungszonenfamilien entsprechenden Hauptstörungszonenfamilien der Einspurtunnel.

		Störungszonenfamilien								
HB	**Tm [m]**	**342/58**	**303/55**			**124/69**	**091/69**			**309/11**
im Einspurtunnel		348/65	302/50			127/81	077/62			003/11
FIS 1a	0–40									090/15
FIS 1b	40–1215		334/72				092/50			
FIS 2	1215–1510		314/54		176/86		091/69			350/20
FIS 3	1510–1665	340/48				113/85	088/76		019/48	
FIS 4	1665–1760	345/74	313/71, 314/44				099/68			
FIS 5	1760–1805			235/60		130/70				280/20
FIS 6	1805–1815									
FIS 7	1815–2085		327/69 285/75			118/69				
FIS 8	2085–2135	345/53	320/69				080/45	039/83		
FIS 9	2135–2195		299/59				093/66		019/48	039/06
FIS 10	2195–2220							050/70		
FIS 11	2220–2407		294/59	266/70			090/54			

Anhang 13-j: Zusammenfassung der Orientierungen der angetroffenen Kluftscharen, geordnet nach Homogenbereich. Die Daten der Weströhre sind auf die Oströhre projiziert. Die Farben der Schieferungsfamilien erleichtern den Vergleich mit den stereographischen Projektionen.

Hauptfamilie	**087/77**	**090/27**	**340/62**	**312/18**	**002/10**	**202/63**	**164/67**	**298/69**	**026/72**	**127/74**	**106/72**	**120/34**	**266/58**	**222/68**
0B			347/78			129/69							220/66	
1A	082/76		345/72										248/79	
1Bbis	075/71		346/67					319/70					249/74	
1Abis	068/70		346/66										256/73	
1B	074/63		342/68						033/68				246/67	
1Cbis	071/68		340/65			155/80			035/67				245/64	
1D	069-65		342/60										243/69	
1DbisL853	070-54		342/70			165/53			030/70				245/54	
1Dbis	251/90		331/62			193/32								
3	074/88		336/61			188/45						111/34		
6A	089/81		340/62			224/41								
6B	098/56		329/45	329/45		258/59		329/45	009/89	144/79		098/56	258/59	
6C	106/70			004/18		204/63		282/63		106/70			282/63	
10A	273/87		337/59			226/33		273/87		133/56		133/56	273/87	
10B	085/63		332/58	196/09		167/66		284/67		167/66		196/09	284/67	
10C	095/67		004/64	325/13		194/69		290/68	004/64				290/68	
12Abis			310/64	128/09				310/64	029/62	121/68		128/09		
10Cbis	111/56		358/46	358/46		205/74		281/74	205/74	111/56		111/56	281/74	
11	103/54			303/52		216/65		303/52				103/54		
13A	097/77		357/62	297/39		213/75		297/39				129/39		
14			319/62	329/11		205/88		319/62	205/88	138/62				
15Bbis				034/07		213/69		308/59	024/67					

Hauptfamilie	087/77	090/27	340/62	312/18	002/10	202/63	164/67	298/69	026/72	127/74	106/72	120/34	266/58	222/68
15C	107/67			049/28				312/63	044/74					
16A				322/10		205/79		289/57	036/67					
16B	266/65		325/85	314/13				266/65	027/71	325/85			266/65	
17			027/52							139/58		139/58		
20			326/73	283/54		210/73		283/54	013/69	123/68				
21bis	115/64		003/78	260/34		003/78		287/72	003/78	115/64		115/64		
22	054/62		340/58	284/35					054/62	115/54		115/54		
24+25bis	112/78		002/68	257/08					002/68	112/78				
26A														
26Bbis				271/37							111/73		290/71	
27Bis				280/42							106/58		288/77	
26Bbis				290/25							103/76	105/25		
28A				284/39	004/10				014/49		103/72		289/74	
27				280/23							106/71	115/40	288/75	
28B				281/24	013/14				020/61		106/68		283/67	
28C				295/22					017/64		104/72		287/73	
30A				281/27					030/47			102/32	285/65	
30B				307/38	293/8						112/79	102/26	291/71	
31		108/22		286/23			175/67		017/74				287/75	
32		051/13					141/73		012/78		096/67		286/68	227/78
33		090/51							008/64				281/83	
35-38A		093/28		287/29			166/55		009/66		100/67		281/70	223/66
38C		105/30							009/67		111/70		289/61	212/62
39-42		081/14					163/65		010/66		101/65		284/65	
43							164/65		342/64		110/70		301/75	243/67
44		133/29					158/66		347/66					
45A							155/60	305/70	015/70					190/70

Anhang 13-k: Zusammenfassung der Orientierungen der angetroffenen Kluftscharen im FIS.

		Kluftscharen								
HB	**Tm [m]**	**350/68**	274/64	166/80	**094/70**	180/47	090/32	052/64	009/47	**301/12**
FIS 1a	0–40			170/83	088/85	175/31	085/20			
FIS 1b	40–1215	354/74, 322/73	268/75		092/63					359/17, 259/17
FIS 2	1215–1510	353/73, 323/70		163/75	087/69				025/50	260/26
FIS 3	1510–1665		274/67	172/87	088/75					347/21, 276/14
FIS 4	1665–1760	347/69, 014/70	283/55		087/67			050/59		286/14
FIS 5	1760–1805		278/67		097/76		086/38			293/12
FIS 6	1805–1815	350/68			108/59					
FIS 7	1815–2085	333/70, 012/66		167/66	101/70		102/31			317/13
FIS 8	2085–2135		300/65	150/69	105/69	149/29		034/49		285/24
FIS 9	2135–2195		260/53		094/73	175/49		043/64		
FIS 10	2195–2220				066/69	188/48			001/44	006/13
FIS 11	2220–2407		265/70		087/71		084/27		006/52	

Anhang 13-l: Einteilung der Homogenbereiche der Prognose.

HB	Bezeichnung	CBT Oströhre				CBT Weströhre				Gebirgsüberlagerung	
		von [km]	bis [km]	Länge [m]	Azimut [°]	von [km]	bis [km]	Länge [m]	Azimut [°]	min [m]	max [m]
0A	Attraversamento A2 materiali sciolti + roccia	227.518	227.554	36	169	327.518	327.554	36	169	3	12
0B	Attraversamento A2 paragneiss Ceneri	227.554	227.575	21	169	327.554	327.575	21	169	12	20
1A	Galleria Raccordo Vigana ortogneiss Ceneri	227.575	227.770	195	169	327.575	327.770	195	169	20	90
1B	Galleria Raccordo Vigana paragneiss Ceneri 1	227.770	228.075	305	169	327.770	328.015	245	169-170	90	160
1C	SZ Sasso km 228.100	228.075	228.130	55	169	328.015	328.065	50	170	140	190
1D	Galleria Raccordo Vigana paragneiss Ceneri 2	228.130	228.520	390	169-170	328.065	328.490	425	170-172	160	320
2	SZ Val Pagana km 228.530	228.520	228.545	25	170	328.490	328.515	25	172	320	340
3	Paragneiss Ceneri 1	228.545	229.210	665	170-178	328.515	329.200	685	172-178	340	750
5	Gneiss misti 1	229.210	229.370	160	178	329.200	329.370	170	178	740	800
6A	Paragneiss Ceneri 2	229.370	230.620	1.250	178-191	329.370	330.600	1.230	178-191	490	820
6B	Gneiss misti 2	230.620	230.735	115	191-192	330.600	330.700	100	191	470	500
7	SZ Pianturino-Albarina km 230.750	230.735	230.770	35	192	330.700	330.735	35	191	470	500
10A	Gneiss misti 3	230.770	230.815	45	192	330.735	330.775	40	191	480	510
10B	SZ Pianascio km 230.860	230.815	230.920	105	192	330.775	330.875	100	191	480	530
10C	Gneiss misti 4	230.920	231.720	800	192-201	330.875	331.710	835	191-201	520	600
11	Gneiss cornubianitici 1	231.720	231.775	55	201	331.710	331.745	35	201	520	540
12A	SZ Val Mara km 231.790	231.775	231.805	30	201	331.745	331.775	30	201	510	530
13A	Ortogneiss Ceneri 1	231.805	232.270	465	201-205	331.775	332.350	575	201-207	510	600
13B	SZ km 232.290	232.270	232.315	45	205	332.350	332.390	40	207	600	610
13C	Ortogneiss Ceneri 2	232.315	233.050	735	205-213	332.390	333.170	780	207–212	610	690
14	Gneiss misti 5	233.050	233.200	150	213	333.170	333.325	155	212–214	670	720
15A	Gneiss cornubianitici 2	233.200	233.220	20	213	333.325	333.340	15	214	720	720
15B	SZ km 233.270	233.220	233.325	105	213	333.340	333.450	110	214	720	730
15C	Gneiss cornubianitici 3	233.325	233.350	25	213	333.450	333.490	40	214–213	730	730
16A	Gneiss misti 6	233.350	233.680	330	213–212	333.490	333.795	305	213–212	730	780
16B	Ortogneiss Ceneri 3	233.680	234.155	475	212–209	333.795	334.270	475	212–208	620	780
17	SZ km 234.190	234.155	234.225	70	209	334.270	334.320	50	208	620	640
20	Anfiboliti	234.225	234.760	535	209–204	334.320	334.830	510	208–203	550	620
21	Gneiss misti 7	234.760	234.980	220	204–202	334.830	335.050	220	203–201	540	570
22	Ortogneiss Ceneri 4	234.980	235.080	100	202–200	335.050	335.150	100	201–199	550	580
24+25	Gneiss misti 8	235.080	235.525	445	200–195	335.150	335.605	455	199–195	560	620
26A	SZ km 235.540	235.525	235.560	35	195	335.605	335.640	35	195	630	630
26B	Contatto gneiss Giumello–gneiss misti	235.560	235.600	40	195	335.640	335.670	30	195	630	630
27	SZ km 235.620	235.600	235.645	45	195	335.670	335.715	45	195	630	630
28A	Gneiss Giumello fino a CAOP	235.645	236.068	423	195–194	335.715	336.056	341	195–194	630	660
28B	CAOP Gneiss Giumello	236.068	236.465	397	194	336.056	336.454	398	194	630	680
28C	Gneiss Giumello CAOP fino a Val-Colla	236.465	237.550	1.085	194–192	336.454	337.590	1.136	194–192	390	690
30	Attraversamento Linea Val-Colla	237.550	238.170	620	192–190	337.590	338.180	590	192–190	190	390
31	Contatto Linea Val-Colla–Gneiss Stabbiello	238.170	238.600	430	190	338.180	338.590	410	190	170	210
32	Gneiss Stabbiello 2	238.600	239.350	750	190	338.590	339.320	730	190	130	170
33	Ortogneiss Bernardo 1	239.350	239.440	90	190	339.320	339.425	105	190	130	140
34	Gneiss Stabbiello 3	239.440	239.750	310	190	339.425	339.740	315	190	130	140

HB	Bezeichnung	CBT Oströhre				CBT Weströhre				Gebirgsüberlagerung	
		von [km]	bis [km]	Länge [m]	Azimut [°]	von [km]	bis [km]	Länge [m]	Azimut [°]	min [m]	max [m]
35-38A	Gneiss Stabbiello 4	239.750	240.550	800	190–187	339.740	340.560	820	190–194	120	140
38C	Ortogneiss Bernardo 2	240.550	241.110	560	187–185	340.560	341.160	600	194–193	120	140
39-42	Gneiss Stabbiello 5	241.110	242.060	950	185–223	341.160	342.100	940	193–220	50	120
43	Attraversamento Val Ponteggia	242.060	242.200	140	223–234	342.100	342.309	209	220–230	13	60
44	Gneiss Stabbiello 6	242.200	242.383	183	234–241					35	55
45A	Controavanzamento Vezia	242.383	242.736	340	241–208	342.309	342.610	303	230–203	5	35
45B	Galleria cielo aperto, portale roccia + sciolto	242.736	242.960	224	208–194	342.610	342.801	191	203–208	0	0

Anhang 13-m: Hydrochemische Parameter der in den Einspurtunnel angetroffenen Wassereintritte. Laboranalysen: Arcadis Schweiz AG (früher BGM Engineering). [1)] Wassertemperatur aus der Felstemperatur hergeleitet. [2)] Ermittlung des Ryznar-Index: http://www.lenntech.com/calculators/ryznar/index/ryznar.htm.

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	Initiale Schüttungsmenge	Portata iniziale	Temperatur	Elektrische Leitfähigkeit	pH	Carbonathärte	NH_4	Ca	Mg	Na	K	SO_4	Cl	F	SiO_2	Ca/Na-Verhältnis	Ryznar-Index [2)]
			[l/s]	[l/min]	[°C]	[µS/cm]		[mmol/l]	[mg/l]										
227.560	PGC	853-Rbret-W-27	–	–	–	205	6,9	0,49	<0,05	23	5,6	7,9	3,2	42	12	<0,5	–	0,34	–
227.719	PGC	853-Bret-W-186	4	240	13,5 [1)]	223	8,1	0,52	1	29	3,6	4,6	3,8	36	9,6	<0,5	–	0,16	9,8
227.837	OGC	853-CavOv-W-27	2,5	150	13,5	181	8,6	0,41	0,08	26	3,7	14	1,9	31	1,4	<0,5	–	0,54	9,6
227.853	PGC	853-RactE-W-103	2	120	14,9	160	8,3	0,41	<0,05	21	3,3	4,5	1,8	42	3,2	0,53	17	0,21	10,0
227.876	PGC	853-CavOv-W-66	1	60	16,4	150	8,8	0,34	<0,05	19	3,3	6,1	1,6	30	2,2	0,86	–	0,32	9,6
228.145	PGC	853-RactE-395.2	0,2	12	16,6	136	9,0	0,41	0,22	15	1,6	9	3	18	2,8	0,88	14	0,60	9,3
228.165	PGC	853-Racte-415	0,15	9	17,3	161	10,6	0,32	<0,05	3,1	0,13	31	<0,5	9,8	9,3	6,5	24	10,00	9,7
228.743	PGC	852-GbC-NE-W-7640.0	0,05	3	22,3	246	10,9	0,10	2,6	11	0,1	25	3,3	25	6	4,5	18	2,27	11,0
228.749	PGC	852-GbC-NE-W-7633.2	1,8	108	21,8	194	9,9	0,58	2,6	17	8,4	24	<6,2	16	8,8	5	24	1,41	8,0
228.750	PGC	852-GbC-NO-W-7304.5	0,5	30	20,8	146	9,9	0,10	0,74	3,8	0,1	28	<0,7	9,3	7,3	6,1	27	7,37	14,0
228.775	PGC	852-GbC-NO-W-7280	0,2	12	20,5	233	10,0	0,10	0,11	4,3	0,1	38	<9,4	3	31	7,6	27	8,84	11,0
230.505	–	852_GBC_ NO_W_5560.2	0,05	3	20,4	264	10,7	0,07	0,28	2,4	0,12	51	<1,0	3,4	18	10	31	21,25	–
232.145	OGC	852_GBC_NO_W_3930	0,1	6	22,8	192	10,2	0,51	0,14	2,4	0,2	50	<0,5	11	7,5	17	28	20,83	9,6
233.639	GCor-nub	852_GbC_NO_2444_W	0,05	3	20,0 [1)]	516	8,5	1,30	0,49	21	3,8	54	25	44	24	6,9	7,4	2,57	8,8
234.119	OGC	852-NO-SPS-02	0,05	3	21,4	454	9,8	1,00	0,52	8,9	0,15	79	12	13	32	17	17	8,88	8,2
235.338	PGC (OGC Linsen)	852_GbC_NO_731	0,01	0,6	24,1	859	9,1	–	4,2	2,8	0,33	180	2,6	75	9,8	22	14	64,29	10,0
237.522	GStab (LVC)	852_GbC_SE_W_1139	0,05	3	22,2	1850	10,9	4,30	<0,5	1,2	0,05	340	44	320	17	17	52	283,33	8,5
238.608	B-SBVC	852_GbC-SE_ 2225.65-W	0,1	6	16,7 [1)]	3200	8,9	3,80	3,5	8,3	5,7	780	4,2	1100	13	3,6	6,4	93,98	9,2
239.008	B-SBVC	852_GbC_SO_W_2548	0,05	3	20,3	4000	8,9	10,00	0,87	2,6	2	990	7,8	540	470	8,8	8,2	380,77	9,4
239.147	GStab	852_GbC_ SO_W_2686.8	0,1	6	16,1	1180	9,6	5,60	0,54	0,99	0,92	270	3,7	31	2,1	3,1	14	272,73	10,0
239.170	GStab	852_GbC-SE_2786.9-W	0,1	6	17,4	1210	9,2	0,06	0,86	1,3	0,58	330	8,3	25	6,3	6	12	253,85	9,8
239.261	GStab (Gränze B-SBVC)	852_GbC_ SO_W_2800.2	1,5	90	16,3	909	9,3	0,06	0,55	1,3	0,7	–	–	32	3,4		–	–	13,0
239.296	GStab	852-GbC-SE-W-2913.5	3	180	20,5	346	8,2	1,50	0,26	28	12	22	2,9	13	6,2	2,1	19	0,79	8,9
239.366	GStab	852-GbC-SE-W-2983.3	5,7	342	14,4	1260	9,8	0,06	0,37	1,2	0,78	290	1,9	32	2,2	15	11	241,67	9,5
239.900	GStab	852-GbC-SE-W-3517.0	0,01	0,6	19,2	1510	9,7	0,07	0,98	1,4	0,72	350	15	32	17	11	25	250,00	14,0
240.075	GStab	852-GbC-SE-W-3770.5	0,2	12	14,3	2120	9,1	0,04	0,27	0,89	0,64	550	3,2	0,4	27	15	8,3	617,98	9,9
240.517	GStab	852-GbC-SE-W-4134.0	0,003	0,18	18,9	1000	8,9	0,15	1,5	0,7	1	450	3,6	15	31	12	8,1	642,86	10,0
241.518	GStab	852_CT 43-T_W-100	0,0167	1,002	17,7	1010	9,5	3,80	1,7	0,69	0,48	220	10	20	46	1	6,7	318,84	9,2
241.909	GStab	852_GbC-SE-W-5525.9	0,1	6	18,9	771	9,2	0,07	4,2	1,2	0,89	200	9,6	15	560	3,4	10	166,67	13,0
241.943	GStab	852_GbC-SE-W-5560	0,0033	0,2	23,8	562	9,1	0,14	11,5	3,4	1,3	130	9,8	14	2,4	2	11	38,24	12,0
241.995	GStab	852_GbC-SE-W-5612.7	0,1	6	18,9	803	9,3	0,09	3,9	2,6	0,68	190	24	16	9,7	5,2	17	73,08	11,0
242.060	GStab	852_GbC-SE-W-5677.2	0,056	3,36	14,4	1540	9,2	0,09	0,55	1,4	1,3	360	3,5	24	2,8	15	8,2	257,14	13,0
242.157	GStab	852_GbC-SE-W-5774.5	0,03	1,8	15,4	1100	9,3	0,12	2,4	1,4	2	240	9,9	18	8	8,6	30	171,43	13,0
242.524	GStab	854-GbCE-199	0,25	15	14,0	820	7,9	2,70	0,27	60	52	38	4,9	65	53	<0,5	–	0,63	8,3

Anhang 13-n: Hydrochemische Parameter der im Baulos Vigana angetroffenen Wassereintritte. Daten aus der Doktorarbeit (Marzocchi 2012).

km	Geologische Formation	Temperatur	Elektrische Leitfähigkeit (EC 25)	pH	HCO_3 Phreeqc	CO_3 Phreeqc	NH_4	Ca	Mg	Na	K	SO_4	Cl	F	Ca/Na-Verhältnis	δO_{18}	δH_2
		[°C]	[µS/cm]		[mg/l]											[‰ VSMOW]	[‰ VSMOW]
227.705	OGC	12,8	349	9,5	31,34	4,44	0,62	45,80	6,07	14,33	9,20	28,70	38,37	0,06	0,31	–9,57 ± 0.05	–62,06 ± 0.7
227.719	PGC	12,2	210	8,2	48,13	0,33	0,16	29,33	4,01	8,11	3,44	32,82	8,65	0,11	0,28	–8,97 ± 0.05	–57,21 ± 0.7
227.725	PGC	n.a.	258	8,6	43,11	0,97	n.a.	32,36	3,98	8,14	2,84	36,86	7,44	0,41	0,25	–8,96 ± 0.05	–57,30 ± 0.7
227.736	PGC (SZ)	12,2	182	7,7	38,67	0,09	n.a.	25,78	3,54	7,40	2,41	33,76	2,73	0,15	0,29	–9,11 ± 0.05	–58,15 ± 0.7
227.738	PGC (SZ)	12,5	172	7,9	37,11	0,12	n.a.	24,66	3,48	6,52	2,34	33,61	1,24	0,12	0,26	–9,14 ± 0.05	–58,25 ± 0.7
227.808	PGC	12,9	178	8,7	30,18	0,62	0,17	22,54	3,31	6,70	7,00	35,68	5,71	0,30	0,30	–9,13 ± 0.05	–58,96 ± 0.7
227.809	PGC	13,6	161	7,9	33,32	0,10	0,13	22,34	3,49	6,06	1,68	35,37	0,39	0,19	0,27	–9,30 ± 0.05	–60,14 ± 0.7
227.818	PGC	13,5	162	8,7	30,53	0,60	0,04	21,74	3,42	6,48	2,92	36,02	1,07	0,21	0,30	–9,38 ± 0.05	–59,91 ± 0.7
227.828	PGC (SZ)	13,3	167	8,5	30,11	0,39	0,07	21,95	3,38	6,43	4,41	37,40	3,12	0,29	0,29	–9,34 ± 0.05	–59,71 ± 0.7
227.828	PGC (SZ)	13,8	164	8,7	33,00	0,64	0,11	22,47	3,46	6,26	3,47	36,76	2,53	0,25	0,28	–9,22 ± 0.05	–58,87 ± 0.7
227.838	PGC (SZ)	12,9	160	8,8	32,91	0,77	0,09	23,16	3,45	6,17	1,66	37,45	1,10	0,29	0,27	–9,21 ± 0.05	–58,84 ± 0.7

Anhang 13-o: Hydrochemische Parameter der im FIS angetroffenen Wassereintritte. Daten aus der Doktorarbeit (Marzocchi 2012). Tm: Metrierung des FIS.

Tm	Geologische Formation	Temperatur	Elektrische Leitfähigkeit (EC 25)	pH	HCO_3 Phreeqc	CO_3 Phreeqc	NH_4	Ca	Mg	Na	K	SO_4	Cl	F	Ca/Na
		[°C]	[µS/cm]		[mg/l]										
64	OGC			–	–		1,85	34,84	1,85	2,69	1,32	14,31	1,46	0,20	0,08
106	OGC			–	–		1,61	35,39	1,61	3,81	19,81	20,12	18,32	0,58	0,11
135	OGC		210	–	–		1,55	35,67	1,55	3,55	2,73	20,88	1,94	0,49	0,10
160	OGC		217	–	–		1,61	37,68	1,61	3,38	1,65	16,32	1,41	0,38	0,09
205	OGC	15,0	217	8,2	74,54		1,82	37,97	1,82	3,95	69,21	14,23	64,42	0,96	0,10
281	OGC		211	8,1	71,32		1,92	31,00	1,92	7,25	1,92	23,50	1,78	2,50	0,23
294	OGC		211	8,1	79,18		1,78	32,13	1,78	7,49	2,19	22,59	2,11	2,43	0,23
379	OGC	16,8	271	8,3	19,34		0,76	27,17	0,76	14,31	4,12	23,07	5,10	3,06	0,53
480	OGC			–	–		0,47	5,64	0,47	34,74	7,10	23,40	11,50	7,95	6,16
586	OGC	18,2	163	9,5	9,26		0,00	3,41	0,00	32,03	0,00	14,76	3,91	7,88	9,40
628	OGC	16,5	179	8,6	15,13		0,53	10,73	0,53	29,41	0,69	13,99	2,48	4,22	2,74
630	OGC			–	45,30	1,31	0,90	11,26	0,90	28,09	1,77	8,64	0,98	1,54	2,49
630	OGC	17,4	170	–	61,71	1,77	0,61	11,47	0,61	30,12	0,92	16,75	0,74	3,35	2,63
630	OGC	14,0	201	8,7	67,31	1,47	0,57	11,69	0,57	30,76	0,83	16,95	0,74	3,43	2,63
630	OGC	13,5	186	9,0	49,97	1,96	0,59	15,20	0,59	30,54	1,01	17,14	1,00	3,28	2,01
630	OGC	15,4	211	–	55,12	0,02	1,02	17,10	1,02	33,11	1,88	18,42	1,33	3,51	1,94
630	OGC	16,0	193	8,7	55,12	1,18	0,60	12,32	0,60	30,54	0,64	17,25	0,49	3,33	2,48
630	OGC		195	–	40,41	0,71	0,31	11,79	0,31	30,38	1,36	18,00	1,64	3,82	2,58
638	OGC	16,9	165	8,7	17,96		0,48	10,33	0,48	28,35	3,44	13,97	5,25	4,46	2,74
849	OGC		201	9,5	–		0,00	3,79	0,00	31,31	0,43	20,84	4,69	6,62	8,27
898	OGC	17,2	253	9,5	7,00		0,43	5,79	0,43	34,92	7,13	40,32	13,30	7,20	6,03
899	OGC	17,4	205	9,4	8,38		0,00	9,06	0,00	42,42	2,68	58,10	13,51	7,97	4,68
952	OGC	17,6	836	9,6	4,46		0,00	7,04	0,00	34,38	0,97	47,19	7,36	7,33	4,88
955	OGC			–	43,01	1,25	0,21	7,91	0,21	36,88	0,69	29,61	2,95	4,07	4,66
958	OGC	15,6	214	8,6	43,18	0,78	0,08	9,28	0,08	35,90	0,39	29,44	1,31	3,65	3,87
959	OGC		625	9,3	–		0,00	66,11	0,00	105,02	0,89	295,56	41,66	8,05	1,59
959	OGC			–	17,72	0,51	0,92	11,81	0,92	22,90	1,56	13,11	2,80	1,41	1,94
959	OGC	17,0	188	–	45,13	1,29	0,12	9,95	0,12	35,27	0,47	30,42	1,57	3,81	3,54
959	OGC	15,3	221	8,8	40,92	1,16	0,07	7,17	0,07	35,30	0,22	32,79	1,67	4,11	4,92
959	OGC		206	–	35,93	0,51	0,09	10,82	0,09	34,55	0,51	27,22	1,81	4,07	3,19
960	OGC	16,5	203	8,2	44,39	0,30	0,16	9,16	0,16	35,13	0,34	25,84	1,13	3,66	3,84
983	OGC	18,4	685	9,6	5,94		0,00	45,34	0,00	80,37	0,00	219,66	29,44	7,81	1,77
991	OGC	18,7	770	9,8	3,39		0,00	54,13	0,00	86,06	0,57	239,92	32,19	8,20	1,59
1013	OGC	18,5	960	9,6	1,60		0,00	61,18	0,00	96,69	3,56	273,83	39,79	8,08	1,58
1030	OGC			–	17,68	0,53	0,77	15,10	0,77	44,85	1,53	81,74	7,67	4,72	2,97
1030	OGC	17,4	356	–	28,14	0,86	0,34	18,82	0,34	62,09	1,00	109,63	13,39	6,50	3,30
1030	OGC	15,0	329	9,4	15,59	1,69	0,10	16,14	0,10	55,84	0,39	109,30	9,23	6,12	3,46
1030	OGC	15,8	330	9,5	13,69	2,03	0,08	15,35	0,08	52,95	0,29	97,31	7,75	5,82	3,45
1030	OGC	16,5	316	9,5	14,44	2,07	0,09	12,06	0,09	52,24	0,42	91,52	7,14	5,81	4,33
1030	OGC		312	–	13,91	1,38	0,07	11,07	0,07	51,46	0,91	84,78	7,40	6,44	4,65
1034	OGC			–	14,78	0,45	0,51	18,11	0,51	41,83	1,11	81,41	4,67	4,76	2,31
1320	PGC	19,3	276	9,8	16,26		0,00	82,81	0,00	118,78	1,84	350,50	48,76	7,80	1,43
1552	GCornub	18,9	455	–	–		0,00	1,54	0,00	60,58	8,74	7,79	21,50	14,84	39,36
1560	GCornub			–	153,70	4,76	0,37	4,12	0,37	100,49	3,92	28,56	2,93	12,65	24,39
1578	GCornub	17,4	420	–	156,72	4,81	0,54	4,20	0,54	112,31	1,99	27,89	6,66	16,35	26,71
1578	GCornub	13,5	453	9,2	173,17	11,58	0,22	2,83	0,22	113,14	2,40	24,39	2,95	15,88	39,99
1578	GCornub	14,7	470	9,3	135,98	11,18	0,18	2,05	0,18	109,95	2,05	24,33	2,39	15,47	53,53
1578	GCornub	16,8	495	8,2	140,42	1,04	0,23	2,22	0,23	113,07	5,68	25,66	5,41	15,70	50,93
1578	GCornub		492	–	101,71	8,22	0,22	2,31	0,22	110,58	1,62	25,17	3,04	16,05	47,78
1580	GCornub		506	–	148,95	4,58	0,32	3,29	0,32	97,02	3,06	20,89	4,38	13,83	29,48
1580	GCornub	14,9	453	9,0	156,83	7,64	0,30	1,99	0,30	107,93	0,57	28,50	1,47	15,10	54,35
1580	GCornub	15,5	450	9,3	127,50	10,92	0,20	2,07	0,20	105,88	0,57	26,76	1,28	14,33	51,18
1580	GCornub	17,2	494	8,7	129,89	3,05	0,24	2,10	0,24	108,45	0,72	27,91	1,43	14,73	51,69
1580	GCornub		447	–	99,39	6,86	0,20	1,74	0,20	105,81	0,53	26,62	2,21	15,15	60,67

Anhang 13-p: Indexwerte der Punktlastversuche

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	$I_{s(50)parallel}$	$I_{s(50)senkrecht}$	$I_{a(50)}$
			[MPa]	[MPa]	[-]
235.374	GGium	GbC-NE-R-1008.8	0,85	4,18	4,92
237.660	LVC	GbC-SE-LVC-02-156.35	0,05	0,74	14,80
238.044	GStab	GbC-SE-LVC-04 Bm. 0.2-2.0	0,12	1,50	12,50
238.080	GStab	GbC-SE-LVC-04 Bm. 36.1-37.6	0,56	6,47	11,55
238.111	GStab	GbC-SE-LVC-04 Bm. 67.2-68.45	0,33	4,92	14,91
238.205	GStab	GbC-SE-LVC-04 Bm. 160.8-162.0	0,63	1,08	1,71
238.650	B-SBVC	GbC-SE-01 Bm. 35.15-35.5	0,45	3,96	8,80
238.684	GStab	GbC-SE-01 Bm. 69.6-71.5	0,44	6,14	13,95
238.757	GStab	GbC-SE-01 Bm. 142.5-144.5	0,14	5,02	35,86
240.352	GStab	GbC-Sarè-SE Tm. 3969.70 A	0,28	5,47	19,54
240.352	GStab	GbC-Sarè-SE Tm. 3969.70 B	–	–	–
240.492	GStab	GbC-Sarè-01-18.50-19.50	0,56	9,14	16,32
240.510	GStab	GbC-Sarè-01-35.90-37.50	0,45	3,13	6,96
240.586	GStab	GbC-Sarè-01-112.00-113.00	0,40	3,17	7,93
240.631	GStab	GbC-Sarè-01-157.00-159.80	0,11	1,23	11,18
240.632	GStab	GbC-Sarè-01-158.80-160.00	0,07	0,31	4,43
240.661	GStab	GbC-Sarè-01-187.00-187.70	0,10	2,49	24,90
240.669	GStab	GbC-Sarè-01-195.00-196.00	0,43	4,56	10,60
331.383	PGC	GbC-NO-R-4650	–	–	–
331.628	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 189.30-190.00	0,89	9,01	10,12
331.635	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 182.00-183.00	3,24	6,52	2,01
331.641	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 176.30-176.70	0,02	–	
331.644	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 173.15-174.50	0,25	5,27	21,08
331.648	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 169.50-170.50	0,23	3,37	14,65
331.657	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 160.00-161.00	0,16	3,06	19,09
331.705	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 112.00-112.23, 112.30-113.00	1,97	6,31	3,20
331.717	GCornub	GbC-NO-12A.1-01 Bm 100.20-100.30	2,13	9,52	4,47
331.721	GCornub	GbC-NO-12A.1-01 Bm 96.0-97.0, 97.20-97.70	2,16	11,74	5,44
331.758	OGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 58.70-59.50	4,37	9,31	2,13
331.759	OGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 57.88-59.50	2,01	4,05	2,01
331.794	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 23.00-24.00, 24.30-24.50	0,79	7,71	9,76
331.799	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 18.50-19.30	2,39	9,94	4,16
331.801	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 16.50-17.50	1,40	13,10	9,36
331.809	GCornub	GbC-NO-12A.1-01 Bm 8.50-9.30	0,71	7,32	10,31
331.809	GCornub	GbC-NO-12A.1-01 Bm 7.70-8.20	1,53	7,05	4,61
334.060	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 74.0-76.0	0,70	3,70	5,29
334.092	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 42.2-52.5	0,81	10,53	13,00
334.099	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 35.2-87.5	1,72	4,75	2,76
335.234	PGC	GbC-NO-R-819	1,70	7,05	4,16
338.649	B-SBVC	GbC-SO Tm 2198.5	0,95	3,66	3,85
338.724	GStab	GbC-SO Tm 2273.7	0,38	2,13	5,61
340.215	GStab	GbC-SO-3764	0,87	2,18	2,51
340.383	GStab	Sarè-SO 62.80	0,46	1,85	4,02
340.417	GStab	Sarè-SO 97.00	0,15	1,91	12,73
340.452	GStab	Sarè-SO 132.00	–	–	–
340.580	GStab	Sarè-SO 260.30	0,36	3,17	8,81
340.581	GStab	Sarè-SO 261.00	0,06	0,22	3,67
340.585	GStab	Sarè-SO 265.00	–	–	–
340.589	GStab	Sarè-SO 269.50	–	–	–
340.647	GStab	Sarè-SO 327.25	0,27	1,94	7,19
340.658	GStab	Sarè-SO 338.00	0,05	0,34	6,80
340.660	GStab	Sarè-SO 340.50	0,10	1,27	12,70

Anhang 13-q: Indexwerte der Punktlastversuche (Materialbewirtschaftung) für die Ost- und Weströhre.

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	$I_{s(50)parallel}$ [MPa]	$I_{s(50)senkrecht}$ [MPa]	$I_{a(50)}$ [-]
227.553	PGC	G87-853Tm35	4,7	11,0	2,3
227.562	PGC	G89-853Tm44	3,7	4,4	1,2
227.564	PGC	G102-853 CavE46	4,5	8,5	1,9
227.568	PGC	G90-853Tm50	4,7	9,5	2,0
227.620	PGC	G114-853 CavE 102	1,2	3,8	3,2
227.673	PGC	G139-853 Str-CavE 155	2,9	5,3	1,8
227.680	OGC	G128-853CavE 162	3,6	3,9	1,1
227.750	PGC	G141-853 CavE 232	2,0	5,5	2,8
227.774	PGC	G142-853RacTuboE 24	3,9	10,5	2,7
227.861	PGC	G134-853RacTuboE111	3,7	7,7	2,1
227.966	PGC	G125-853 RacTuboE 216	3,5	9,0	2,6
228.158	PGC	G144-853RacTuboE 408	3,7	8,8	2,4
228.189	PGC	G146-853RacTuboE 439	4,5	5,5	1,2
228.215	PGC	G148-853RacTuboE 465	3,9	6,5	1,7
228.257	PGC	G152-853TuboE 507	3,7	8,6	2,3
228.359	PGC	G403-852NE8024.2	1,0	4,7	4,7
228.387	PGC	G401-852NE7996.3	3,2	5,2	1,6
228.415	PGC	G399-852NE7968	2,1	4,2	2,0
228.489	PGC	G397-852NE7893.9	3,5	5,0	1,4
228.510	PGC	G396-852NE7873	1,7	5,5	3,2
228.524	PGC	G395-852NE7859	2,4	7,2	3,0
228.557	PGC	G392-852NE7825.6	2,6	5,6	2,2
228.597	PGC	G387-852NE7786.5	1,1	2,3	2,1
228.732	PGC	G383-852NE7651	3,1	6,9	2,2
228.807	PGC	G382-852NE7576	1,7	7,2	4,2
228.899	PGC	G380-852NE7484	3,1	7,7	2,5
229.073	PGC	G378-852NE7309.6	2,4	3,7	1,5
229.148	PGC	G375-852NE7235	2,3	6,6	2,9
229.345	PGC	G373-852NE7038	2,7	7,4	2,7
229.457	PGC	G371-852NE6926	1,8	5,9	3,3
229.507	PGC	G370-852NE6876	1,2	6,7	5,6
229.556	PGC	G368-852NE6827	3,0	10,3	3,4
229.612	PGC	G367-852NE6771	3,9	8,7	2,2
229.668	PGC	G365-852NE6715	1,2	5,9	4,9
229.997	PGC	G364-852NE6386	3,0	6,6	2,2
230.052	PGC	G362-852NE6331	1,0	7,6	7,6
230.167	PGC	G361-852NE6216	2,5	5,7	2,3
230.485	PGC	G357-852NE5898	3,5	5,5	1,6
230.528	PGC	G356-852NE5855	1,4	5,0	3,6
230.560	PGC	G354-852NE5823	2,2	5,6	2,5
230.581	PGC	G389-852NE7802.5	3,6	9,7	2,7
230.670	PGC	G352-852NE5713	1,6	4,0	2,5
230.794	PGC	G347-852NE5589	1,6	6,8	4,3
230.830	PGC	G345-852NE5553	2,6	3,8	1,5
230.982	PGC	G337-852NE5401	2,4	7,5	3,1
231.018	PGC	G333-852NE5365	2,0	4,2	2,1
231.105	PGC	G332-852NE5278	1,4	6,0	4,3
231.136	PGC	G331-852NE5247	1,1	3,9	3,5
231.199	PGC	G328-852NE5184	2,7	7,4	2,7
231.262	PGC	G325-852NE5121	2,2	4,9	2,2
231.405	PGC	G315-852NE4978	2,3	7,0	3,0
231.513	PGC	G311-852NE4870	2,4	7,7	3,2
231.596	PGC	G307-852NE4787	1,4	5,7	4,1
231.723	PGC/OGC	G300-852NE4660	2,1	6,9	3,3
231.750	PGC	G299-852NE4633	1,8	4,1	2,3
231.805	GCornub/PGC	G298-852NE4578	2,6	5,1	2,0
231.819	GCornub/PGC	G297-852NE4564	3,1	6,1	2,0
231.854	GCornub	G296-852NE4529	3,3	8,1	2,5
231.899	OGC	G295-852NE4484	2,5	8,8	3,5

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	$I_{s(50)parallel}$ [MPa]	$I_{s(50)senkrecht}$ [MPa]	$I_{a(50)}$ [-]
231.916	OGC	G293-852NE4467	2,4	8,3	3,5
231.979	OGC	G290-852NE4404	4,6	8,5	1,8
232.012	OGC	G289-852NE4371	4,0	8,3	2,1
232.045	OGC	G288-852NE4338	3,7	8,0	2,2
232.052	OGC	G287-852NE4331	4,3	8,4	2,0
232.108	OGC	G283-852NE4275	2,8	8,0	2,9
232.157	OGC	G281-852NE4226	2,7	7,0	2,6
232.231	OGC	G276-852NE4152	2,6	6,6	2,5
232.275	OGC	G274-852NE4108	2,8	9,7	3,5
232.297	OGC	G272-852NE4086	3,1	7,6	2,5
232.338	OGC	G270-852NE4045	3,2	8,4	2,6
232.384	OGC	G267-852NE3999	2,1	7,4	3,5
232.427	OGC	G265-852NE3956	3,5	7,9	2,3
232.478	PGC	G264-852NE3905	0,7	4,8	6,9
232.559	OGC	G261-852NE3824	3,4	7,2	2,1
232.594	OGC/B-UBC	G259-852NE3789	1,9	4,8	2,5
232.658	OGC	G258-852NE3725	1,8	4,4	2,4
232.689	OGC	G255-852NE3694	1,6	5,4	3,4
232.725	OGC	G254-852NE3658	2,7	8,2	3,0
232.791	PGC	G251-852NE3592	2,4	7,1	3,0
232.942	PGC	G243-852NE3441	1,7	6,2	3,6
233.347	PGC	G215-852NE3036	0,4	0,7	1,8
233.485	PGC	G204-852NE2898	0,9	3,9	4,3
233.526	PGC	G192-852NE2857	0,6	2,7	4,5
233.725	PGC	G192-852NE2658	1,8	5,8	3,2
233.822	OGC/PGC	G188-852NE2561	1,8	4,1	2,3
233.882	OGC	G186-852NE2501	2,7	6,6	2,4
233.958	OGC	G184-852NE2425	1,7	6,0	3,5
234.003	OGC	G181-852NE2380	1,6	4,3	2,7
234.114	OGC	G179-852NE2269	0,6	5,2	8,7
234.156	PGC	G175-852NE2227	1,9	4,0	2,1
234.208	B-UBC	G174-852NE2175	4,0	11,4	2,9
234.254	B-UBC	G171-852NE2129	2,7	7,0	2,6
234.291	B-UBC	G170-852NE2092	2,2	5,8	2,6
234.382	B-UBC	G167-852NE2001	3,0	5,5	1,8
234.516	PGC	G165-852NE1867	1,1	4,2	3,8
234.659	B-UBC/PGC	G160-852NE1724	4,9	9,6	2,0
234.879	PGC/B-UBC	G151-852NE1504	2,0	5,7	2,9
235.694	GGium	G122-852NE689	2,9	5,3	1,8
235.890	GGium	G99-852NE433-101020	1,7	6,9	4,1
236.063	GGium	G95-852NE320-100922	1,5	4,7	3,1
236.446	GGium	G83-852SE-Tm63	1,7	2,5	1,5
236.544	GGium	G86-852SE161	1,2	2,7	2,3
237.577	LVC	G137-852SE1194	1,5	3,1	2,1
238.284	GStab	G168-852SE1901	1,1	1,4	1,3
238.389	GStab	G172-852SE2006	0,9	2,1	2,3
238.507	GStab	G177-852SE2124	0,8	2,4	3,0
238.643	GStab	G183-852SE2260	–	–	–
238.824	GStab	G191-852SE2441	0,3	1,6	5,3
238.945	GStab	G194-852SE2562	–	–	–
239.118	GStab	G199-852SE2735	1,7	2,5	1,5
239.246	GStab	G202-852SE2863	–	–	–
239.377	OGBern	G209-852SE2994	1,9	6,7	3,5
239.401	OGBern	G211-852SE3018	2,2	6,9	3,1
239.430	OGBern	G212-852SE3047	1,7	8,0	4,7
239.464	OGBern	G213-852SE3081	2,0	6,3	3,2
239.491	OGBern	G214-852SE3108	2,3	6,5	2,8
239.636	GStab	G218-852SE3253	1,1	4,2	3,8
239.713	B-SBVC	G220-852SE3330	3,4	5,8	1,7
239.812	OGBern	G224-852SE3429	2,4	5,4	2,3
239.853	GStab	G226-852SE3470	1,3	7,4	5,7

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	$I_{s(50)parallel}$ [MPa]	$I_{s(50)senkrecht}$ [MPa]	$I_{a(50)}$ [-]
239.946	OGBern	G228-852SE3563	2,9	5,5	1,9
240.091	GStab	G232-852SE3708	1,7	5,8	3,4
240.202	GStab	G233-852SE3819	2,7	6,6	2,4
240.313	GStab	G236-852SE3930	0,9	1,3	1,4
240.412	GStab	G239-852SE4029	2,4	7,6	3,2
240.558	OGBern	G241-852Sarè-SE4175	1,1	2,0	1,8
240.569	OGBern	G248-852Sarè-SE4186	1,4	3,4	2,4
240.596	GStab	G242-852Sarè-SE4213	0,6	1,9	3,2
240.706	GStab	G275-852SE4323	2,0	5,2	2,6
240.747	OGBern	G284-852SE4364	1,0	2,3	2,3
240.835	OGBern	G292-852SE4452	1,3	2,6	2,0
240.953	OGBern	G301-852SE4570	1,1	2,6	2,4
241.034	GStab	G303-852SE4651	–	–	–
241.154	GStab	G306-852SE4771	1,3	3,1	2,4
241.278	GStab	G312-852SE4895	1,0	4,4	4,4
241.456	GStab	G319-852SE5073	2,3	7,6	3,3
241.709	GStab	G329-852SE5326	0,7	2,0	2,9
241.813	GStab	G334-852SE5430	1,4	4,4	3,1
241.952	GStab	G341-852SE5569	1,1	5,8	5,3
242.038	GStab	G349-852SE5655	1,3	6,1	4,7
242.284	GStab	G360-852SE5901	1,7	5,9	3,5
242.692	GStab	G84-854NE-Tm31	2,3	3,1	1,3
327.548	PGC	G-0050	4,4	8,2	1,9
327.563	PGC	G-0053	2,8	9,4	3,4
327.580	PGC	G-0054	4,0	9,4	2,4
327.651	PGC	G-0062	3,7	4,5	1,2
327.678	PGC	G-0063	4,7	5,8	1,2
327.681	PGC	G-0064	3,9	5,7	1,5
327.716	PGC	G-0065	2,0	4,6	2,3
327.723	PGC	G-0066	1,3	3,8	2,9
327.738	PGC	G-0068	2,4	5,5	2,3
327.745	PGC	G-0069	2,6	8,1	3,1
327.750	PGC	G-0070	4,4	9,4	2,1
327.769	PGC	G-0073	4,0	10,4	2,6
327.778	PGC	G-0074	4,4	10,6	2,4
327.792	PGC	G-0076	3,7	7,0	1,9
327.803	PGC	G-0077	2,6	6,8	2,6
327.809	PGC	G-0078-853 Tm276	3,6	9,4	2,6
327.820	PGC	G79-853Tm10	3,6	13,4	3,7
327.843	PGC	G80-853Tm33	2,7	4,5	1,7
327.845	PGC	G85-853Tm35	3,1	9,6	3,1
327.865	PGC	G88-853Tm55	3,5	10,1	2,9
327.876	PGC	G91-853Tm66	2,2	6,6	3,0
327.904	PGC	G98-853 Cav O Tm 94	4,4	10,4	2,4
327.930	PGC	G103-853 CavO120	3,3	6,9	2,1
327.946	PGC	G110-853 CavO136	3,0	5,6	1,9
327.963	PGC	G115-853CavO 153	4,0	8,2	2,1
327.906	PGC	G117-853CavO96	2,9	5,4	1,9
328.042	PGC	G-133-853CavO232	2,9	5,2	1,8
328.059	PGC	G135-853CavO 249	3,2	7,3	2,3
328.103	PGC	G138-853CavO 293	3,1	7,0	2,3
328.143	PGC	G143-853CavO 333	1,6	7,0	4,4
328.173	PGC	G149-853CavO363	2,2	6,6	3,0
328.192	PGC	G153-853CavO382	1,9	6,7	3,5
328.207	PGC	G157-853CavO397	1,9	7,3	3,8
328.238	PGC	G159-853RacTuboO23	6,5	8,5	1,3
328.277	PGC	G163-853RacTuboO62	3,2	9,0	2,8
328.328	PGC	G402-852NO7725.5	3,6	6,0	1,7
328.356	PGC	G400-852NO7697.5	2,2	4,6	2,1
328.366	PGC	G398-852NO7687.5	1,7	8,1	4,8
328.476	PGC	G394-852NO7577	1,8	7,6	4,2

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	$I_{s(50)parallel}$ [MPa]	$I_{s(50)senkrecht}$ [MPa]	$I_{a(50)}$ [-]
328.500	PGC	G393-852NO7552.8	2,7	8,4	3,1
328.510	PGC	G391-852NO7543.5	4,8	7,1	1,5
328.522	PGC	G390-852NO7531.5	3,8	10,9	2,9
328.547	PGC	G388-852NO7505.7	2,1	9,7	4,6
328.558	PGC	G386-852NO7495	3,2	8,5	2,7
328.590	PGC	G385-852NO7463	2,7	10,2	3,8
328.684	PGC	G384-852NO7368.6	2,3	7,0	3,0
328.800	PGC	G381-852NO7253	1,9	6,1	3,2
328.876	PGC	G379-852NO7177.4	1,9	8,1	4,3
329.013	PGC	G377-852NO7040.5	1,4	5,2	3,7
329.078	PGC	G376-852NO6975	2,5	8,6	3,4
329.222	PGC	G374-852NO6831	2,4	6,3	2,6
329.378	PGC	G372-852NO-6675	0,8	2,4	3,0
329.509	PGC	G369-852NO-6544	3,2	8,4	2,6
329.577	PGC	G366-852NO-6476	2,8	8,7	3,1
329.681	PGC	G363-852NO-6372	1,9	7,7	4,1
329.946	PGC	G359-852NO-6107	1,1	3,8	3,5
330.099	PGC	G358-852NO-5954	2,8	5,4	1,9
330.138	PGC	G355-852NO-5915	3,2	4,5	1,4
330.172	PGC	G353-852NO-5881	1,7	4,5	2,6
330.305	PGC	G351-852NO-5748	1,1	2,2	2,0
330.443	PGC	G350-852NO-5610	2,7	6,8	2,5
330.486	PGC	G346-852NO-5567	2,3	4,5	2,0
330.552	PGC	G344-852N0-5501	2,1	3,9	1,9
330.622	PGC	G343-852N0-5431	1,4	4,2	3,0
330.672	PGC	G342-852N0-5381	1,8	7,8	4,3
330.754	PGC	G339-852N0-5299	4,0	6,6	1,7
330.773	PGC	G338-852N0-5280	1,9	8,2	4,3
330.785	PGC	G336-852N0-5268	3,8	8,1	2,1
330.948	PGC	G326-852N0-5105	1,9	3,1	1,6
330.953	PGC	G324-852N0-5100	2,2	4,5	2,0
330.989	PGC	G323-852N0-5064	2,3	6,9	3,0
331.030	PGC	G322-852N0-5023	2,6	8,6	3,3
331.054	PGC	G321-852N0-4999	1,9	5,1	2,7
331.068	PGC	G320-852N0-4985	1,9	5,6	2,9
331.087	PGC	G318-852N0-4966	2,9	8,0	2,8
331.106	PGC	G317-852N0-4947	2,6	7,2	2,8
331.150	PGC	G314-852N0-4903	2,0	7,9	4,0
331.251	PGC	G310-852N0-4802	1,3	3,7	2,8
331.270	PGC	G309-852N0-4783	2,4	4,0	1,7
331.357	PGC	G308-852N0-4696	1,9	7,0	3,7
331.514	PGC	G302-852N0-4539	–	–	–
331.619	OGC	G294-852N0-4434	2,6	8,1	3,1
331.660	PGC	G279-852N04393	1,0	4,0	4,0
331.707	PGC/OGC	G285-852N04346	3,1	9,3	3,0
331.739	OGC	G278-852N04314	4,2	8,0	1,9
–	PGC/OGC	G286-852N0-CT12-29	4,6	8,9	1,9
331.760	PGC/OGC	G282-852N04293	2,5	6,0	2,4
331.792	GCornub	G277-852N04261	2,9	8,1	2,8
331.854	GCornub	G273-852N04199	2,4	6,7	2,8
331.890	OGC	G271-852N04163	2,9	10,2	3,5
331.959	OGC	G268-852N04094	2,4	7,9	3,3
332.009	OGC	G266-852N04044	3,6	7,5	2,1
332.044	OGC	G263-852N04009	3,8	7,4	1,9
332.089	OGC	G262-852N03964	3,3	7,8	2,4
332.133	OGC	G260-852N03920	3,0	9,6	3,2
332.229	OGC	G257-852N03824	2,8	7,3	2,6
332.265	OGC	G256-852N03788	2,4	5,5	2,3
332.304	OGC	G253-852N03749	2,4	8,3	3,5
332.345	OGC	G252-852N03708	2,0	6,0	3,0
332.386	OGC	G250-852N03667	2,7	5,9	2,2

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	$I_{s(50)parallel}$ [MPa]	$I_{s(50)senkrecht}$ [MPa]	$I_{a(50)}$ [-]
332.412	OGC	G249-852N03641	1,9	9,1	4,8
332.442	OGC	G247-852N03611	3,5	8,3	2,4
332.477	OGC	G246-852N03576	3,8	7,0	1,8
332.531	OGC	G244-852N03522	3,1	8,8	2,8
332.645	OGC	G240-852N03408	1,8	7,3	4,1
332.709	OGC	G238-852N03344	2,2	7,2	3,3
332.785	OGC	G237-852N03268	2,2	7,4	3,4
332.874	PGC	G234-852N03179	1,8	4,4	2,4
332.927	PGC	G223-852N03126	1,0	5,6	5,6
333.020	PGC	G230-852N03033	1,4	4,6	3,3
333.062	OGC	G222-852N02991	0,9	5,2	5,8
333.158	PGC	G221-852N02895	0,6	4,1	6,8
333.421	PGC	G203-852N02632	3,1	7,4	2,4
333.557	GCornub	G197-852N02496	1,9	6,5	3,4
333.582	GCornub	G196-852N02471	2,2	5,6	2,5
333.604	GCornub	G195-852N02449	1,8	5,9	3,3
333.669	PGC	G190-852N02384	–	–	–
333.793	PGC	G187-852N02260	1,2	5,0	4,2
333.837	PGC	G185-852N02216	1,2	3,0	2,5
333.945	OGC	G180-852N02108	1,6	6,1	3,8
334.056	OGC	G178-852N01997	2,2	5,2	2,4
334.192	B-UBC	G169-852N01861	1,6	5,3	3,3
334.357	B-UBC	G164-852N01696	3,0	7,5	2,5
334.392	B-UBC	G162-852N01661	1,2	3,6	3,0
334.521	B-UBC	G158-852N01532	3,4	5,6	1,6
334.566	B-UBC	G156-852N01487	3,7	8,0	2,2
334.638	B-UBC/PGC	G154-852N01415	2,8	10,0	3,6
334.760	PGC	G147-852N01293	1,1	5,8	5,3
335.075	PGC	G140-852N00978	2,0	3,6	1,8
335.314	GGium	G136-852N00739	–	–	–
335.494	GGium	G129-852NO559	1,6	4,3	2,7
335.640	GGium	G124-852NO413	1,3	4,5	3,5
335.768	GGium	G116-852NO285	2,5	2,6	1,0
335.863	GGium	G108-852NO190	1,1	3,9	3,5
336.195	GGium	G-0048	3,2	6,3	2,0
336.505	GGium	G-0051	2,5	7,1	2,8
336.542	GGium	G-0049	2,1	5,3	2,5
336.861	GGium	G-0056	3,0	6,3	2,1
336.886	GGium	G-0057	1,4	3,6	2,6
336.899	GGium	G-0058	2,7	6,3	2,3
337.057	GGium	G111-852SO606	1,0	3,6	3,6
337.319	GGium	G123-852SO868	2,1	3,9	1,9
337.734	LVC	G145-852SO1283	0,4	1,4	3,5
337.833	LVC	G150-852SO1382	1,5	5,5	3,7
338.047	GStab	G161-852SO1596	0,6	1,6	2,7
338.203	GStab	G166-852SO1752	0,5	1,2	2,4
338.356	GStab	G173-852SO1905	0,8	1,9	2,4
338.475	GStab	G176-852SO2024	0,9	2,9	3,2
338.602	GStab	G182-852SO2151	1,0	4,8	4,8
338.785	GStab	G189-852SO2334	1,5	4,2	2,8
338.924	GStab	G193-852SO2473	–	–	–
339.070	B-SBVC	G198-852SO2619	–	–	–
339.257	B-SBVC	G201-852SO2806	0,7	3,9	5,6
339.358	OGBern	G205-852SO2907	2,5	8,6	3,4
339.396	OGBern	G206-852SO2945	2,2	6,8	3,1
339.414	OGBern	G207-852SO2963	–	–	–
339.463	GStab	G210-852SO3012	0,3	1,6	5,3
339.625	GStab	G216-852SO3174	1,2	3,0	2,5
339.685	GStab	G217-852SO3234	2,2	7,4	3,4
339.746	GStab	G219-852SO3295	0,9	1,9	2,1
339.918	OGBern	G225-852SO3467	2,7	5,2	1,9

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	$I_{s(50)parallel}$ [MPa]	$I_{s(50)senkrecht}$ [MPa]	$I_{a(50)}$ [-]
339.954	GStab	G227-852SO3503	1,3	4,8	3,7
340.117	GStab	G229-852SO3666	2,0	2,9	1,5
340.187	GStab	G231-852SO3736	2,7	6,4	2,4
340.352	GStab	G235-852SO3901	1,6	2,4	1,5
340.537	GStab	G245-852SarèSO4086	1,4	3,5	2,5
340.716	GStab	G291-852SO4265	1,7	2,3	1,4
340.867	GStab	G304-852SO4416	1,5	3,0	2,0
340.952	GStab	G305-852SO4501	1,2	3,1	2,6
341.034	GStab	G313-852SO4583	1,1	3,0	2,7
341.231	GStab	G316-852SO4780	1,6	6,1	3,8
341.493	GStab	G327-852SO5042	2,3	3,7	1,6
341.579	GStab	G330-852SO5128	0,7	1,9	2,7
341.719	GStab	G335-852SO5268	1,6	4,1	2,6
341.882	GStab	G340-852SO5431	1,2	2,9	2,4
341.986	GStab	G348-852SO5535	1,0	5,1	5,1
342.462	GStab	G109.854NO150	2,5	7,4	3,0
342.599	GStab	G81-854NO13	3,1	5,0	1,6

Anhang 13-r: Resultate der einaxialen Druckfestigkeitsversuche.

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	Eigenschaften des Probestücks						Einaxiale Druckfestigkeit UCS	E-Modul E_{50}
			Durchmesser	Höhe	Gewichtskraft	Raumgewicht γ	Schieferungs-winkel	Bruch in Bezug zur Schieferung		
			[mm]	[mm]	[N]	[kN/m³]	[°]	[-]	[MPa]	[GPa]
237.657	LVC	GbC-SE-LVC-02-153.05	63,0	128,5	10,8	27,0	46–60	parallel	1,0	1,1
237.659	LVC	GbC-SE-LVC-02-155.44	63,0	128,6	10,7	26,6	46–30	parallel	8,1	7,1
238.650	B-SBVC	GbC-SE-01 Bm. 35.15-35.5	63,4	144,7	13,1	28,6	48	anisotrop	25,2	7,5
238.684	GStab	GbC-SE-01 Bm. 69.6-71.5	63,4	142,5	12,2	27,2	50	anisotrop	32,3	9,7
238.757	GStab	GbC-SE-01 Bm. 142.5-144.5	63,4	142,7	12,0	26,6	10	isotrop	60,3	28,3
240.530	GStab	GbC-Sarè-SE-01 TM. 56.30-58.00	63,5	137,3	11,3	26,0	20–0	anisotrop	64,8	38,6
240.530	GStab	GbC-Sarè-SE-01 TM. 56.30-58.00	63,5	136,8	11,3	26,0	20–0	anisotrop	61,3	47,7
240.530	GStab	GbC-Sarè-SE-01 TM. 56.30-58.00	63,5	136,5	11,2	26,0	20–0	isotrop	53,1	33,8
240.535	OGBern	GbC-Sarè-SE-01 TM. 61.00-64.00	63,5	136,6	11,3	26,1	25–30	anisotrop	44,7	36,9
240.535	OGBern	GbC-Sarè-SE-01 TM. 61.00-64.00	63,5	136,2	11,2	25,9	25–30	anisotrop	34,6	28,9
240.535	OGBern	GbC-Sarè-SE-01 TM. 61.00-64.00	63,5	135,6	11,2	26,0	25–30	anisotrop	67,7	52,0
240.535	GStab	GbC-Sarè-SE-01 TM. 121.00-129.00	63,5	136,2	11,5	26,6	30	anisotrop	36,1	40,3
240.535	GStab	GbC-Sarè-SE-01 TM. 121.00-129.00	63,5	137,3	11,6	26,7	30	anisotrop	22,4	32,7
–	PGC	GbC-NO-SPS-01 TM. 80.55-86.60	63,5	136,6	11,8	27,2	30–35	anisotrop	19,5	32,6
–	PGC	GbC-NO-SPS-01 TM. 80.55-86.60	63,5	137,2	11,3	26,0	30–35	anisotrop	29,5	18,4
–	PGC	GbC-NO-SPS-01 TM. 80.55-86.60	63,5	137,5	11,4	26,1	30–35	anisotrop	29,7	21,4
–	PGC	GbC-NO-SPS-01 TM. 104.00-105.00	63,5	135,0	11,1	26,1	30–35	anisotrop	42,4	29,1
–	PGC	GbC-NO-SPS-01 TM. 104.00-105.00	63,5	136,9	11,5	26,6	30–35	anisotrop	63,9	48,7
335.052	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 107.00-109.70	63,5	138,2	11,4	26,1	30–35	anisotrop	14,9	10,4
335.050	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 107.00-109.70	63,5	134,8	11,3	26,4	30–35	isotrop	47,4	41,4
335.014	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	63,5	136,5	11,9	27,5	55–60	anisotrop	126,3	89,6
335.013	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	63,5	137,7	11,6	26,6	55–60	anisotrop	218,2	98,0
335.012	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	63,5	136,4	11,1	25,8	55–60	anisotrop	155,0	72,9
335.011	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	63,5	137,6	11,6	26,5	55–60	isotrop	189,9	90,2
335.008	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 150.60-155.80	63,5	136,1	12,1	28,1	40–50	isotrop	137,9	101,4
335.006	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 150.60-155.80	63,5	137,8	11,9	27,2	40–50	anisotrop	120,7	73,6
334.928	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 225.60-231.50	63,5	138,2	11,8	27,0	60–70	anisotrop	38,8	41,4
334.928	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 225.60-231.50	63,5	137,4	11,9	27,3	60–70	anisotrop	38,9	44,6
334.928	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 225.60-231.50	63,5	138,4	11,9	27,2	60–70	anisotrop	24,9	18,1
334.925	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 231.50-237.20	63,5	134,2	11,3	26,6	60–70	anisotrop	6,2	–
334.099	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 35.2-87.5	63,4	127,6	10,7	26,5	60	anisotrop	44,2	28,9
334.092	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 42.2-52.5	63,4	138,7	11,4	26,0	50	anisotrop	44,1	18,1
334.060	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 74.0-76.0	63,4	125,4	10,4	26,4	55	anisotrop	17,3	13,3
333.255	PGC	GbC-NO-SPS-03 TM. 9.00-14.00	63,5	137,0	11,4	26,4	20–30	anisotrop	5,9	12,7
331.801	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 16.50-17.50	63,0	128,4	10,7	26,8	40	anisotrop	10,3	14,2
331.799	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 18.50-19.30	63,3	125,5	10,6	26,8	40–45	anisotrop	38,1	33,9
331.762	OGC	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 53.66-61.44	63,5	135,0	11,6	27,0	20–25	anisotrop	108,3	100,6
331.762	OGC	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 53.66-61.44	63,5	135,7	11,5	26,8	20–25	anisotrop	34,1	–
331.761	OGC	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 53.66-61.44	63,5	138,3	11,6	26,6	20–25	anisotrop	100,3	80,3
331.758	OGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 58.70-59.50	63,2	134,7	11,3	26,8	15–20	anisotrop	54,3	30,5
331.758	OGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 58.70-59.50	63,2	136,8	11,6	27,0	15–20	anisotrop	48,3	35,9
331.717	GCornub	GbC-NO-12A.1-01 Bm 100.20-100.50	63,7	132,2	10,9	25,8	30–35	isotrop	67,3	44,5
331.705	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 112.00-112.23, 112.30-113.00	63,3	126,1	10,6	26,8	15–20	anisotrop	16,7	15,9
331.701	GCornub	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 114.79-122.45	63,5	139,4	11,7	26,4	20–25	anisotrop	80,1	63,7
331.701	GCornub	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 114.79-122.45	63,5	136,5	11,3	26,1	20–25	anisotrop	97,1	69,0
331.697	GCornub	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 114.79-122.45	63,5	135,6	11,0	25,7	20–25	anisotrop	102,2	57,5
331.657	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 160.00-161.00	63,7	130,5	10,6	25,6	15	anisotrop	15,6	6,8
331.646	PGC	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 168.35-176.05	63,5	134,2	11,2	26,4	30–35	anisotrop	19,8	75,1
331.628	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 189.30-190.00	63,3	132,2	11,0	26,5	40	anisotrop	15,1	6,6
340.374	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 54.60-62.60	63,5	136,3	11,7	27,1	25–30	anisotrop	25,6	29,3
340.374	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 54.60-62.60	63,5	134,2	11,5	27,0	25–30	anisotrop	21,2	19,5
340.388	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 68.00	63,2	146,8	12,6	27,4	20–30	anisotrop	6,8	7,0
340.416	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 96.00	63,2	147,2	12,7	27,6	20–30	isotrop	36,7	26,8

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	Eigenschaften des Probestücks							
			Durchmesser	Höhe	Gewichtskraft	Raumgewicht γ	Schieferungs-winkel	Bruch in Bezug zur Schieferung	Einaxiale Druckfestigkeit UCS	E-Modul E_{50}
			[mm]	[mm]	[N]	[kN/m³]	[°]	[-]	[MPa]	[GPa]
340.418	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 98.00	63,2	149,7	12,3	26,3	20–30	anisotrop	1,3	–
340.437	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 117.80-125.60	63,5	135,3	11,9	27,8	25–30	anisotrop	52,3	47,5
340.437	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 117.80-125.60	63,5	139,3	11,5	26,0	25–30	anisotrop	55,3	50,5
340.452	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 132.00	63,2	149,0	12,5	26,7	20–30	anisotrop	42,3	31,9
340.563	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 242.95-250.65	63,5	135,7	11,6	27,0	25–30	anisotrop	35,3	28,9
340.563	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 242.95-250.65	63,5	135,5	11,4	26,5	25–30	anisotrop	81,2	53,7
340.574	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 254.50	63,2	149,5	12,7	27,3	20–30	anisotrop	18,2	21,9
340.575	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 255.50	63,2	140,7	12,2	27,5	20–30	anisotrop	18,8	18,2
340.609	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 289.80-297.70	63,5	138,7	11,0	25,2	40–45	anisotrop	21,8	18,0
340.641	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 321.00	63,2	141,0	11,7	26,4	20–30	anisotrop	43,7	16,4

Anhang 13-s: Resultate der triaxialen Druckversuche (mit konstantem Seitendruck).

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	Eigenschaften des Probestücks						Vertikalspannung σ1	Radialspannung σ3	E-Modul E_{50}
			Durchmesser	Höhe	Gewichtskraft	Raumgewicht	Schieferungs-winkel	Bruch in Bezug zur Schieferung			
			[mm]	[mm]	[N]	[kN/m³]	[°]	[-]	[MPa]	[MPa]	[GPa]
238.650	B-SBVC	GbC-SE-01 Bm. 35.15-35.5	63,4	141,0	12,9	29,0	20	isotrop	91,1	5,0	22,8
238.650	B-SBVC	GbC-SE-01 Bm. 35.15-35.5	63,4	138,0	13,1	30,0	20	isotrop	184,4	10,0	52,3
238.684	GStab	GbC-SE-01 Bm. 69.6-71.5	63,4	135,7	11,7	27,3	53	anisotrop	69,0	5,0	18,7
238.684	GStab	GbC-SE-01 Bm. 69.6-71.5	63,4	138,1	11,8	27,3	53	anisotrop	83,0	10,0	23,4
238.757	GStab	GbC-SE-01 Bm142.5-144.5	63,4	143,0	11,8	26,1	10	isotrop	109,0	5,0	34,3
238.757	GStab	GbC-SE-01 Bm142.5-144.5	63,4	138,7	11,6	26,6	10	isotrop	124,4	10,0	32,0
240.494	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 20.00-20.50	63,4	139,5	12,0	27,2	–	anisotrop	47,9	4,0	18,2
240.494	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 20.00-20.50	63,4	139,5	12,0	27,2	–	anisotrop	56,8	8,0	16,2
240.494	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 20.00-20.50	63,4	137,4	11,6	26,7	–	anisotrop	145,4	8,0	46,6
240.530	GStab	GbC-Sarè-SE-01 TM. 56.30-58.00	63,5	136,6	11,3	26,1	20–30	anisotrop	119,9	4,0	62,5
240.530	GStab	GbC-Sarè-SE-01 TM. 56.30-58.00	63,5	136,7	11,3	26,1	20–30	anisotrop	124,3	8,0	56,0
240.530	GStab	GbC-Sarè-SE-01 TM. 56.30-58.00	63,5	135,8	11,3	26,3	20–30	anisotrop	149,2	12,0	48,9
240.535	OGBern	GbC-Sarè-SE-01 TM. 61.00-64.00	63,5	134,9	11,2	26,2	25–30	anisotrop	99,8	4,0	51,2
240.535	OGBern	GbC-Sarè-SE-01 TM. 61.00-64.00	63,5	135,1	11,1	26,0	25–30	anisotrop	92,1	8,0	46,0
240.535	OGBern	GbC-Sarè-SE-01 TM. 61.00-64.00	63,5	134,4	11,1	26,0	25–30	anisotrop	123,5	8,0	49,1
240.535	GStab	GbC-Sarè-SE-01 TM. 121.00-129.00	63,5	139,5	11,8	26,6	30	anisotrop	58,8	4,0	51,3
240.535	GStab	GbC-Sarè-SE-01 TM. 121.00-129.00	63,5	137,3	11,7	26,9	30	anisotrop	92,7	8,0	61,8
240.662	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 188.25-189.00	63,1	140,3	11,7	26,7	–	anisotrop	26,9	4,0	9,4
240.662	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 188.25-189.00	63,1	140,3	11,7	26,7	–	anisotrop	33,2	8,0	9,9
240.676	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 202.60-203.00	63,1	140,3	11,7	26,7	–	anisotrop	20,3	4,0	–
240.676	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 202.60-203.00	63,1	140,3	11,7	26,7	–	anisotrop	30,5	8,0	–
240.682	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 208.20-209.00	62,3	135,4	11,5	26,9	–	anisotrop	34,3	4,0	15,0
240.682	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 208.20-209.00	62,3	135,4	11,5	26,9	–	anisotrop	45,8	8,0	19,5
240.682	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 208.20-209.00	63,3	141,7	11,9	26,8	–	anisotrop	38,8	8,0	11,0
335.074	PGC	GbC-NO-SPS-01 TM. 80.55-86.60	63,5	137,0	11,4	26,2	30–35	anisotrop	47,2	8,0	20,2
335.074	PGC	GbC-NO-SPS-01 TM. 80.55-86.60	63,5	134,6	11,2	26,2	30–35	anisotrop	48,0	4,0	26,9
335.054	PGC	GbC-NO-SPS-01 TM. 104.00-105.00	63,5	135,0	11,4	26,6	30–35	anisotrop	93,8	4,0	53,0
335.051	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 107.00-109.70	63,5	137,6	11,8	27,1	30–35	anisotrop	125,3	4,0	84,2
335.014	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	63,5	134,6	11,6	27,2	55–60	anisotrop	305,9	4,0	97,1
335.013	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	63,5	136,5	11,2	25,9	55–60	anisotrop	255,1	4,0	98,2
335.011	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	63,5	134,9	11,2	26,1	55–60	anisotrop	268,5	8,0	97,4
335.007	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 150.60-155.80	63,5	138,0	11,8	26,9	40–50	anisotrop	216,3	8,0	96,6
335.006	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 150.60-155.80	63,5	135,0	11,5	26,8	40–50	isotrop	187,3	4,0	93,8
334.928	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 225.60-231.50	63,5	138,0	11,9	27,2	60–70	anisotrop	88,9	4,0	79,6
334.922	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 231.50-237.20	63,5	135,7	11,6	27,1	60–70	anisotrop	123,0	4,0	77,7
334.099	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 35.2-87.5	63,4	127,7	10,7	26,5	60	anisotrop	93,7	5,0	43,3
334.099	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 35.2-87.5	63,4	130,6	11,0	26,6	60	anisotrop	128,7	10,0	47,2
334.092	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 42.2-52.5	63,4	137,5	11,3	26,0	50	anisotrop	82,8	5,0	28,5
334.092	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 42.2-52.5	63,4	138,3	11,3	25,8	50	anisotrop	112,3	10,0	16,6
334.060	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 74.0-76.0	63,4	129,5	10,6	25,9	55	anisotrop	88,7	5,0	38,3
334.060	OGC	GbC-NO SPS-02 Bm 74.0-76.0	63,4	129,7	10,4	26,1	55	anisotrop	110,8	10,0	42,3
333.255	PGC	GbC-NO-SPS-03 TM. 9.00-14.00	63,5	137,0	11,4	26,4	20–30	anisotrop	40,2	4,0	16,9
331.794	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 23.00-24.00, 24.30-24.50	63,3	129,4	11,2	27,6	25–30	anisotrop	44,1	4,0	47,7
331.794	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 23.00-24.00, 24.30-24.50	63,3	129,4	11,2	27,6	25–30	anisotrop	31,5	8,0	29,9
331.794	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 23.00-24.00, 24.30-24.50	63,3	136,1	11,9	27,7	25–30	anisotrop	51,4	8,0	29,7
331.762	OGC	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 53.66-61.44	63,5	138,4	11,9	27,1	20–25	anisotrop	168,7	4,0	101,2
331.761	OGC	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 53.66-61.44	63,5	136,0	11,6	27,0	20–25	anisotrop	184,9	8,0	93,1
331.759	OGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 57.88-59.50	63,4	129,5	11,0	27,0	25–30	anisotrop	129,8	4,0	43,0
331.759	OGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 57.88-59.50	63,4	129,5	11,0	27,0	25–30	anisotrop	134,7	8,0	53,2
331.759	OGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 57.88-59.50	63,5	128,7	10,7	26,3	25–30	anisotrop	129,5	8,0	41,1
331.758	OGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 58.70-59.50	63,3	133,8	11,2	26,7	15–20	anisotrop	137,9	4,0	50,5
331.758	OGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 58.70-59.50	63,3	133,8	11,2	26,7	15–20	anisotrop	137,2	8,0	29,8

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	Eigenschaften des Probestücks						Vertikalspannung σ1	Radialspannung σ3	E-Modul E_{50}
			Durchmesser	Höhe	Gewichtskraft	Raumgewicht	Schieferungs-winkel	Bruch in Bezug zur Schieferung			
			[mm]	[mm]	[N]	[kN/m³]	[°]	[-]	[MPa]	[MPa]	[GPa]
331.758	OGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 58.70-59.50	63,7	132,3	11,3	26,7	15–20	anisotrop	136,1	8,0	49,9
331.717	GCornub	GbC-NO-12A.1-01 Bm 99.73-100.20	63,7	137,2	11,5	26,2	20–25	anisotrop	116,6	4,0	43,3
331.717	GCornub	GbC-NO-12A.1-01 Bm 99.73-100.20	63,7	137,2	11,5	26,2	20–25	anisotrop	106,1	8,0	27,8
331.717	GCornub	GbC-NO-12A.1-01 Bm 99.73-100.20	63,7	137,2	11,4	26,0	20–25	anisotrop	99,8	8,0	35,1
331.714	GCornub	GbC-NO-12A.1-01 Bm 103.50-103.80	63,7	134,4	11,3	26,3	20–25	anisotrop	124,3	4,0	54,4
331.714	GCornub	GbC-NO-12A.1-01 Bm 103.50-103.80	63,7	134,4	11,3	26,3	20–25	anisotrop	135,1	8,0	53,0
331.702	GCornub	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 114.79-122.45	63,5	136,6	11,3	26,2	20–25	anisotrop	63,2	4,0	43,5
331.701	GCornub	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 114.79-122.45	63,5	139,1	11,5	26,2	20–25	anisotrop	102,9	8,0	65,0
331.700	GCornub	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 114.79-122.45	63,5	138,9	11,5	26,2	20–25	anisotrop	180,3	12,0	76,6
331.648	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 169.50-170.50	63,7	132,4	11,1	26,4	40–45	anisotrop	25,7	4,0	18,3
331.648	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 169.50-170.50	63,7	132,4	11,1	26,4	40–45	anisotrop	37,0	8,0	24,6
331.646	PGC	GbC-NO-ZD12A1-01 TM. 168.35-176.05	63,5	137,2	11,7	26,8	30–35	anisotrop	35,7	4,0	49,3
340.340	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 20.00	63,5	139,9	11,9	27,0	25–30	anisotrop	55,7	4,0	65,0
340.374	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 54.60-62.60	63,5	1383,0	11,9	27,1	25–30	anisotrop	50,8	4,0	77,3
340.374	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 54.60-62.60	63,5	137,0	11,8	27,2	25–30	anisotrop	53,5	8,0	30,2
340.374	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 54.60-62.60	63,5	137,2	11,8	27,1	25–30	anisotrop	89,5	12,0	47,9
340.437	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 117.80-125.60	63,5	137,7	11,6	26,5	25–30	anisotrop	91,3	4,0	98,5
340.563	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 242.95-250.65	63,5	126,3	10,8	27,1	25–30	anisotrop	49,1	4,0	32,2
340.575	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 255.50	63,0	142,3	12,1	27,3	20–30	anisotrop	30,2	4,0	–
340.609	GStab	GbC-Sarè-SO-01 TM. 289.80-297.70	63,5	136,0	11,5	26,7	25–30	anisotrop	31,4	4,0	19,7
340.641	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 321.00	63,1	145,5	12,1	26,6	20–30	anisotrop	71,3	4,0	22,2

Anhang 13-t: Resultate der triaxialen mehrstufigen Druckversuche, undrainiert mit variablem Seitendruck, Institut für Geotechnik ETHZ [1] nicht-lineare Parameter abhängig von der Gesteinseigenschaften.

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	Eigenschaften des Probestücks						Mohr-Coulomb		Hoek-Brown		1. Stufe			2. Stufe			3. Stufe		
			Durchmesser	Höhe	Gewichtskraft	Raumgewicht	Schieferungswinkel	Bruch in Bezug zur Schieferung	Reibungswinkel Φ	Kohäsion c	m [1]	Einaxiale Druckfestigkeit σ_c	Radialspannung σ_3	Vertikalspannung σ_1	E-Modul	Radialspannung σ_3	Vertikalspannung σ_1	E-Modul	Radialspannung σ_3	Vertikalspannung σ_1	E-Modul
			[mm]	[mm]	[N]	[kN/m3]	[°]	[-]	[°]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]
–	LVC	GbC-SE-LVC-01-16.03	63,5	124,5	–	24,8	38,0	paral-lel	–	–	1,335	2,693	2,0	5,2	0,9	4,0	8,3	0,6	8,0	13,3	0,8

Anhang 13-u: Resultate der triaxialen mehrstufigen Druckversuche mit variablem Seitendruck, unter drainierten Bedingungen, Institut für Geotechnik ETHZ und in Malaguti et al. (Malaguti et al. 2003). [1] nichtlineare Parameter abhängig von den Gesteinseigenschaften.

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	Eigenschaften des Probestücks						Mohr-Coulomb		Hoek-Brown		E-Moduli			
			Durchmesser	Höhe	Gewichtskraft	Schieferungs-winkel	Durchlässigkeits-wert k	Bruch in Bezug zur Schieferung	Effektiver Reibungswinkel φ'	Effektive Kohäsion c'	m [1]	Effektive Einaxiale Druckfestigkeit σc'	1. Stufe	2. Stufe	3. Stufe	4. Stufe
			[mm]	[mm]	[kN/m³]	[°]	[m/s]	[°]	[°]	[MPa]	[-]	[MPa]	[GPa]			
237.471	LVC	GbC-SE-1088-R	85,0	170	23,8	–	3.2×10^{-9}	–	30,8	0,67	3,094	2,348	1,4	2,3	3,8	5,5
–	LVC	SIG_1603	63,6	127	24,5	38	n/a	parallel	22,7	0,63	2,284	1,933	–	–	5,4	6,3
–	LVC	SIG_1680	63,9	121	24,7	–	1.2×10^{-10}	–	25,4	0,00	2,554	0,000	–	2,7	3,5	n/a
–	LVC	SIG_1720	63,09	124	26,0	27	7.7×10^{-11}	–	20,4	0,15	2,138	0,456	1,5	1,8	3,5	n/a

SIG_1720 Borehole LVC-01, Tm 17.20

Rock type: Kakirite fault-breccia, homogeneous anisotropic (isoriented fabric). Original rock: Gneiss Giumello.

range [MPa]	linearisation		Coulomb failure criterion isotrope α 27		anisotrope β 27	
	$m = \Delta\sigma_1'/\Delta\sigma_3'$	σ_D' [MPa]	φ' [°]	c' [MPa]	φ_s' [°]	c_s' [MPa]
1 - 3	2.187	0.370	-	-	21.1	0.120
3 - 6	2.109	0.605	-	-	20.1	0.199
lin. regr.	2.138	0.456	-	-	**20.4**	**0.150**

Elastic modulus E=1.5/1.8/**3.5**GPa (σ3=6MPa)

GbC-SE-1088-R-Nr.1 Excavation face Tm 1088

Rock type: Kakirite fault-breccia, homogeneous, isotropic (non oriented fabric)

range [MPa]	linearisation		Coulomb failure criterion isotrope α -		anisotrope β -	
	$m = \Delta\sigma_1'/\Delta\sigma_3'$	σ_D' [MPa]	φ' [°]	c' [MPa]	φ_s' [°]	c_s' [MPa]
2 - 4	3.352	1.591	32.7	0.435	-	-
4 - 8	3.044	2.815	30.4	0.807	-	-
8 - 12	3.053	2.746	30.4	0.786	-	-
lin. regr.	3.094	2.348	**30.8**	**0.667**	-	-

Elastic modulus E=1.4/2.3/**3.8**/5.5GPa (σ3=8MPa)

SIG_1603-2 Borehole LVC-01, Tm 16.03

Rock type: Kakirite fault-breccia, inhomogeneous (presence of black kakiritic band) anisotropic (isoriented fabric). Original rock: Gneiss Giumello.

range [MPa]	linearisation		Coulomb failure criterion isotrope α 38		anisotrope β 38	
	$m = \Delta\sigma_1'/\Delta\sigma_3'$	σ_D' [MPa]	φ' [°]	c' [MPa]	φ_s' [°]	c_s' [MPa]
2 - 4	2.987	0.000	-	-	28.8	0.000
4 - 8	2.002	3.903	-	-	19.4	1.373
8 - 12	2.355	1.075	-	-	23.5	0.345
lin. regr.	2.284	1.933	-	-	**22.7**	**0.631**

Elastic modulus E=-/-/**5.4**/6.3GPa (σ3=8MPa)

SIG_1680 Borehole LVC-01, Tm 16.80

Rock type: Kakirite fault-breccia, homogeneous (black kakirite), isotropic (non oriented fabric). Original rock: Gneiss Giumello.

range [MPa]	linearisation		Coulomb failure criterion isotrope α -		anisotrope β -	
	$m = \Delta\sigma_1'/\Delta\sigma_3'$	σ_D' [MPa]	φ' [°]	c' [MPa]	φ_s' [°]	c_s' [MPa]
1 - 3	2.410	0.002	24.4	0.001	-	-
3 - 6	2.638	0.000	25.4	0.000	-	-
lin. regr.	2.554	0.000	**25.4**	**0.000**	-	-

Elastic modulus E=-/2.7/**3.5 GPa** (σ3=6MPa)

Triax test summary sheet on fault-breccia type kakiritic fault rock (LVC type 2) performed by the laboratory of the Institute of Geotechnical Engineering, underground excavations, ETH Zurich.

Anhang 13-v: Resultate der Direktscherversuche auf Trennflächen.

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	Eigenschaften des Probestücks				Scherfestigkeit						Scherwinkel	Scheinbare Kohäsion
			Queschnittsform	Abmessungen	Art der Trennfläche	Scherwinkel/ Schieferung	Normalspannung σ_{n1}	Scherspannung $\sigma_{t1,\,max}$	Normalspannung σ_{n2}	Scherspannung $\sigma_{t2,\,max}$	Normalspannung σ_{n3}	Scherspannung $\sigma t_{3,\,max}$		
			[-]	[mm]	[-]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]	[MPa]
240.535	GStab	GbC-Sarè-est-01 Bm. 133.60-133.80	elliptisch	70,0×63,4	Kluftfläche	0	2,0	1,3	4,0	2,8	6,0	3,9	33,0	0,1
–	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	rechteckig	35,5×53,0	Schieferungs-fläche	0	3,0	2,3	5,0	3,7	7,0	5,2	36,0	0,1
–	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	rechteckig	40,0×52,0	Schieferungs-fläche	0	3,0	2,0	5,0	4,1	7,0	5,9	39,0	0,0
–	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	rechteckig	46,5×60,0	Kluftfläche	65	2,0	2,7	4,0	4,0	6,0	5,9	39,0	1,0
–	B-UBC	GbC-NO-SPS-01 TM. 144.70-150.60	rechteckig	53,5×59,0	Kluftfläche	60	2,0	2,2	3,0	2,2	–	–	–	–
331.801	PGC	GbC-NO-12A.1-01 Bm 16.50-17.50	elliptisch	102,5×62,9	Kluftfläche	0	2,0	1,4	4,0	2,2	6,0	3,2	25,0	0,4
340.586	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 266.60	elliptisch	98,0×63,0	Kluftfläche	0	2,0	0,9	4,0	1,3	6,0	1,6	9,0	0,6
340.587	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 267.00	Kreis	63,0×63,0	gesägte Fläche	90	2,0	0,9	4,0	0,9	–	–	–	–
340.663	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 343.00	Kreis	63,0×63,0	gesägte Fläche	90	2,0	1,3	4,0	2,9	6,0	4,5	36,0	0,0

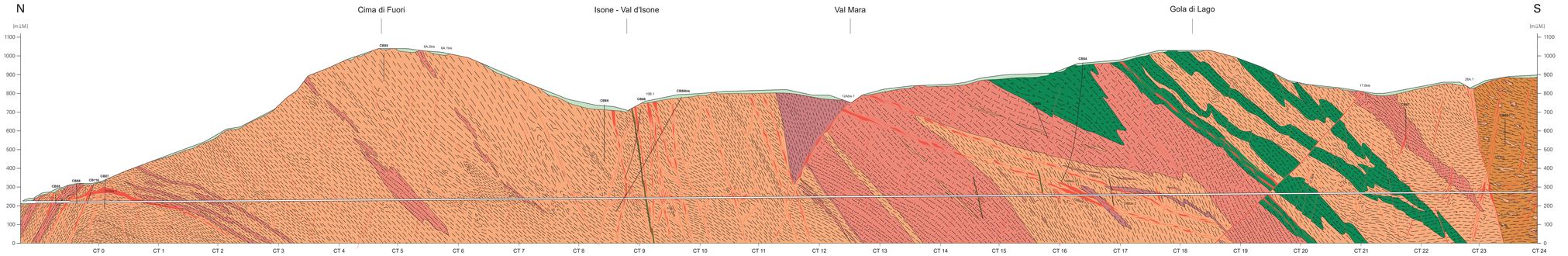
Anhang 13-w: Resultate der Spaltzugfestigkeitsversuche.

km	Geologische Formation	Proben-Nr.	Eigenschaften des Probestücks					Zugfestigkeit σ_t
			Durchmesser	Länge	Gewichtskraft	Raumgewicht	Schieferungs-winkel	
			[mm]	[mm]	[N]	[kN/m³]	[°]	[MPa]
340.388	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 68.00	63,2	50,7	4,3	27,0	20–30	1,9
340.416	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 96.00	63,2	47,8	4,1	27,5	20–30	1,3
340.418	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 98.00	63,2	41,7	3,5	26,8	20–30	1,1
340.574	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 254.50	63,2	48,0	4,1	27,3	20–30	1,5
340.575	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 255.50	63,2	46,8	3,9	26,4	20–30	0,7
340.641	GStab	GbC-Sarè-SO-01 Bm 321.00	63,2	46,5	3,8	26,3	20–30	4,3

ISSN 1661-9285
ISBN 978-3-302-40113-3

Geologisches Befundprofil durch die Oströhre
1:10 000

Nordteil

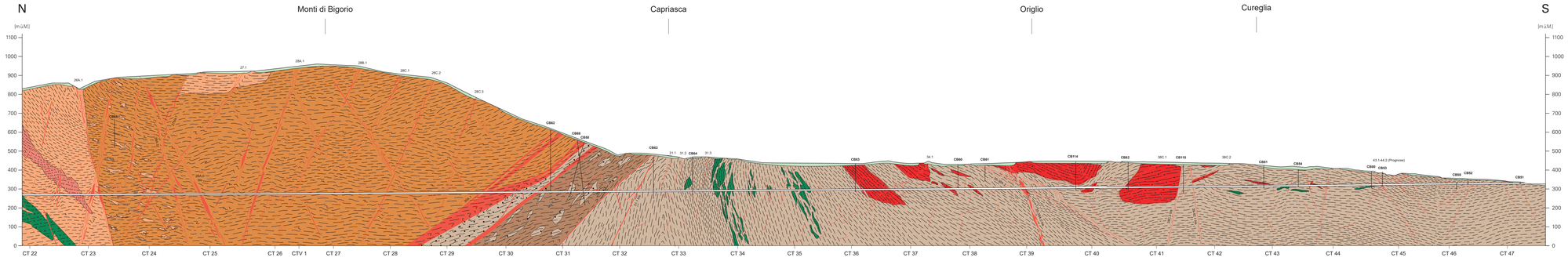


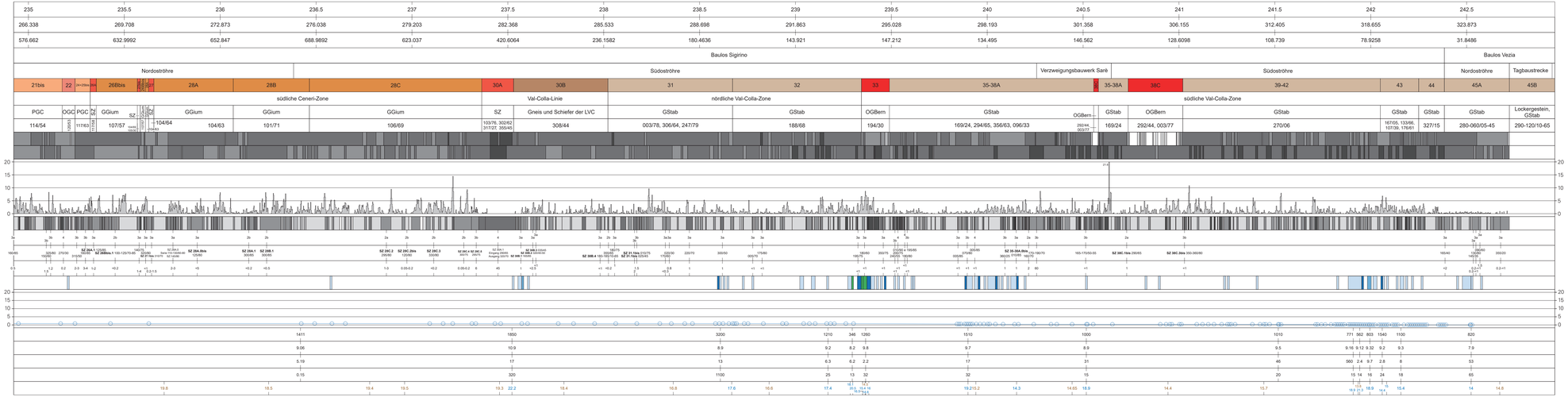
Kilometrierung			km
Projekthöhe (Schienenoberkante)			m ü. M.
Gesteinsüberlagerung			m
Baulose			-
Hauptbauwerke			-
Homogenbereiche			-
Geologie	Tektonische Einheit		-
	Formation		-
	Schieferung		360°/90°
	Bankung		-
	Durchtrennungsgrad		-
	Geologische Überprofile		m³/m'
	Zerscherungsgrad		-
	Störungszonen	Klassifizierung	-
		Orientierung	360°/90°
		Effektive Mächtigkeit	m
Hydrogeologie	Schüttungsmengen	Initiale Schüttungsmengen	-
		Stationäre Schüttungsmengen	l/s
	Wasserchemismus	Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm
		pH-Wert	pH
		Chlorid	mg/l
		Sulfat	mg/l
	Wasser- und Felstemperatur	Wassertemperatur / Felstemperatur	°C

© 2020 Bundesamt für Landestopografie swisstopo, CH-3084 Wabern

Geologisches Befundprofil durch die Oströhre
1:10 000

Südteil





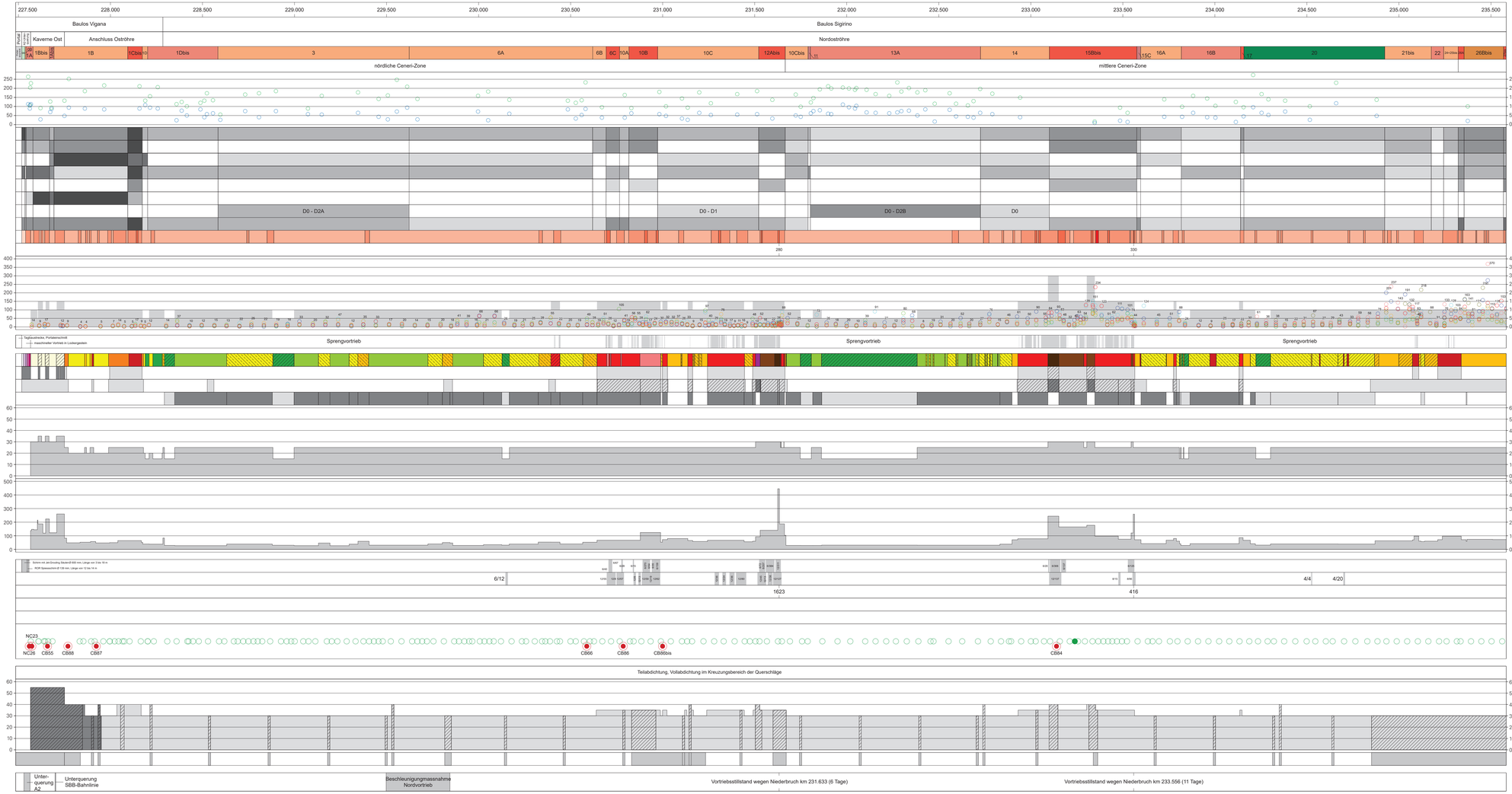
km	235	235.5	236	236.5	237	237.5	238	238.5	239	239.5	240	240.5	241	241.5	242	242.5
m ü. M.	266.338	269.708	272.873	276.038	279.203	282.368	285.533	288.698	291.863	295.028	298.193	301.358	306.155	312.405	318.655	323.873
m	576.662	632.9992	652.847	688.9892	623.037	420.6064	236.1582	180.4636	143.921	147.212	134.495	146.562	128.6098	108.739	78.9258	31.8486
-	21bis	22	26Bbis	28A	28B	28C	30A	30B	31	32	33	35-38A	35-38A	38C	39-42	43	44	45A	45B
-	PGC	OGC	PGC	GZ	GGium	SZ	GGium	GGium	GGium	GStab	GStab	OGBern	GStab	OGBern	GStab	GStab	GStab	GStab	Lockergestein, GStab
Formation	114/54	117/63	107/57	104/64	104/63	101/71	106/69	103/76, 302/62 317/27, 355/45	308/44	003/78, 306/64, 247/79	188/68	194/30	169/24, 294/65, 356/63, 096/33	169/24	292/44, 003/77	270/06	167/55, 133/66, 107/39, 176/61	327/15	280-060/05-45	290-120/10-65
Schieferung																				
Bankung																				
Durchtrennungsgrad																				
m³/m'																				
Zerscherungsgrad																				
Klassifizierung																				
Orientierung																				
Effektive Mächtigkeit																				
Initiale Schüttungsmengen																				
Stationäre Schüttungsmengen																				
Elektrische Leitfähigkeit	1411					1850			3200	1210	346	1260	1510		1000	1010	771 562 603 1540 1100		820	
pH-Wert	9.06					10.9			8.9	9.2	8.2	9.8	9.7		8.9	9.5	9.16 9.12 9.32 9.2 9.3		7.9	
Chlorid	5.19					17			13	6.3	6.2	2.2	17		31	46	560 2.4 9.7 2.8 8		53	
Sulfat	0.15					320			1100	25	13	32	32		15	20	15 14 16 24 18		65	
Wassertemperatur	19.8			18.5		19.4	19.5		19.3	22.2	18.4		16.8	17.6	16.6	17.4	18.9 21.5 18.9 14.4		15.4	14	14.8
Felstemperatur																				

km	Kilometrierung		
m ü. M.	Projekthöhe (Schienenoberkant)		
m	Gesteinsüberlagerung		
-	Baulose		
-	Hauptbauwerke		
-	Homogenbereiche		
-	Tektonische Einheit		Geologie
-	Formation		Geologie
360°/90°	Schieferung		Geologie
-	Bankung		Geologie
-	Durchtrennungsgrad		Geologie
m³/m'	Geologische Überprofile		Geologie
-	Zerscherungsgrad		Geologie
-	Klassifizierung	Störungszonen	Geologie
360°/90°	Orientierung	Störungszonen	Geologie
m	Effektive Mächtigkeit	Störungszonen	Geologie
-	Initiale Schüttungsmengen	Schüttungsmengen	Hydrogeologie
l/s	Stationäre Schüttungsmengen	Schüttungsmengen	Hydrogeologie
µS/cm	Elektrische Leitfähigkeit	Wasserchemismus	Hydrogeologie
pH	pH-Wert	Wasserchemismus	Hydrogeologie
mg/l	Chlorid	Wasserchemismus	Hydrogeologie
mg/l	Sulfat	Wasserchemismus	Hydrogeologie
°C	Wassertemperatur / Felstemperatur	Wasser- und Felstemperatur	Hydrogeologie

© 2020 Bundesamt für Landestopografie swisstopo, CH-3084 Wabern

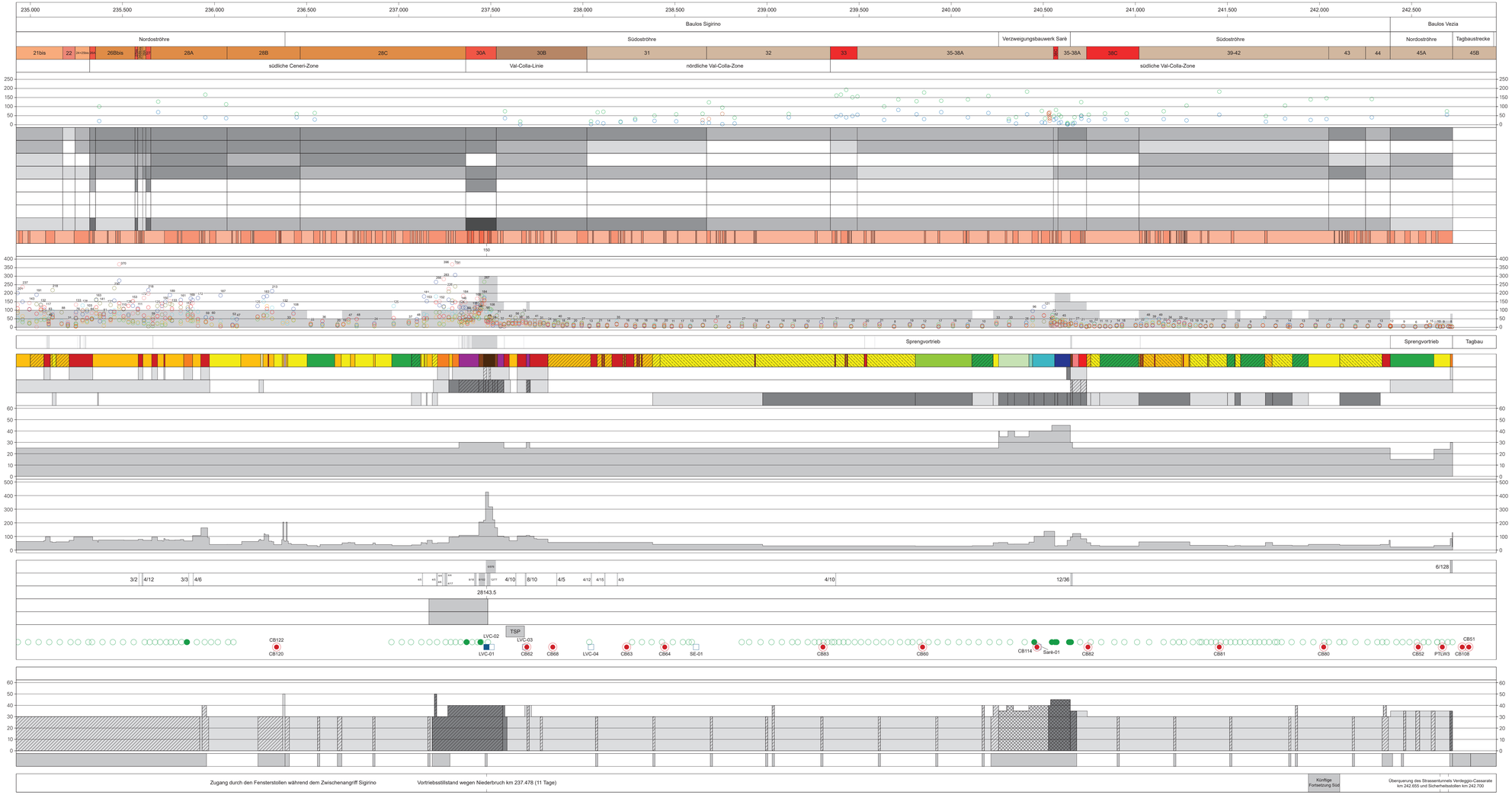
Geologisches Befundprofil durch die Oströhre
1:10 000
Nordteil

Kilometrierung			km
Baulose			-
Hauptbauwerke			-
Homogenbereiche			-
Tektonische Einheit			-
Geotechnik	Gesteinsfestigkeit	Punktlastversuche Schieferungsparallele Festigkeit Schieferungsenkrechte Festigkeit Druckfestigkeitsversuche Einaxiale Druckfestigkeitsversuche	N/mm 2
	Ereignisse	Kleinsteinfall	-
		Auflockerung	-
		Ablösungen	-
		Kluftkörper	-
		Plastische Verformungen	-
		Wassereinbrüche	-
		Entspannungsschläge	-
		Ortsbrustinstabilität	-
	Standfestigkeit des Gebirges		-
	Niederbrüche		m 3
	3D Verformungen	Position des Messpunktes: FP, KO, KW, PO, PW, KU, KW FP = Firstpunkt K = Kämpfer P = Parament KI = Kicker O = Ost W = West Vertraglich maximal zugelassene Verformung	mm
Vortriebsart		Vortrieb durch Abbauhammer	-
Ausbruchsicherung	Eingebaute Ausbruchsicherungstypen		-
	Stahlbewehrung	TH Bögen, Gitterbögen, Schätze	-
	Geometrie des Ausbruchprofils	mit flacher Sohle, mit gewölbter Sohle, kreisförmig, mit Bögen im Sohlgewölbe	-
	Stahlfaserspritzbeton ersetzt:	ein Bewehrungsnetz, beide Bewehrungsnetze	-
	Spritzbetonstärke in der Aussenschale		cm
	Anker, inklusiv Nachankerung		m/m'
Bauhilfsmassnahmen / Vorauserkundungen	Stabilisierungsmassnahmen	Spiesse (Länge der Spiesse / Anzahl)	m/-
		Ortsbrustanker (Länge der Anker / Anzahl)	m/-
	Zusatzmassnahmen	Injektionen	kg/m 3
		Nachprofilierung des Gewölbes	-
		Nachprofilierung der Sohle	-
	Vorauserkundungen	Sondierbohrungen: Schlagbohrung / radial, Kernbohrung / radial, Kernbohrung (Projektphase); Seismik: TSP	-
Ausbau	Abdichtung		-
	Gewölbe	Ohne Bewehrung, Mit Brandschutz (PP Fasern), Mit Bewehrung, Bewehrter Spritzbeton	cm
	Sohlbeton	Ohne Bewehrung, Mit Bewehrung	-
Bemerkungen			-



© 2020 Bundesamt für Landestopografie swisstopo, CH-3084 Wabern

Geologisches Befundprofil durch die Oströhre
1:10 000
Südteil



km	Kilometrierung		
-	Baulose		
-	Hauptbauwerke		
-	Homogenbereiche		
-	Tektonische Einheit		
N/mm²	Punktlastversuche: Schieferungsparallele Festigkeit; Schieferungssenkrechte Festigkeit Druckfestigkeitsversuche: Einaxiale Druckfestigkeitsversuche	Gesteinsfestigkeit	Geotechnick
-	Kleinsteinfall	Ereignisse	
-	Auflockerung		
-	Ablösungen		
-	Kluftkörper		
-	Plastische Verformungen		
-	Wassereinbrüche		
-	Entspannungsschläge		
-	Ortsbrustinstabilität		
-	Standfestigkeit des Gebirges		
m³	Niederbrüche		
mm	Position des Messpunktes: FP, KO, KW, PO, PW, KUO, KUW FP = Firstpunkt; K = Kämpfer; P = Parament; KU = Kicker; O = Ost; W = West Vertraglich maximal zugelassene Verformung	3D Verformungen	
-	Vortrieb durch Abbauhammer	Vortriebsart	
-	Eingebaute Ausbruchsicherungstypen		Ausbruchsicherung
-	TH Bögen; Gitterbögen; Schlitze	Stahlbewehrung	
-	mit flacher Sohle; mit gewölbter Sohle; kreisförmig; mit Bögen im Schlitzgewölbe	Geometrie des Ausbruchprofils	
-	Stahlfaserspritzbeton ersetzt: ein Bewehrungsnetz; beide Bewehrungsnetze		
cm	Spritzbetonstärke in der Aussenschale		
m/m'	Anker, inklusiv Nachankerung		
m/-	Spiesse (Länge der Spiesse / Anzahl)	Stabilisierungsmassnahmen	Stabilisierungsmassnahmen / Voraussetzungen
m/-	Ortsbrustanker (Länge der Anker / Anzahl)		
kg/m³	Injektionen	Zusatzmassnahmen	
-	Nachprofilierung des Gewölbes		
-	Nachprofilierung der Sohle		
-	Sondier-bohrungen; Schlagbohrung / radial; Kernbohrung / radial; Kernbohrung (Projektphase); Seismik; TSP	Vorauserkundungen	
-	Abdichtung		Ausbau
-	Ohne Bewehrung; Mit Brandschutz (PP Fasern); Mit Bewehrung; Bewehrter Spritzbeton	Gewölbe	
-	Ohne Bewehrung; Mit Bewehrung	Sohlbeton	
-	Bemerkungen		

© 2020 Bundesamt für Landestopografie swisstopo, CH-3084 Wabern

Legende zu Tafel I a – d

Geologie

- Quartärablagerungen, undifferenziert
- Giumello-Gneis (GGium)
- Ceneri-Paragneis (PGC) / idem, Amphibol führend
- Hornfels (GCornub)
- Ceneri-Orthogneis (OGC)
- Amphibolit, Amphibol führender Gneis oder Schiefer (B-UBC)
- Basischer Gang
- Phyllonit, Mylonit und Ultramylonit der LVC (LVC-FM)
- Gneis und Schiefer, z.T. ähnlich wie Stabbiello-Gneis (LVC-GS)
- Stabbiello-Gneis (GStab)
- Bernardo-Orthogneis (OGBern)
- Amphibolit, Amphibol führender Gneis oder Schiefer (B-SBVC)
- Störungszone / Störung

Bankung

- ungebankt, > 1000 cm
- grob bis sehr grob gebankt, 50 – 1000 cm
- gebankt, 15 – 50 cm
- dünn gebankt, 5 – 15 cm
- plattig, 0.5 – 5 cm
- schiefrig bis phyllitisch < 0.5 cm

Durchtrennungsgrad

- ungeklüftet, massiv
- gering, durch die Bankung bestimmt, z.B. plattig
- grob - sehr grob, grobe Blöcke > 10 m³
- mässig, Blöcke 1–10 m³
- intensiv, Quader 3 dm³ – 1 m³
- sehr intensiv, Steingrösse < 3 dm³

Zerscherungsgrad

- ungestört
- vereinzelte Scherflächen, Harnischflächen
- Mylonit, verschiefert (Phyllonit) oder laminiert
- kataklastisches Gestein mit Kakiritanteil < 10%
kataklastisches Gestein mit Kakiritanteil 10 – 40%
- kataklastisches bis kakiritisches Gestein
Kakirit Typ «Störungsbrekzie»
- kakiritisches Gestein mit Anteil an Gesteinsmehl > 60%

Störungszonen, Klassifizierung

- 1 Einzelfläche mit Harnischstriemung < 5 cm
- 2a Mylonit > 100 cm
- 2b kataklastische Störung 5 – 20 cm
- 3a kataklastische Störung > 20 cm oder
kataklastisch-kakiritische Störung 5 – 20 cm
- 3b kataklastisch-kakiritische Störung > 20 cm
oder kakiritische Störung 5 – 20 cm
- 4 kakiritische Störung > 20 cm

Hydrogeologie

Initiale Schüttungsmengen der Quellen

- keine
- 1 – 3 Austritte < 0.1 l/s pro 10 m
- > 3 Austritte < 0.1 l/s pro 10 m
- ≥ 1 Quellen 0.1–1 l/s pro 10 m
- ≥ 1 Quellen 1–10 l/s pro 10 m
- Quelle > 10 l/s

Geotechnik

Ereignisse

- keine oder insignifikante
- gering
- gering – mittel
- mittel
- mittel – hoch
- hoch

Entspannungsschläge

- D0 Leichter Entspannungsschlag
nur mit Geräusch ohne Rissbildung u/o Abschalung
- D1 Mittlerer Entspannungsschlag
mit Geräusch und Rissbildung
- D2A Starker Entspannungsschlag
ohne bautechnische Relevanz
- D2B Starker Entspannungsschlag
mit bautechnischer Relevanz

Standfestigkeit des Gebirges

- standfest bis leicht gebräch
- leicht gebräch
- gebräch
- stark gebräch
- druckhaft

Bautechnik

Baulos Vigana - A2-Unterquerung

- Ca-VLG-Ba
- Ca-VLG-Bb1
- Ca-VLG-Bb2
- Ca-VLG-Bc1
- Ca-VLG-Bc2

Baulos Vigana - Kaverne Ost

- KVa.2
- KVa.3
- KVb.2
- KVb.3
- KVc.2
- KVc.3
- KVd.2
- KVd.3
- KVe.2
- KVe.3

Baulos Vigana - Anschluss Oströhre

- GV.1
- GV.2
- GV.3
- GV.4
- GV.5
- GV.6
- GV.7

Baulos Sigirino - Nordost- und Südoströhre

- SPV 1
- SPV 2
- SPV 2 bis
- SPV 2 bis 2
- SPV 3A
- SPV 3
- SPV 3 bis
- SPV 3 bis 2
- SPV 4
- SPV 4 bis
- SPV 4 bis 2
- SPV 5
- SPV 6A
- SPV 6 Accelerato
- SPV 6
- SPV 6B
- SPV 7
- SPV 9
- SPV 10

Baulos Sigirino - Verzweigungsbauwerk Sarè

- VSO 1.1
- VSO 2.1
- VSO 1.2A
- VSO 2.2A
- VSO 1.3A
- VSO 2.3A

Baulos Sigirino - Spezielle AST

- Tm 119.8-131.8
- Tm 0-6

Baulos Vezia - Nordoströhre

- IVE-1.A
- IVE-2.A
- IVE-3.A
- IVE-4.A
- IVE-5.A

© 2020 Bundesamt für Landestopografie swisstopo, CH-3084 Wabern