

Bewältigung von unerwarteten Störzonen beim TBM-Vortrieb im Gotthard-Basistunnel Baulos Bodio

Alessandro Ferrari, dipl. Ing. ETHZ, Projektleiter Teilabschnitt Bodio

Davide Fabbri, dipl. Ing. ETHZ/SIA, Mitglied der Leitungsequipe

Markus Sidler, dipl. Ing. ETHZ, Projektingenieur

Ingenieurgemeinschaft Gotthard-Basistunnel Süd, Lombardi AG, CH-6648 Minusio

1. Einleitung

Der 15.9 km lange Teilabschnitt Bodio des Gotthard-Basistunnels wurde als bautechnisch günstiger Abschnitt bezeichnet und eignete sich somit besonders für lange mechanische Vortriebe mit offenen Gripper-TBM. Unter diesen Voraussetzungen wurden zuerst im Bauprojekt und später im Ausschreibungsprojekt die für den Vortrieb massgebenden Gefährdungsbilder bestimmt und darüber hinaus die erforderlichen Sicherungsmassnahmen festgelegt.

Im Zuge der TBM-Vortriebe wurden zwei unerwartete Störzonenbereiche von mehreren hundert Metern Länge angetroffen. Diese sowohl durch nachbrüchiges als auch durch druckhaftes Gebirgsverhalten gekennzeichneten Abschnitte konnten dank entsprechender Projekt-

anpassungen beim Vorauserkundungskonzept, bei den Sicherungsmassnahmen und bei der definitiven Tunnelverkleidung erfolgreich bewältigt werden.

2. Geologische Prognose und Befund

In der geologischen Prognose wurden die TBM-Vortriebe des Teilabschnittes Bodio vollständig den Leventina-Gneisen der penninischen Zone zugeordnet. Das Trennflächengefüge des Gebirges bestand aus einer subhorizontalen Schieferung und subvertikal verlaufenden Klüften. Die maximale Überlagerungshöhe beträgt ca. 1000 m. Das Vorhandensein von langen Störzonen mit bautechnisch bedeutender Relevanz und insbesondere mit stark druckhaftem Verhalten war nicht prognostiziert.

1

Sonderdruck

Ferrari A., Fabbri D. & Sidler M. (2007): *"Bewältigung von unerwarteten Störzonen beim TBM-Vortrieb im Gotthard-Basistunnel Baulos Bodio"*; Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken; Internationales Symposium BBT 2007, Innsbruck; 69-77; Innsbruck University Press.

Ausschliesslich einzelne kurze, vertikale und senkrecht zur Tunnelachse auftretende Störzonen mit wenigen Metern Länge waren gemäss geologischer Prognose zu erwarten.

Während der Vortriebsarbeiten wurden jedoch in beiden Tunnelröhren zwei bedeutende Störzonenbereiche angetroffen; einer nach wenigen hundert Metern ab TBM-Start (Tm 2'705) und der andere ca. 1.5 km vor dem Durchschlag mit dem Teilabschnitt Faido (Tm 13'460).

Die erste, subhorizontal verlaufende Störzonen bestand aus einer bis im Meterbereich mächtigen Schicht von Kakiriten, Kataklasiten und stark zerklüftetem Fels (Bild 1).

Der zweite Störzonenbereich war einerseits durch zwei im Grundriss schleifend und im Querschnitt subvertikal zur Tunnelachse liegende kataklastisch-kakiritischen Störzonen (Bild 2) und andererseits – ausserhalb der Störzonen – durch das Vorhandensein von schiefrigen, glimmerreichen Gneisen (im Gegensatz zu den vorherigen porphyrischen Gneisen) gekennzeichnet.

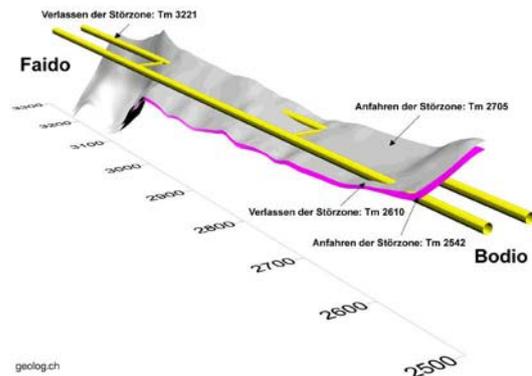


Bild 1: Dreidimensionale Darstellung Störzone „Tm 2'705“

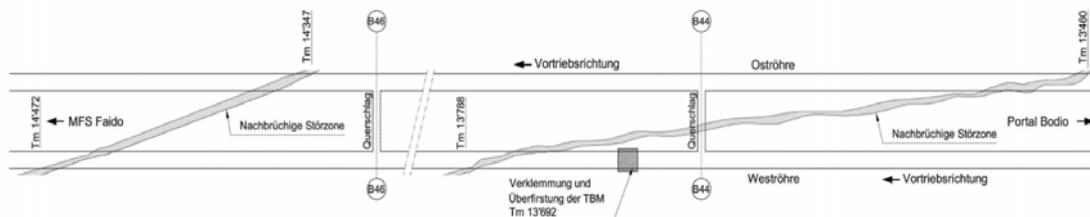


Bild 2: Grundriss Störzonenbereich ab Tm 13'460

3. Gefährdungsbilder und Ausbruchsicherung

Für die TBM-Vortriebe des Teilabschnittes Bodio waren hauptsächlich die Gefährdungsbilder Kleinsteinfall, Niederbruch von Kluffkörpern mit unterschiedlichen Abmessungen und spannungsbedingte Abschaltungen zu erwarten. Im Bauprojekt wurden mehrere Ausbruchsicherungstypen mit unterschiedlichen Sicherungsmassnahmen geplant. Im Weiteren erfolgte die Definition von Kriterien für die Zuordnung der geeigneten Ausbruchsicherungstypen zu den jeweiligen Gefährdungsbildern und geologischen Gegebenheiten (Trennflächenabstand- und -orientierung, Durchtrennungsgrad u.s.w.). Während der Ausführung wurden dann Tag für Tag einvernehmlich zwischen der örtlichen Bauleitung, den Baustellengeologen und dem Unternehmer die einzusetzenden Ausbruchsicherungstypen sowie allfällige Anpassungen und Optimierungen der Anordnung der Sicherungsmittel aufgrund der örtlichen Verhältnisse festgelegt.

Im Allgemeinen hat sich in den Bereichen ausserhalb von Störzonen der kombinierte Einsatz von Reibrohrankern, Bewehrungsnetzen, UNP-Teilbogen und einer im Maschinenbereich L2 aufgetragenen Spritzbetonschicht (i.d.R. 5 cm dick) bewährt (Bild 3).



Bild 3: Ausbruchsicherung im L1-Bereich bestehend aus Reibrohrankern, Bewehrungsnetzen und UNP-Teilbogen

4. Laufende Weiterentwicklung des Vorauserkundungskonzeptes

Obwohl gemäss geologischer Prognose nicht mit Störzonen von bautechnisch grosser Relevanz zu rechnen war, wurde in Anbetracht der Länge der aufzufahrenden Strecke und der verbleibenden Restrisiken für die TBM-Vortriebe des Teilabschnittes Bodio ein Vorauserkundungskonzept entwickelt und umgesetzt. Aufgrund von neuen Erkenntnissen und der gesammelten Erfahrungen ist während den Vortriebsarbeiten das Vorauserkundungskonzept laufend angepasst worden. In der Anfangsphase wurde zuerst die Wirksamkeit einer vortriebsbegleitenden seismischen Erkundung geprüft. Die Anwendung dieser Vorauserkundungsmethode erwies sich hier jedoch als ungeeignet und wurde nach den ersten 1'000 m Vortrieb eingestellt.

Unter Berücksichtigung der kurz nach Aufnahme des Vortriebes in der Oströhre unvorhergesehen angetroffenen, subhorizontal gelegenen, nachbrüchigen Störzone, wurde die Vorauserkundung in der Folge durch systematische, einzelne radiale Schlagbohrungen sowie durch, dem Vortrieb vorausseilende Schlagbohrungen in Längsrichtung erfolgreich sichergestellt. Die Schlagbohrungen erfolgten je nach Lage der TBM jeweils in der vorausseilenden oder in beiden Tunnelröhren, i.d.R. während der Wartungsschichten.

5. Bewältigung der nachbrüchigen Störzone "Tm 2'705"

5.1 Erfahrungen während dem Vortrieb

Nach rund 200 m ab dem Start traf die TBM in der Oströhre eine unerwartete, flachliegende Störzone mit nachbrüchigem Verhalten an. Diese begleitete, vorwiegend im Firstbereich, den Vortrieb auf rund 400 m. Dieselbe Störzone wurde auch mit der TBM West auf etwa 100 m und beim Vortrieb von zwei Querschlägen angefahren. Das Hauptgefährdungsbild während des Vortriebes war der häufige Niederbruch von lockergesteinsähnlichem Material unmittelbar oberhalb dem Bohrkopfschild. Vor allem im Kalottenbereich sind mehrere Hohlräume mit sehr unterschiedlichen Abmessungen entstanden (Bild 4). Diese dehnten sich im Extremfall fast über die ganze Tunnelbreite und erreichten über

Tunnelfirst Höhen bis zu 6.0 m.



Bild 4: Durch Niederbruch entstandener Hohlraum

Der Einbau der Ausbruchsicherung erfolgte vollständig in der L1*-Zone und bestand aus geschlossenen Stahlbogen TH29 alle 1.0 m, Bewehrungsnetzen und ca. 15 cm Spritzbeton. Die vorhandenen Hohlräume wurden während dem Vortrieb im Maschinen- (L1) und im Nachläuferbereich (L2) mit Spritz- und teilweise mit Ortbeton komplett verfüllt.

Der Bohrdurchmesser wurde von 8.80 m auf 8.89 m durch die Kalibervergrößerung der Aussenrollenmeissel aufgeweitet. Um geometrische Konflikte im Bereich der künftigen Gewölbedrainageleitungen zu vermeiden wurden spezielle Stahlbogen TH29 mit einer reduzierten Einbauhöhe im Gewölbefussbereich verwendet. Die Innenschalenstärke beträgt min. 25 cm (Bild 5).

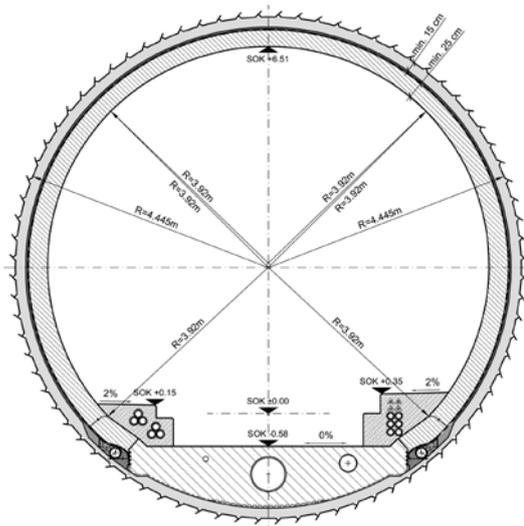


Bild 5: Normalprofil Einspurtunnel TBM-Strecke für schwersten Ausbruchsicherungstyp

Aufgrund der geologisch bedingten Schwierigkeiten und infolge der bei der Startphase der TBM-Vortriebe noch nicht erreichten Routine der Vortriebsmannschaften, konnte bei der Durchfahrung der gesamte Störzone „Tm 2'705“ nur eine mittlere Vortriebsleistung von ca. 2.5 m/AT erreicht werden.

5.2 Bemessung der Innenschale

Die minimal 25 cm dicken Innengewölbe der Einspurtunnelröhren und der Querschläge wurden im Bereich dieser Störzone aus statischen Gründen bewehrt. Die definitiven Sohlen blieben dagegen wie im Regelfall unbewehrt. Im Weiteren wurden aus Gründen des Brandschutzes

in dieser Strecke dem Gewölbebeton der Einspurtunnelröhre 2.0 kg/m³ monofilamentale PP-Fasern zugegeben.

Die Bewehrung wurde aufgrund der aus allen möglichen Kombinationen der Lastfälle Auflockerungsdruck, Eigengewicht, Temperaturschwankungen, Verkehrslasten, u.s.w. resultierenden ungünstigsten Beanspruchungen bemessen. Als Auflockerungsdruck wird in einer solchen nachbrüchigen Störzone das Eigengewicht der Bruchkörper bezeichnet, welche sich aus dem Felsverband lösen können und somit das Innengewölbe im Kalottenbereich belasten. Untersucht wurden, aufgrund der detaillierten Analyse der angetroffenen geologischen Verhältnisse, verschiedene Geometrien von solchen Bruchkörpern mit unterschiedlichen Höhen, Lagen und Ausdehnungen im Profil.

6. Durchquerung von nachbrüchigen und druckhaften Störzonen ab Tm 13'460

6.1 Erfahrungen während dem Vortrieb

Ab ca. Tm 13'460 wurde durch beide TBM-Vortriebe des Teilabschnittes Bodio ein weiterer Störzonenbereich angetroffen. Zwei nicht prognostizierte, nachbrüchige Störzonen wurden zuerst von der Ost- (bei ca. Tm 13'460 und Tm 14'340) und später von der Weströhre (bei ca. Tm 13'745 und Tm 14'425) durchfahren. Diese Störzonen strichen von Ost nach West mit einem Winkel von 5° bis 10° in

Bezug auf die Tunnelachsen und fielen mit einem Winkel von ca. 65°. Sie bestanden hauptsächlich aus Kataklasiten mit kakiritischen Zwischenlagen und anschließenden Randbereichen aus stark zerklüftetem Fels mit einer i.d.R. zwischen 3 m und 5 m variabler Mächtigkeit. Diese Störzonen überquerten die Tunnelprofile aufgrund des schleifenden Winkels mit den Tunnelachsen auf mehreren Zehnermetern. Das Hauptgefährdungsbild war in diesen Abschnitten – analog zur Störzone „Tm 2'705“ – der Niederbruch von Material, welches sich aus dem Felsverband im Kalottenbereich löste und in den Hohlraum fiel (Bildung von kaminförmigen Hohlräumen).

Bei Durchörterung der den nachbrüchigen Störzonen vor- bzw. nachläufigen Bereichen bestehend aus schiefrigen Gneisen wurden im Weiteren hohe Drücke auf den TBM-Schild hinter dem Bohrkopf registriert. Ausserdem wurden plastische Verformungen der eingebauten Stahlbogen TH29 festgestellt, Spritzbetonablösungen und Netzverformungen beobachtet sowie Konvergenzen der Ausbruchsicherung auf mehreren hundert Metern gemessen (Bild 6 und Bild 7). Die beobachteten Phänomene deuteten auf das Vorhandensein eines druckhaften Gebirgsverhaltens: durch eine Überbeanspruchung des Gebirges in der Umgebung des Hohlraums entstehen plastische Verformungen und das Gebirge zeigt die Tendenz auf, den Hohlraum wieder zu schliessen.



Bild 6: Verformungen der eingebauten Ausbruchsicherung (Paramentbereich)



Bild 7: Verformungen der eingebauten Ausbruchsicherung (Kämpferbereich)

Diese Erscheinungen waren in der Weströhre zwischen Tm 13'595 und Tm 13'692 – wo die subvertikale nachbrüchige Störzone zwischen den beiden Tunnelröhren lag und sich an der Ostseite der Weströhre progressiv annäherte – besonders ausgeprägt und führten am 3. März 2006 bei Tm 13'692 zu einem Verklemmen der TBM infolge der zu hohen Drücke auf den TBM-Schild und der daraus folgenden nicht überwindbaren Reibung. Der Vortrieb konnte dort erst etwa nach 10 Tage, dank einer Überfirstung des TBM-Schildes, wieder aufgenommen werden (Bild 8).



Bild 8: Überfirstungsarbeiten zur Freilegung der verklemmten West-TBM

Die eingebaute Ausbruchsicherung war sowohl für die nachbrüchigen als auch für die druckhaften Abschnitte analog derjenigen, welche bei der Störzone „Tm 2'705“ zur Anwendung kam (Stahlbogen TH29 alle 1.0 m, Bewehrungsnetzen und 14-18 cm Spritzbeton). Der effektive Bohrdurchmesser betrug hier ebenfalls

8.89 m. In gewissen Bereichen wurde nachträglich aufgrund der Gefahr von Spritzbetonabplatzungen eine zusätzliche Lage Bewehrungsnetze als Kopfschutz zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit eingebaut.

Im allgemeinen waren die ab Tm 13'460 für mehr als 1 km in beiden Tunnelröhren vorhandenen geologischen Verhältnisse und deren bautechnische Auswirkungen stark wechselhaft. Bereiche im „guten Fels“ alternierten mit den subvertikalen, schleifenden, nachbrüchigen Störzonen und mit ausgedehnten Zonen mit druckhaftem Verhalten. Die Grenzen zwischen den einzelnen Abschnitten waren oft nicht eindeutig erkennbar, sondern von Übergangsbereichen gekennzeichnet, so dass eine klare Unterteilung zwischen Zonen mit eher druckhaftem und Zonen mit eher nachbrüchigem Gebirgsverhalten äusserst schwierig war.

Dieser Bereich konnte, abgesehen vom Stillstand der TBM West infolge Verklemmung, mit Tagesvortriebsleistungen zwischen 7 m und 15 m durchfahren werden. Diese Vortriebsleistungen sind im Vergleich zu den bei der Störzone „Tm 2'705“ erreichten mittleren Leistungen beachtlich. Für diese Verbesserung haben vor allem die während mehr als 10 km Vortrieb gewonnenen Erfahrungen der Vortriebsmannschaften und die nach der Durchörterung der ersten Störzone vorgenommenen Umbauarbeiten zur Optimierung des Einbaus der geschlossenen Stahlbogen beigetragen.

6.2 Bemessung der Innenschale

Ähnlich wie bei der Störzone „Tm 2'705“ konnten die Nachweise der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit der Innenschale für die Störzonenbereiche ab Tm 13'460 mit einem bewehrten, min. 25 cm starken Innengewölbe und einer unbewehrten Sohle erbracht werden. In Anstrengung einer einheitlichen Bewehrungsanordnung wurden für die Bemessung sowohl Belastungen infolge nachbrüchigen Gebirgsverhalten (Vorgehensweise analog Störzone „Tm 2'705“) als auch Belastungen infolge druckhaftem Gebirgsverhalten angesetzt.

Zur Abschätzung der effektiv möglichen Belastungen auf die Innenschale infolge druckhaftem Gebirgsverhalten wurde eine Rückrechnung anhand einem Finite Differenzen-Modell unter Berücksichtigung der beobachteten Verformungen und eingebauten Sicherungsmassnahmen durchgeführt.

Ein Teil der total aufgetretenen Verformungen konnte anhand von optischen Konvergenzmessquerschnitten erfasst werden, welche in den kritischen Bereichen alle 5 bis 15 m versetzt wurden. Die Nullmessungen konnten erst nach Einbau der Ausbruchsicherung, ca. 7-8 m hinter der Ortsbrust durchgeführt werden. Die Messergebnisse zeigten im Profil asymmetrische und in Tunnellängsrichtung ungleichmässige Verformungen, welche vor Einbau der definitiven Tunnelsohle im Nachläuferbereich (80 bis 100 m hinter der Ortsbrust) vollständig abgeklungen waren. Im rückwärtigen

Bereich wurden keine Konvergenzen und Sohlhebungen mehr festgestellt. Die Absolutwerte der maximal gemessenen Konvergenzen betragen ca. 10 cm. Zu diesen sind die Verformungen zwischen Ortsbrust und Nullmessung zu addieren, welche messtechnisch nicht erfasst werden konnten, aber aufgrund von verschiedenen Betrachtungen mit 4 bis 7 cm abgeschätzt wurden.

Das Modell berücksichtigt die seitlich des Tunnelprofils liegende Störzone, die aufgrund der Schieferung anisotropischen Felseigenschaften sowie die gegenseitige Beeinflussung beider Tunnelröhre (Bild 9).

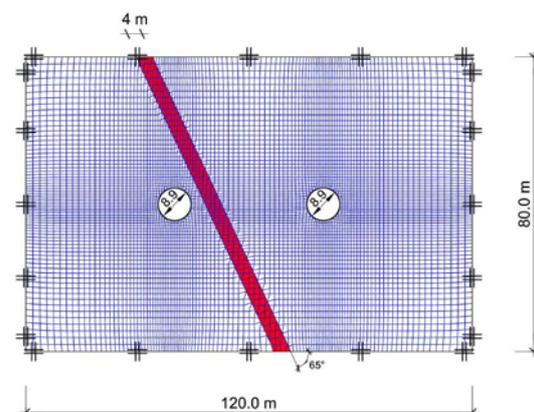


Bild 9: Für die Rückrechnung eingesetztes FD-Modell

Als Ausgangspunkt für die im Modell einzusetzenden felsmechanischen Kennwerte dienten die Resultate von zahlreichen triaxialen Druckversuchen. Diese wurden von der ETH Zürich an Kernproben durchgeführt, welche durch Kern-

bohrungen während des TBM-Stillstandes gewonnen wurden. Bei diesen Versuchen konnte die Richtungsabhängigkeit der Festigkeitseigenschaften der schiefrigen Gneise klar erkannt werden. Das Modell wurde dann u.a. anhand einer Parameterstudie auf Basis der beobachteten Verformungen kalibriert. Es konnten somit Gebirgskennlinien an verschiedenen Stellen im Profil (First, Parameter, Sohle) ermittelt werden (Bild 10), welche dann zusammen mit dem Ausbauwiderstand der Ausbruchsicherung, die Abschätzung der auf die Innenschale wirkenden Gebirgsdrücke ermöglichen (Gleichgewichtszustand Gebirge-Tunnelausbau).

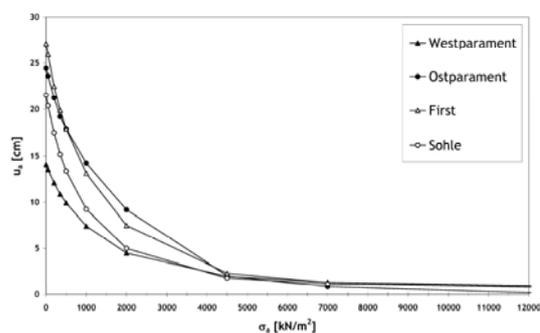


Bild 10: Mit dem FD-Modell ermittelte Gebirgskennlinien

Da der tatsächlich vorhandene Ausbauwiderstand der z.T. deformierten Ausbruchsicherung sehr schwierig zu quantifizieren war, wurden Grenzbeurteilungen vorgenommen und daraus diverse Belastungshypothesen für die Innenschale abgeleitet. Die somit ermittelten Gebirgsdrücke auf

die Innenschale sind asymmetrisch, was für tiefliegende Tunneln eher unüblich ist. Diese Asymmetrie ist aber eine direkte Folge von zwei speziellen Gegebenheiten: die zum Tunnelprofil seitlich liegende, mit 65° einfallende Störzone (mit unterschiedlichen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften gegenüber dem Nachbargestein) und der infolge der subhorizontalen Schieferung anisotropen Festigkeitseigenschaften des Grundgesteins.

7. Nachprofilierungsarbeiten

Infolge der eingetretenen Verformungen der Ausbruchsicherung bei den oben beschriebenen druckhaften Störzonenbereichen resultierten auf einer Streckenlänge von insgesamt ca. 900 m (beide Tunnelröhre) Unterprofile bis maximal 15-20 cm im Radius, welche in der Folge – ohne Nachprofilierung am Parameter und/oder im Kalottenbereich – keinen Einbau des definitiven Innengewölbes mit der vorgesehenen Mindeststärke von 25 cm ermöglichten. Nachprofilierungsarbeiten sind im Tunnelbau nicht unüblich; im Teilabschnitt Bodio bedingen aber die bereits eingebaute definitive Tunnelsohle (mit allen Entwässerungsleitungen) und die Logistik infolge der grossen Distanz der nachzuprofilierenden Strecken vom Tunnelportal, zusätzliche einschränkende Randbedingungen für deren Planung. Die Nachprofilierungsarbeiten werden mit je einer Zusatzinstallation pro Tunnel-

röhre im Bereich der rückwärtigen Baustelle der definitiven Tunnelverkleidung realisiert. Durchzuführen sind – mit aufgrund der vorhandenen geologischen Verhältnisse begrenzten Etappenlängen – der Abbruch der verformten Sicherungsmassnahmen, der zusätzliche Ausbruch und anschliessend der erneute Einbau der erforderlichen Ausbruchsicherung, da bis zum Einbau des Innengewölbes noch mehrere Monate vergehen. Die effektiv am Profilrand abzutragende Stärke ist in Längsrichtung sehr unterschiedlich und variiert aufgrund der aufgetretenen Verformungen, der Stärke der bereits eingebauten Sicherungsmassnahmen und der nötigen Stärke für die neue Ausbruchsicherung.

Je nach Gefährdungsbildern und tatsächlich vorhandenen Unterprofilen ist der Einsatz von verschiedenen Nachprofilierungstypen mit unterschiedlichen Tragwirkungen vorgesehen. Diese reichen von leichten Typen für Bereiche, wo nur lokale Abtragungen durchzuführen sind und wenige neue Sicherungsmittel erforderlich sind, bis zu schweren Typen, wo aufgrund der vorhandenen Gebirgsdrücke und der Gefahr von weiteren Deformationen und Hebungen der bestehenden definitiven Tunnelsohle ein sofortiger Ringschluss nach der Nachprofilierung mit der neuen Ausbruchsicherung wieder zu erstellen ist (Bild 11).

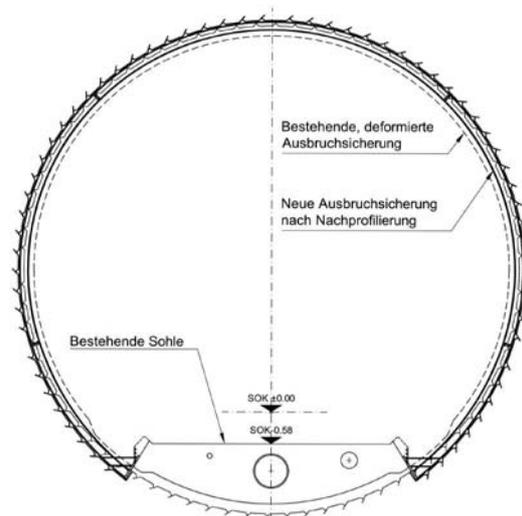


Bild 11: Nachprofilierungstyp Schwer

8. Schlussfolgerungen und Ausblick

Aufgrund der Erfahrungen im Baulos Bodio des Gotthard-Basistunnels ist festzustellen, dass bei langen Tunnelvortrieben mit hoher Überlagerung, trotz einer sorgfältigen und vertieften geologisch-geotechnischen Prognose auf Grundlage aller vorhandenen Erkundungsergebnisse, unerwartete Störzonen nicht ausgeschlossen werden können. Es ist daher unerlässlich, dass auch bei günstig prognostizierten Vortrieben Szenarien für mögliche ausserordentliche Ereignisse ausgearbeitet und vorbereitet werden. Solche Vorkehrungen und Massnahmen sowie die ständige Anpassung des Vorerkundungskonzeptes an die effektiv angetroffenen Gebirgsverhältnisse können die Flexibilität bei gestörten Vortrieben mit offener TBM verbessern.