

Chur, 26. März 2014

**Rhätische Bahn**

**Ganzes Netz**

# Normalbauweise Tunnels Konzeptbeschreibung



Charnadüratunnel

Rhätische Bahn  
Infrastruktur  
Kunstbauten

## Ausgangslage

Die RhB besitzt insgesamt 115 Tunnels mit einer totalen Länge von 58'704 Metern und einem Wiederbeschaffungswert von rund CHF 2.8 Mia. Der Grossteil der Tunnels wurde zwischen 1901 – 1914 gebaut. Es handelt sich um typisierte, einspurige Bauwerke, die mit Mauerwerk ausgekleidet oder auf Teilabschnitten unverkleidet sind. Der Querschnitt besteht aus einem Hufeisenprofil mit kreisförmigem Gewölbe und leicht nach innen geneigten Paramenten.

Aus der aktualisierten Zustandsbewertung aller Tunnels geht hervor, dass 13 Bauwerke in der Zustandsklasse 4 und 64 Bauwerke in der Zustandsklasse 3 eingeteilt sind. Diese beiden Klassen beinhalten 67% des gesamten Tunnelbestandes. Die schwer beschädigten Tunnels der Klasse 4 sollten innerhalb der nächsten 5 – 10 Jahre, jene in der Zustandsklasse 3 innerhalb der nächsten 25 – 35 Jahre instand gestellt werden.

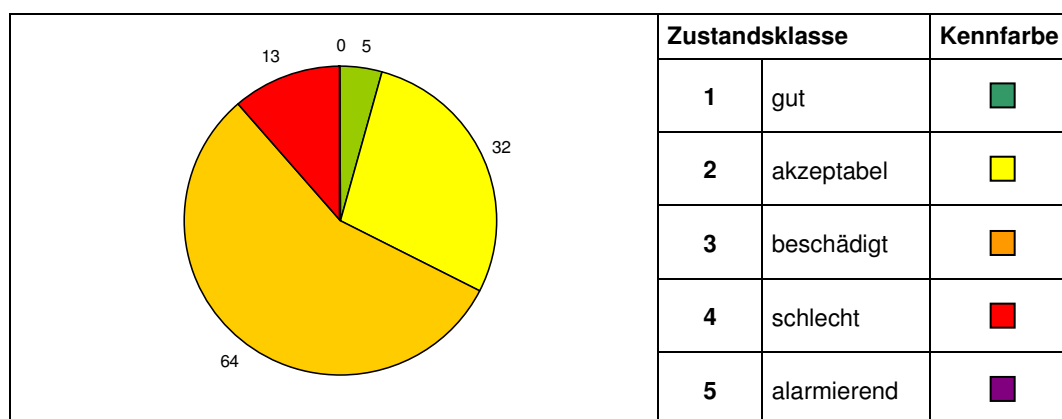


Bild 1: Zustandsklassen Tunnels 2012

Da die Tunnels allesamt nach den gleichen Normalien hergestellt wurden, ist das heute vorhandene Schadensbild ähnlich. Die Schadenursachen stehen in direktem Zusammenhang zur damals gewählten Bauweise. Schwergewichtig wurden folgenden Schäden festgestellt:

- Schäden an den Mauerwerksfugen infolge Durchnässung und Frost
- Schäden an den Paramenten durch Zerrüttung und/oder übermässige horizontale Beanspruchung (Ausbauchungen infolge Wasser, Frost und Auflockerung des Untergrundes)
- Grösstenteils defekte Entwässerung

Diese Schäden sind vorwiegend auf Nässe und Feuchtigkeit zurückzuführen und stellen ein Gebrauchttauglichkeitsproblem dar. Die Tragsicherheit ist normalerweise nicht oder nur unwesentlich vermindert. Deshalb kann der Zeithorizont für die Instandsetzungen von 25 – 35 auf etwa 50 Jahre ausgeweitet werden. Mit dem beschriebenen Mengengerüst sieht sich die RhB gezwungen, in den nächsten 50 Jahren etwa 75 Tunnels mit einer Gesamtlänge von rund 26 Kilometern instand zu stellen. Der Instandsetzungsbedarf entspricht einer mittleren Jahresleistung von 500 Metern. Das Investitionsvolumen dürfte etwa CHF 15 – 25 Mio. pro Jahr erreichen und stellt für die RhB eine sehr grosse Herausforderung dar. Sie versucht deshalb, die Instandsetzungsverfahren zu standardisieren, damit einerseits geregelte Bauabläufe entstehen und andererseits die Kosten gesenkt werden können (Normalbauweise).

Weiter weisen die Tunnels Mängel in Bezug auf das Lichtraumprofil, die technische Ausrüstung und den Sicherheitsstandard auf.

Das ursprüngliche Normalprofil der RhB Tunnels wurde auf Dampfbetrieb ausgelegt und besteht aus einem Hufeisenprofil mit einer Gesamthöhe von 4.70 Meter. Die Paramente sind 2.55 Meter hoch und leicht gegen aussen geneigt. Sie stützen das kreisförmige Gewölbe, das seinerseits einen Radius von 2.15 Metern aufweist. Die Sohlbreite misst 4.04 Meter. Die Nettoprofilgrösse beträgt 17.90 Quadratmeter. Die später erstellte Engadinerlinie wurde von Anfang an elektrifiziert und weist deshalb eine Gesamthöhe von 5.0 Metern auf. Mit Ausnahme der Paramenthöhe, welche hier 2.85 Meter beträgt, wurden alle andern Abmessungen unverändert übernommen.



Bild 2: Röntunnel, typisches Tunnelbauwerk mit charakteristischem Hufeisenprofil

Das beim Bahnbau gewählte Hufeisenprofil ist ein herstellungstechnisch einfaches Profil. Diese Form hat aber einen ganz wesentlichen Nachteil, der sich als einer der Hauptschadensursachen bei den RhB-Tunnels herausgestellt hat. Die geraden Paramente weisen nur einen kleinen Widerstand gegen Horizontalbeanspruchungen auf. Gewölbte Paramente, wie beispielsweise am Simplontunnel, sind diesbezüglich viel robuster, da die Gewölbewirkung zu einer statisch sehr effizienten Lastabtragung führt.

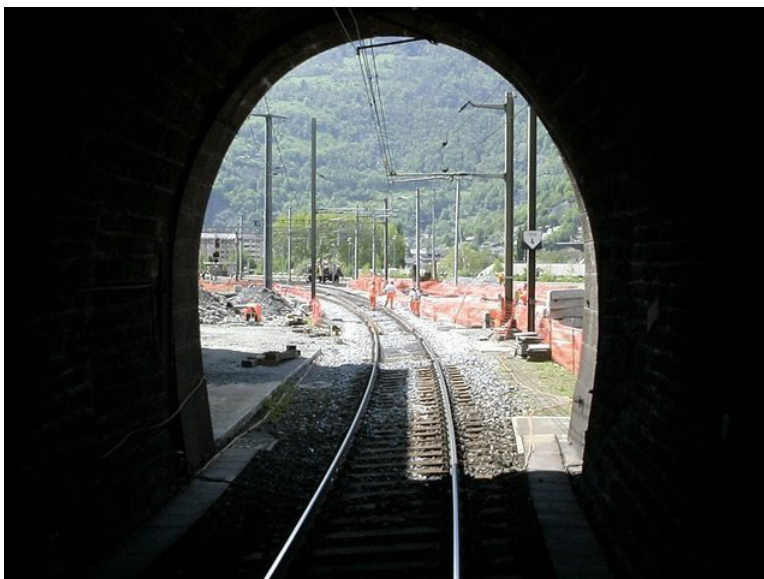


Bild 3: Simplontunnel, typisches Tunnelprofil mit gewölbten Paramenten



## Schadenmechanismen Tunnels

Bei den Tunnels liegt die hauptsächliche Schadenursache darin, dass Wasser in die Tragsstruktur eindringt. Zusammen mit Temperaturwechseln und Frost führt dies zu einer fortlaufenden Zerstörung und Zerrüttung des Mauerwerks. Für die langfristige Substanzerhaltung muss diese Ursache dauerhaft behoben werden. Tunnels können jedoch nicht wie Viadukte durch einen wasserdichten Trog abgedichtet werden.

Die häufigsten Schäden treten im First- und Paramentmauerwerk auf. Die Firste sind oft durchfeuchtet oder vereist, was einerseits die Tragstruktur schädigt und andererseits die Fahrleitungskonstruktion beeinträchtigt. Grosse Probleme ergeben sich aber auch bei den Paramenten, hinter welchen sich in vielen Fällen Wasser ansammelt und bei Frost und nachfolgender Eisbildung zu hohen Seitendrücken auf das Mauerwerk führt. Die Hufeisenform ist wie erwähnt ein statisch ungünstiges Profil bei dem die Gewölbewirkung fehlt. Als Resultat treten grosse Ausbauchungen auf, die schliesslich zu örtlichen Einstürzen führen können. Die globale Tragsicherheit der Tunnels ist damit noch nicht gefährdet. Das ausgebrochene Material stellt jedoch ein Betriebsrisiko dar und kann zu Zugsentgleisungen mit entsprechenden Folgeschäden führen.

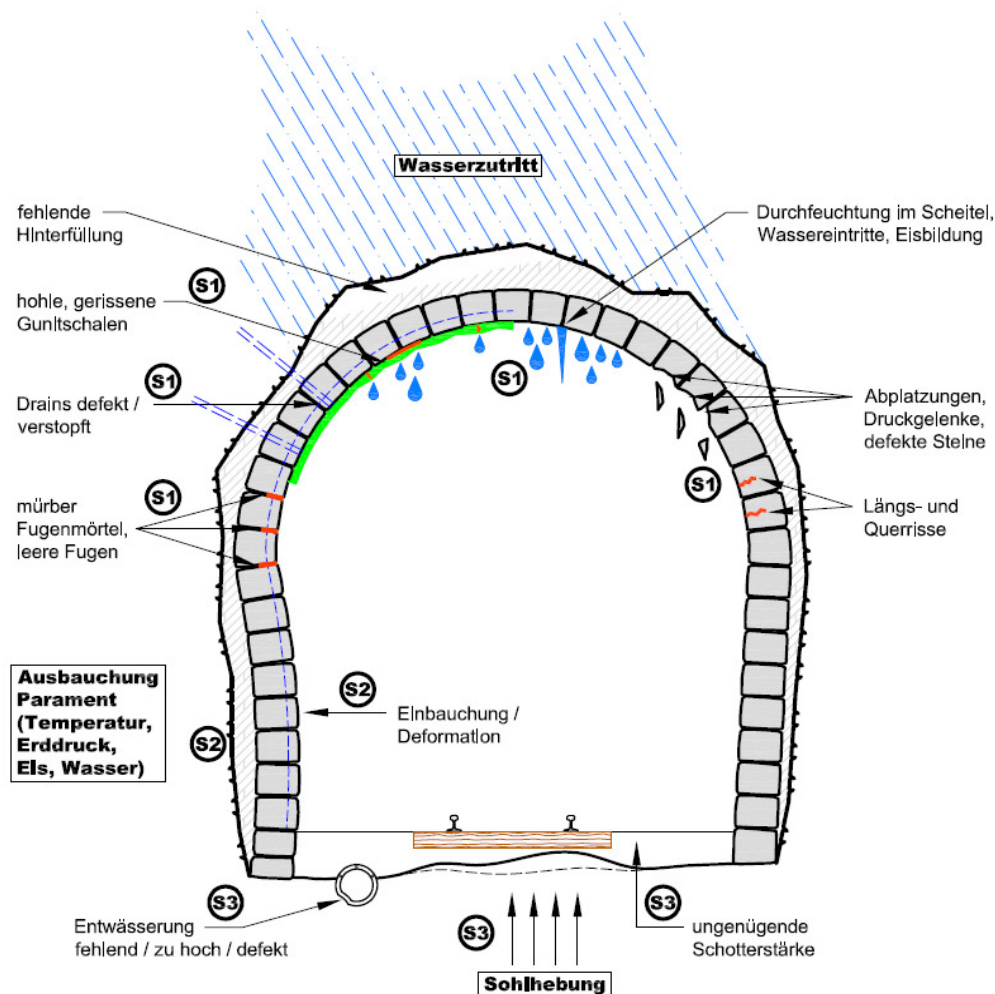


Bild 4: Schadenmechanismen Mauerwerkstunnels

## Bisherige Instandsetzungskonzepte

Die erste integrale Tunnelinstandsetzung auf dem Netz der RhB wurde 2010 am Argenteritunnel 2011 – 2012 am Charnadüratunnel und 2013 – 2013 am Klosterstunnel ausgeführt. Bei diesen Tunnels wurden teilweise erste Konzepte im Hinblick auf eine Normalbauweise umgesetzt, die aber noch nicht vollständig zu befriedigen vermögen. Der Argenteritunnel ist mit 114 Meter Länge ein kurzer Tunnel, der Charnadüratunnel mit einer Länge von 449 Meter und der Klosterstunnel mit einer solchen von 402 m gehören bereits zu den längeren Tunnels.

Das Instandsetzungskonzept bei den erstgenannten Tunnels beruhte im Wesentlichen darauf, das eindringende Bergwasser mittels einer dünnsschichtigen Spritzbetonschale zu verdrängen und entlang örtlicher Entwässerungsschalen abzuleiten. Die Paramente wurden nur örtlich bei bereits vorhandenen Ausbauchungen repariert (Argenteritunnel ca. 26 %, Charnadüratunnel ca. 20 %). Die Tunnelsohle wurde mit einer Ort betonplatte, bzw. mit vorgefertigten Sohlelementen befestigt und soweit abgesenkt, dass das Lichtraumprofil in der Höhe eingehalten werden konnte. Seitlich wurde keine Tunnelaufweitung vorgenommen, womit nur das minimale Lichtraumprofil nach der Sonderwerttabelle eingehalten ist.

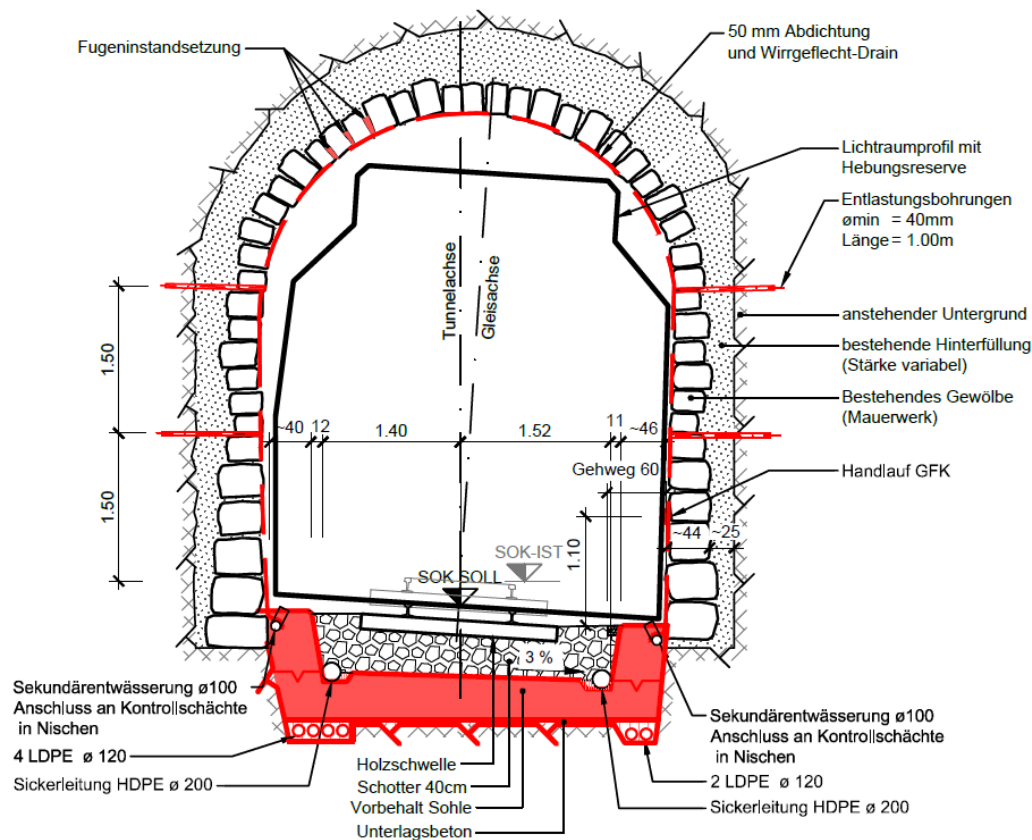


Bild 5: Charnadüratunnel, Normalprofil Instandsetzung (Variante Ortsbetonsohle)

Mit den Massnahmen werden die Symptome, nämlich die Feuchtigkeit in der Kalotte und an den Paramenten behoben. Die Schadenursachen, nämlich der ungehinderte Wassereintritt ins Mauerwerk und die ungenügende Seitenstabilität der Paramente werden nur zum Teil gelöst. Es kann nicht erwartet werden, dass die dünne Spritzbetonschicht von lediglich 50 Millimeter das Tunnelgewölbe dauerhaft abdichten vermag und es ist zu erwarten, dass auch in Zukunft Ausbauchungen an den Paramenten entstehen werden. Obwohl die durchgeführte Instandsetzung vollflächig ausgeführt wurde, handelt es sich aus Erfahrung um eine Erhaltungsmassnahme für einen mittleren Zeithorizont von 25 – 50 Jahren.

Die Gesamtkosten am Argenteri- und Charnadüratunnel betrugen im Mittel CHF 22'500.- bezogen auf einen Laufmeter Tunnel. Für kurze Tunnels ist generell mit einem höheren Wert zu rechnen, da sich die Installationskosten überproportional auf die Laufmeterkosten auswirken. Am Klosterstunnel war das Schadenausmass infolge von Hangverschiebungen bereits deutlich höher und es mussten zusätzlich Verstärkungen an den Gewölbewiderlagern ausgeführt werden. Hier betrugen die Laufmeterkosten CHF 30'000.-.

In Anbetracht des in Zukunft anstehenden Instandsetzungsbedarfs von Tunnelbauwerken auf dem ganzen Netz wurde das anzustrebende Instandsetzungskonzept nochmals kritisch hinterfragt. Die beiden erwähnten Tunnels wurden mit einem grossen finanziellen und zeitlichen Aufwand instand gestellt, ohne dass die Schadenursachen behoben werden konnten.

Im Wesentlichen bleibt die dünne Spritzbetonschale im Tunnelgewölbe eine Massnahme, deren Dauerhaftigkeit beschränkt ist, und die über grosse Bereiche ungesicherten Paramente stellen langfristig betrachtet nach wie vor ein Risiko dar.

Generell stellt sich die Frage nach der Eingriffstiefe einer Instandsetzung. Hier gibt es verschiedene Konzepte. Sanfte Instandsetzungen liegen kostenmässig bei knapp CHF 10'000.- bezogen auf den Tunnelmeter. Solche Beispiele sind die kürzlich ausgeführten Bauwerke Lüenerrüfe- und Sandgründtunnel auf der Arosalinie. Die ausgeführten Massnahmen dürften eine Lebensdauer von knapp 25 Jahren aufweisen.

Eine wesentlich höhere Eingriffstiefe wurde bei den beschriebenen Tunnels Argenteri und Charnadüra gewählt. Die Kosten liegen hier in der Grössenordnung von CHF 22'500.- und die Lebensdauer dürfte 25 bis maximal 50 Jahre erreichen. Am in den Jahren 2012 – 2013 instand gestellten Klosterstunnel betrugen die Laufmeterkosten 30'000.- und die Lebensdauer lediglich 25 Jahre. Im Extremfall, wie bei der Instandsetzung des 350 m langen Portalabschnittes am Tasnatunnel, betrugen die Laufmeterkosten über CHF 70'000.-.

Im Vergleich dazu liegen die Laufmeterkosten von kurzen Neubautunnels in der Grössenordnung von CHF 55'000.- bis 65'000.- (Saastunnel RhB, Ausführung 2006).

Am geplanten neuen Albulatunnel erreichen die Laufmeterkosten rund CHF 47'500.-. Hier handelt es sich aber um ein langes Bauwerk, bei dem der Anteil der Installationskosten bezogen auf den Tunnelmeter deutlich tiefer liegt.

Das «richtige» Mass der Eingriffstiefe hängt mitunter auch vom vorhandenen Tunnelportfolio eines Infrastrukturbetreibers ab. Bei einem sehr hohen Tunnelanteil ist eine sanfte Instandsetzung auf einen kurzen Zeitraum nicht optimal. Mit einer solchen Strategie müssten die Tunnels innerhalb eines Betrachtungszeitraumes von 70 – 100 Jahren mehrmals instand gestellt werden. Dies würde zu wiederholten Betriebsbehinderungen, sowie zu überproportionalen Kosten für die Baustelleninstallationen führen.

Bei der RhB und ihrem grossen Tunnelanteil sollte die Eingriffstiefe wesentlich höher angesetzt werden. Wenn die Lebensdauer in der Grössenordnung von 70 – 100 Jahren liegt, so müssten im Mittel 2 - 3 Tunnels pro Jahr instand gestellt werden.

Neben der rein bautechnischen Betrachtung weisen die bisherigen Instandsetzungskonzepte auch Lücken in der Sicherheitsbetrachtung auf. Die Lichtraumverhältnisse können nur für die Sonderwerte eingehalten werden und im Ereignisfall sind die Selbst- und die Fremdrettung massiv erschwert. Hier besteht zusätzlicher Nachholbedarf.

## Normalbauweise Tunnels Studie 2012

Die Erhaltung und Restaurierung der gut 100-jährigen Bauwerke für eine weitere Betriebsperiode stellt eine grosse Herausforderung dar. Dies insbesondere auf Grund des Mengengerüsts mit insgesamt 75 Tunnels mit einer Gesamtlänge von rund 25 Kilometern, die allesamt unter Aufrechterhaltung des Bahnbetriebs instand gestellt werden müssen. Eine weitere Anforderung an die «Normalbauweise» ist die Sicherstellung einer weiteren Nutzungsperiode von 70 – 100 Jahren, die auf die Behebung der wesentlichen Schadenursachen abzielen muss. Die Rhätische Bahn verspricht sich mit der Normalbauweise eine weitgehende Standardisierung in der Planung und Ausführung, was sich positiv auf die Gesamtkosten und die Bauzeit auswirken wird.

Die Analyse der hauptsächlichen Schäden an den Tunnels der RhB hat ergeben, dass die statisch ungünstige Hufeisenform eine systematische Schwachstelle darstellt. In den bestehenden Tunnels treten vorwiegend im Winterhalbjahr wiederkehrende Schäden an den Paramenten auf, die eine kurzfristige Intervention und Sicherung erfordern. Um diese Schwachstelle dauerhaft beheben zu können müssen die Paramente durchgehend verstärkt werden. In der Normalbauweise Tunnels ist dieses Erfordernis der zentrale Aspekt. Es wird konzeptionell so behoben, dass gleichzeitig die Bedürfnisse der heute mangelhaften Dienst- und Sicherheitsräume einbezogen werden.

Die Normalbauweise beinhaltet folgende Aspekte:

- Verstärkung der gemauerten Paramente (Verhinderung von Ausbauchungen infolge Temperatur, Wasser und Frost)
- Einbau einer Abdichtung in der Firste (kontrollierte Ableitung des Wassers)
- Befestigung der Sohle (Verhinderung von Aufweichungen und Frosthebungen)
- Schaffung des normativen Lichtraumprofils mit den vorgeschriebenen Sicherheitsräumen
- Verbesserung der Sicherheitseinrichtungen

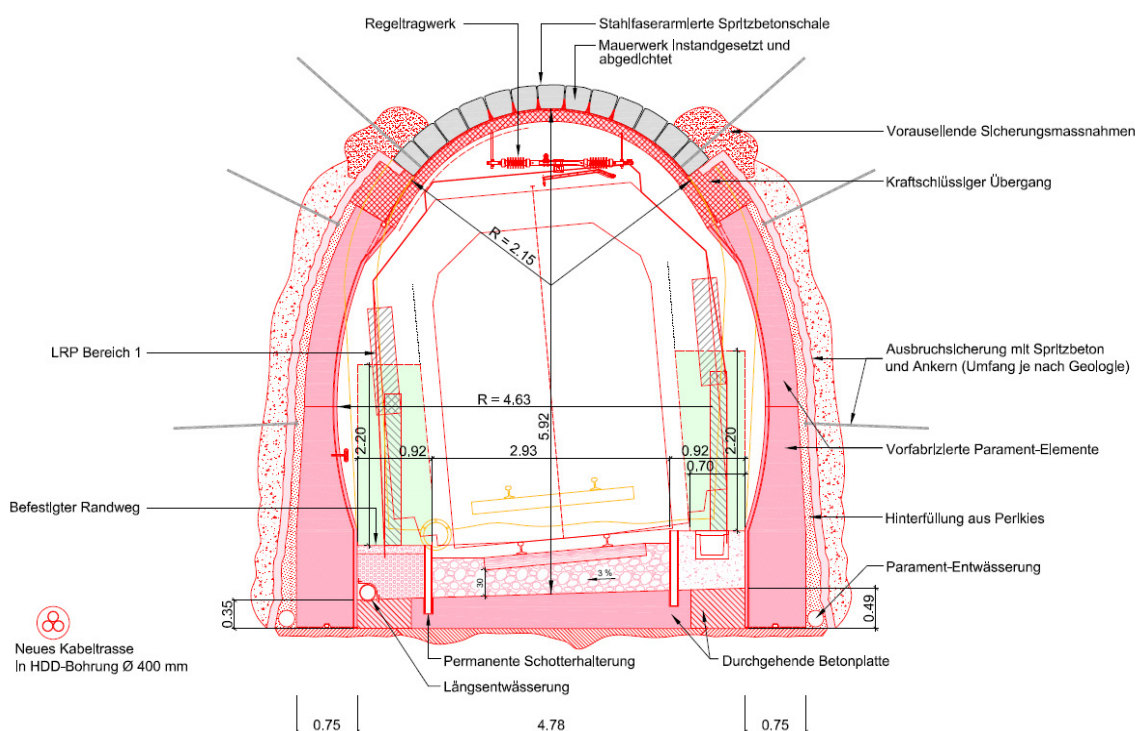


Bild 6: Normalquerschnitt Normalbauweise



Die Kernelemente der Normalbauweise sind vollständig neue Paramentelemente, eine Scheitelabdichtung sowie eine durchgehende Sohlplatte. Das Tunnelprofil kann gleichzeitig seitlich aufgeweitet werden, um Raum für das normative Lichtraumprofil und die Sicherheitsräume zu schaffen. Die Absenkung der Tunnelsohle ist erforderlich um den oberen Bereich des Lichtraumprofils zu gewährleisten. Mit dem Einbau einer Betonplatte können die Tunnelsohle befestigt und die vorfabrizierten Paramentelemente gegenseitig verspriest werden.

Als vorbereitende Massnahme werden an beiden Tunnelportalen Installationsplätze in ausreichender Grösse von etwa 200 Quadratmetern hergerichtet. Dies ist besonders wichtig, weil die Portale häufig nur über das Bahntrasse erschlossen sind und alle Materiallieferungen in der Nachtbetriebspause per Bahn erfolgen müssen. Zur Entflechtung der Bautätigkeit wird ausserhalb des Tunnelprofils eine gesteuerte Horizontalbohrung mit Durchmesser 400 Millimeter für ein neues Kabeltrasse erstellt. Dadurch entfallen die sonst notwendigen Bauprovisorien und Umlegungen an der Kabelanlage, sowie das Risiko für Beschädigungen und Unfälle während den Bauarbeiten.

Der Abbruch der Firste unter Betrieb wurde als sehr kritisch beurteilt, da sich einerseits hinter dem Mauerwerksgewölbe Verfüllungen in unbekanntem Ausmass befinden und andererseits loses Gebirge während den Abbrucharbeiten nachbrechen könnte. Daneben stellt die Fahrleitung, welche tagsüber wieder betriebsbereit sein muss, ein weiteres Erschwernis dar. Die RhB hat bei der Instandsetzung des Tasnatunnels diesbezüglich die Erfahrung gemacht, dass ein vollflächiger Gewölbeersatz unter Betrieb ein grosses Betriebsrisiko beinhaltet. Deshalb wurde in der Konzeptstudie 2012 von einem Gewölbeersatz Abstand genommen.

Das Baukonzept ging davon aus, dass zuerst die Sicherung des Scheitelgewölbes erfolgen sollte. Anschliessend war vorgesehen, die Paramente einseitig auf einer Länge von 20 – 40 Metern abzubauen und provisorisch zu sichern. Optimal auf den Bautakt abgestimmt sollten vorfabrizierte Paramentelemente versetzt und mit Perlkies hinterfüllt werden. Der Fugenschluss zum Mauerwerksgewölbe war anschliessend mit einer «Spritzbetonplombe» geplant. Mit diesem Konzept sind die geometrischen Toleranzen beherrschbar. Nachdem mit dem gleichen Verfahren auch die gegenüberliegende Tunnelwand instand gestellt wäre, hätten die Arbeiten an der Kalotte zu erfolgen. Für diese war eine Abdichtung vorgesehen, welche durch eine Spritzbetonschale in ihrer Lage gehalten werden sollte. Die Schale weist eine Stärke von 15 cm auf und kann sich direkt auf die Konsolen der Paramentelemente abstützen und ist selbst tragend (Gewölbewirkung). Die Durchfeuchtung des Mauerwerks in der Kalotte kann nicht gestoppt werden und führt mit der Zeit zu weiteren Auswaschungen des Fugenmörtels. Die tragende Funktion des Firstmauerwerks bleibt durch die Stützfunktion der neuen Spritzbetonschale erhalten. Zum Schluss sollte die Tunnelsohle abgesenkt und mit einer neuen Sohlplatte in Ortsbeton ergänzt werden. Diese hat einerseits den Zweck, die Sohle zu stabilisieren und die Entwässerung sicherzustellen. Sie dient aber andererseits auch als Ringschluss für den ganzen Tunnelausbau aus Kalotte, Paramenten und Sohle. Damit ergibt sich eine gegenüber dem ursprünglichen Hufeisenprofil wesentlich robustere Konstruktion, die einen ausreichenden Widerstand gegen Horizontaldrücke aufweist.

Die Normalbauweise vermeidet insbesondere die direkte Applikation von Spritzbeton auf das Natursteinmauerwerk zur Tunnelabdichtung, welche aus Erfahrung eine zu geringe Lebensdauer aufweist. Das Hauptproblem, nämlich die ungenügende Stabilität der Paramente, kann nachhaltig nur durch deren vollständigen Ersatz gelöst werden, erfordert aber einen massiven Eingriff in die bestehende Tragkonstruktion.



## Kritik und Weiterentwicklung

Mit der Normalbauweise Tunnels wird der Fokus auf eine langfristige Sichtweise und eine dauerhafte Problemlösung gelegt. Es ist deshalb ausserordentlich wichtig, dass die konzeptionellen Aspekte sehr gut abgestützt und hinterfragt werden.

Die RhB hat die Konzeptstudie 2012 intensiv mit verschiedenen Tunnelbauspezialisten, wie auch mit Vertretern des Bundesamtes für Verkehr, diskutiert. Dabei haben sich von verschiedener Seite stets zwei zentrale Kritikpunkte ergeben. Dies sind einerseits die Mischbauweise aus Betonfertigteilen und Spritzbetongewölbe und andererseits die erforderliche Absenkung der Gleisachse um rund 70 cm.

Der Übergang von den vorgefertigten Paramenten auf das bestehende und durch eine Spritzbetonschale verstärkte Firstmauerwerk ist statisch konstruktiv eine Sonderlösung. Der durchgehende und bei umlaufender Tübbingauskleidung vorhandene Kraftfluss wird mit dieser Bauweise unterbrochen. Materialtechnologisch entsteht eine Unstetigkeit, deren langfristige Auswirkungen nicht genau quantifiziert werden können.

Eine weitere, häufig geäußerte Kritik bestand in der temporären Sicherung und Unterfangung des bestehenden Mauerwerksgewölbes auf einer freien Länge von 20 bis 30 m, die im Hinblick auf die bautechnische Ausführung sogar noch weiter verlängert werden sollte.

Der andere zentrale Kritikpunkt betraf die notwendige Absenkung der Gleisachse um rund 70 cm, welche mit langen Rampen vor und nach den Tunnels verbunden wäre und sich negativ auf den Fahrkomfort auswirken würde. An diversen Stellen wäre eine solche Absenkung nicht möglich, da angrenzende Brücken einen Zwangspunkt in der vertikalen Trassierung darstellen.

Die RhB hat diese Kritikpunkte in der Weiterentwicklung aufgenommen. Anlässlich der durchgeführten Testmontagen der Paramentelemente im Versuchsstollen Hagerbach konnte festgestellt werden, dass für eine durchgehende Tunnelauskleidung aus vorgefertigten Elementen eigentlich nur noch ein kleiner Schritt zu vollziehen wäre und dass der Ringschluss in der Firste mit einem einzigen Zusatzelement ergänzt werden könnte.

Um die Firste unter Betrieb freilegen zu können war aber eine weitere zentrale Idee notwendig. Diese besteht darin, über die kritische Zone einen Kopfschutz in Form eines stählernen Schutztunnels einzusetzen. Die bestehenden RhB Tunnels sind in ihrem Profil gerade so gross, dass eine solche Konstruktion eingesetzt werden kann. Um das notwendige Lichtraumprofil im oberen Bereich gewährleisten zu können, ist eine temporäre Absenkung der Gleisachse um 25 cm erforderlich.

Der Schutztunnel dient einerseits als Kopfschutz für die Aufrechterhaltung der Betriebssicherheit, kann aber gleichzeitig auch als temporäre Fahrleitungskonstruktion ausgebildet werden, indem er mit einer teleskopierbaren Stromschiene ausgerüstet wird.

Im weiteren Projektverlauf wurden auch andere Aspekte, wie insbesondere die Tunnelentwässerung und die Ausbildung der Fluchtwege weiter bearbeitet.

## Schutzunnel

Die dauernde Gewährleistung der Betriebssicherheit ist eine zwingende Voraussetzung um einen Tunnel unter Betrieb instandsetzen zu können. Die diesbezüglich kritische Zone ist die Firste im Bereich hinter der Ortsbrust, also dem Übergang vom bestehenden zum aufgeweiteten Tunnel. Die Gewölbesicherung erfolgt unmittelbar nach dem Ausbruch einer Etappe von 1.50 m Länge und muss vor der Inbetriebnahme des Bahnbetriebes am folgenden Morgen tragfähig sein.

Die Ausbrucharbeiten zur Aufweitung des Tunnelprofils erfordern den Einsatz von leistungsstarken Geräten im Bereich der Ortsbrust mit entsprechendem Energieeintrag in die bestehende Konstruktion. Eine Schädigung oder gar ein Teilausbruch des Mauerwerks hinter der Ortsbrust kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Deshalb basiert die Normalbauweise auf dem Einsatz eines Schutzunnels in der kritischen Zone.

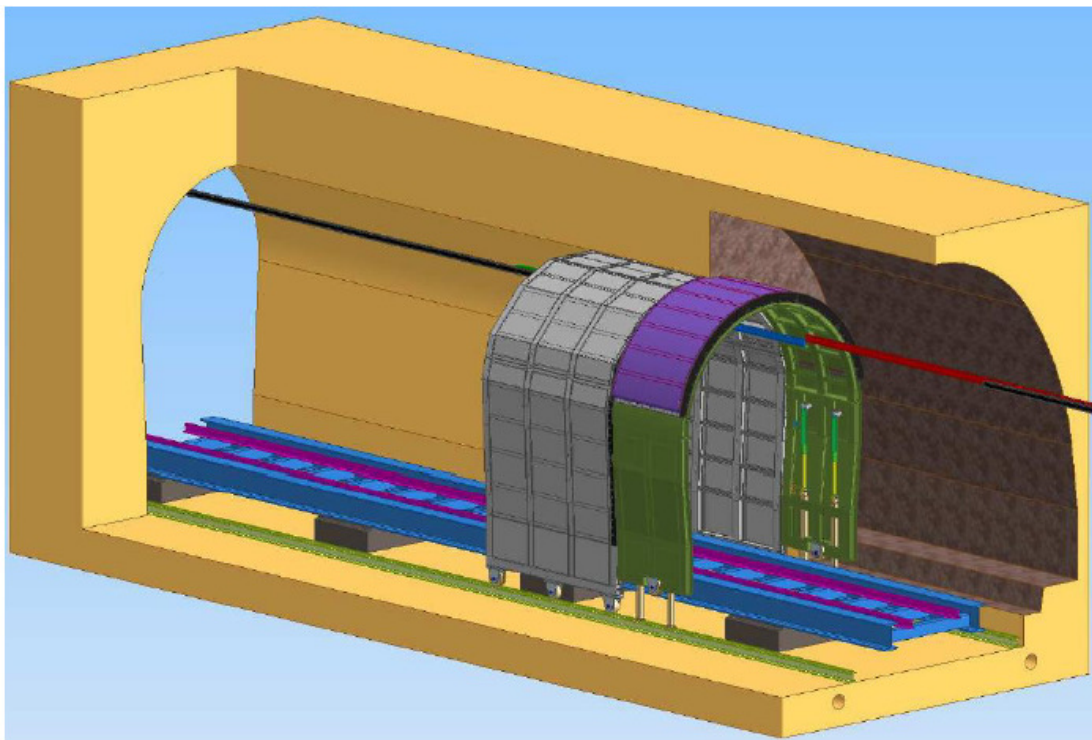


Bild 7: Konzept Schutzunnel

Der Schutzunnel besteht im vorderen Teil (im bestehenden Tunnelgewölbe) aus einem starren Stahlmantel, der das Lichtraumprofil in der kritischen Zone hinter der Ortsbrust vor herunterfallenden Mauerwerksteilen schützt. Er ist fahrbar auf seitlichen Schienenprofilen gelagert. Der hintere Teil ist mit Hydraulikzylindern ausgerüstet und kann angehoben und abgesenkt werden. Dies ermöglicht ein dichtes Anpressen und Unterstützen des Mauerwerksgewölbes unmittelbar hinter der Ortsbrust.

Neben der Schutzfunktion für den Bahnbetrieb ist der Schutzunnel mit einer teleskopierbaren Fahrleitungsschiene ausgerüstet. Beim Vorfahren um eine weitere Ausbruchetappe kann die Stromschiene eingezogen werden, so dass im Abbruchbereich keine Fahrleitung mehr vorhanden ist. Nach dem Abbruch und dem Aufbringen der temporären Gewölbesicherung wird der ganze Schutzunnel in den frisch gesicherten Bereich zurück gefahren und das abgekoppelte Fahrleitungsstück wird wieder eingesetzt.

## Ergebnisse Testmontagen Versuchsstollen Hagerbach

Die Rhätische Bahn beurteilt das Versetzen von schweren vorgefertigten Elementen als einen der zentralen Punkte im gesamten Bauablauf. Das Potential in der Umsetzung der Normalbauweise mit dem raschen und sicheren Versetzen von vorgefertigten Auskleidungselementen kann nur ausgeschöpft werden, wenn der Versetzvorgang sicher beherrscht werden kann. Auf dem Markt existieren heute keine fertig konfektionierten Maschinen, die diesen Versetzvorgang ausführen können. Dazu braucht es neuartige Entwicklungen, die vor einem Ersteinsatz getestet werden sollten.

Um solche Montagevorgänge testen zu können hat die RhB im Versuchsstollen Hagerbach einen 40 m langen Stollen ausbrechen lassen. Er weist das gleiche Normalprofil wie die bestehenden Tunnels auf und ist einseitig auf einer Länge von 12 m mit der notwendigen Vertiefung und Aufweitung für den Elementeinbau versehen.



Bild 8: Teststollen RhB während der Ausbruchphase

Im Frühjahr 2013 haben drei Unternehmungen mit voneinander unabhängigen Konzepten je eine Testmontage von total 12 vorgefertigten Elementen nach der Konzeptstudie 2012 ausgeführt. Die Zeitvorgabe für die Montage der Elemente betrug 6 Stunden und basierte auf einer Versetzzeit von 30 Minuten pro Element. Alle drei Unternehmungen haben diese Zeitvorgabe deutlich unterschritten. Die effektiven Versetzzeiten betrugen 120 – 150 Minuten für alle 12 Elemente.

Die Arbeiten im Teststollen konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Die wichtigsten Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Elemente mit einem Gewicht von rund 5.2 t können sicher versetzt werden.
- Die gewählte Elementlänge von 1.50 m ist richtig. Sie muss nicht verkleinert, kann aber auch nicht erweitert werden.
- Für die Montage ist eine genaue Versetzbasis erforderlich, die unabhängig in vertikaler und horizontaler Richtung justiert werden kann.

# Normalbauweise Tunnels Bauprojekt 2014

Ausgehend von den Ergebnissen im Teststollen Hagerbach und den kritischen Anmerkungen der Studie 2012 wurde die Normalbauweise am Beispiel des kurz vor Bergün gelegenen Glatsherastunnels zu einem konkreten Bauprojekt weiterentwickelt. Der Glatsherastunnel wurde auf Grund seiner guten Zugänglichkeit und eher einfachen Geologie als Prototyp für die erstmalige Umsetzung der Normalbauweise ausgewählt. Es handelt sich um einen 334 m langen Tunnel, der auf einer Länge von 275 m vollständig gemauert und auf einer Länge von 59 m unverkleidet ist. Die Gleisachse liegt im Grundriss auf einem Rechtsbogen mit einem mittleren Radius von 153 m, geht bei den Portalen in Gegenbögen über und steigt mit 32‰.

Das Normalprofil des Gletscherastunnels wurde so entwickelt, dass die bestehende Gleisachse in der Höhe unverändert übernommen werden kann. Die Gewölbesicherung besteht aus einem geschlossenen Ring aus fünf vorfabrizierten Betonelementen mit einer Länge von 1.50 m. Die Tunnelsohle wird 1.20 m unter SOK abgesenkt und mit einer Ortsbetonplatte befestigt. Beidseitig werden Entwässerungsleitungen eingebaut. Die Kabelanlage kann im vorliegenden Fall vorgängig in einen Kabelgraben ausserhalb des Gebirges versetzt werden.

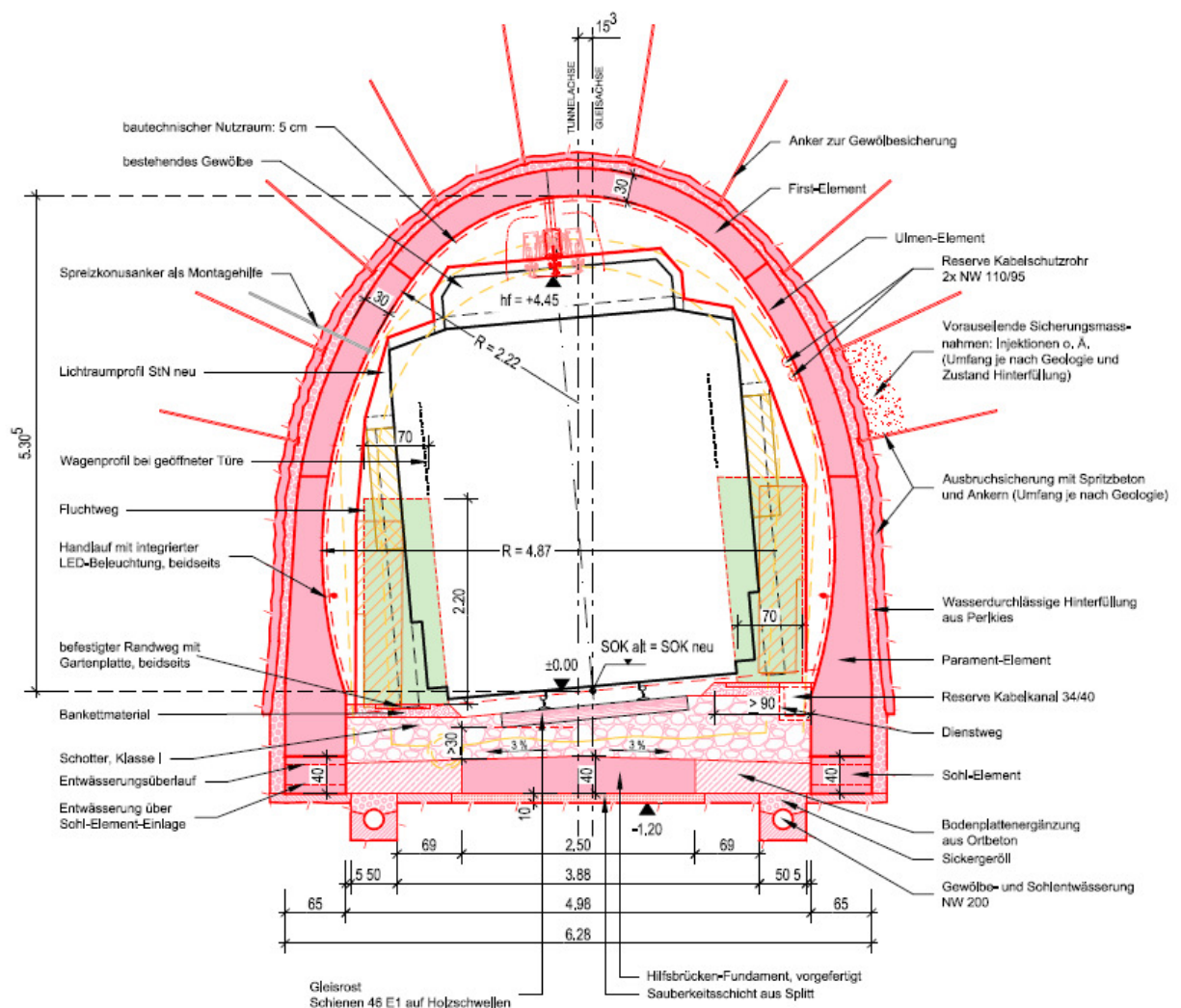


Bild 9: Normalprofil Bauprojekt Gletscherastunnel



Die temporäre Sicherung des Gewölbes hinter der Ortsbrust erfolgt mit Spritzbeton und je nach Erfordernissen einer unterschiedlichen Anzahl ungespannter Stabanker über die gesamte Abwicklung. Im kritischen Bereich hinter der Ortsbrust wird ein stählerner Schutztunnel eingesetzt, der zusätzlich mit einer rückziehbaren Fahrleitungskonstruktion ausgerüstet ist, was zu einer wesentlichen Vereinfachung der Tunnelausweitung führt.

Die Hinterfüllung erfolgt über den gesamten Umfang mit 15 cm Perlkies, womit sich eine sehr gute Entwässerung des Hohlraums hinter der Auskleidung gewährleisten lässt.

## Tunnelauskleidung

Die Tunnelauskleidung erfolgt, wie bereits in der Studie 2012, mit vorfabrizierten Betonelementen. Dieses Konzept ist ein zentraler Aspekt der Normalbauweise Tunnel und liefert einen Beitrag für die gewünschte Beschleunigung des Bauvorgangs. Die Staubentwicklung, der Gesundheitsschutz und die wesentlich bessere Bauwerksqualität sind weitere Aspekte gegenüber der konventionellen Spritzbetonapplikation.

Anstelle der Trockenbauweise mit vorfabrizierten Elementen wäre auch eine konventionelle Auskleidung in Ortbeton möglich. Dabei müssten das Abdichtungs- und das Entwässerungskonzept entsprechend angepasst werden. Es wären mindestens zwei Arbeitsschritte mit der Applikation der Abdichtungsfolie und der Herstellung des tragenden Gewölbes notwendig. Dies hätte zum einen die Folge, dass der Bereich mit der temporären Sicherung im Bauzustand deutlich verlängert werden müsste und zum andern, dass eine im Profil sehr knappe Tunnelinnenschalung erforderlich würde.

Das neue Konzept beruht wiederum auf 1.50 m langen Elementen mit einer Wandstärke von 30 cm, die nun über den ganzen Gewölbeumfang versetzt werden. Die Abstellbasis erfolgt mit einem 1 t schweren Sohlelement, das sowohl horizontal als auch vertikal ausgerichtet werden kann. Darauf abgestellt werden ein linkes und ein rechtes Paramentelement mit einem Gewicht von je 5.8 t. In einem weiteren Schritt erfolgt die beidseitige Montage je eines 2.8 t schweren Ulmelementes. Der Ringschluss erfolgt mit einem 4.8 t schweren Firstelement.

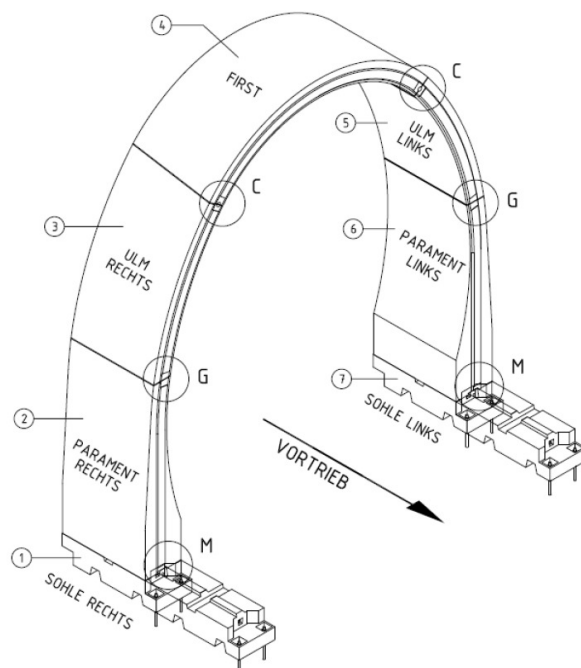


Bild 10: Auskleidungselemente

Das Konzept erfordert die ringweise Herstellung der Auskleidung. Die Längsfugen verlaufen radial und weisen ebene Kontaktflächen mit einer breiten Führungsnut auf. Die Ulmen- und Firstelemente sind trapezförmig ausgebildet. Für die Montage ist der Einsatz von Führungsstangen (Guiding Rods) vorgesehen. Die Elemente werden im Montagezustand verschraubt.

Die Oberfläche des Sohlelementes ist in Längsrichtung horizontal (parallel zur Nivellette) und mit einer Führungsleiste ausgebildet. Das Paramentelement kann mit Kugelpopfankern direkt über dem Schwerpunkt angehängt und auf das Sohlelement abgestellt werden. Das Ulmelement muss über einen Adapter gefasst, auf das Paramentelement aufgesetzt und mit diesem, sowie dem vorgängig versetzten Gewölbering verschraubt werden. Zum Schluss erfolgt der Einbau des Firstelementes. Dieses wird wiederum mit einem Adapter gefasst und mit Hilfe der Führungsstangen eingesetzt und verschraubt.

Die Ringfugen sind mit einer breiten Führungsnut ausgebildet und felsseitig mit einem speziellen Fugenprofil ausgerüstet.

## Denkmalpflegerische Aspekte

Im Gegensatz zu den Viadukten beschränken sich die denkmalpflegerischen Aspekte bei den Tunnels auf die Beibehaltung der sichtbaren Portale beschränken. Im Tunnelinnern sind keine besonderen Massnahmen erforderlich. Es ist vorgesehen, die Portale wiederum mit dem für RhB Tunnels typischen Hufeisenprofil mit geraden Paramenten auszubilden und über einen Bereich von rund 5 m auszumauern.



Bild 11: Fotomontage neues Portal Gletscherastunnel

Die Gestaltung der Portale beruht auf der Idee, die Geometrie der bestehenden Bauwerke mit einem Faktor von etwa 1.15 affin zu erweitern und im gleichen Stil wieder vorzumauern. Das Gewölbemauerwerk des Stirnkranzes muss aus geometrischen Gründen zumindest teilweise mit neuen, etwas grösseren aber baugleichen Steinen ergänzt werden. In den übrigen Bereichen können die bestehenden Natursteine wieder verwendet werden. Als Resultat ergibt sich eine authentische Lösung.

## Kosten

Die geschätzten Gesamtkosten für die Normalbauweise Tunnels liegen nach heutigem Planungsstand in der Grössenordnung von CHF 50'000.- pro Tunnelmeter. Mit zunehmender Erfahrung und Standardisierung in der Planung und Ausführung sind Einsparungen von 15% möglich und die Laufmeterkosten dürften sich bei etwa CHF 42'500.- einpendeln. Die Nutzungsdauer dieser Massnahme beträgt 70 – 100 Jahre.

Die Kosten liegen deutlich über denjenigen von bisherigen Instandsetzungsverfahren. Demgegenüber steht eine deutlich längere Nutzungsdauer und ein wesentlich höherer Ausbau- und Sicherheitsstandard.

Würde anstelle der geplanten Normalbauweise Tunnels eine komplette Erneuerung auf einem neuen Trasse ausgeführt, so wäre mit Kosten in der Grössenordnung von CHF 60'000.- pro Tunnelmeter zu rechnen. Als Beispiel kann der 2006 erstellte 87 m lange neue Saasertunnel auf der Linie Landquart – Davos erwähnt werden, der mit einem Laufmeterpreis von CHF 61'860.- abgerechnet wurde.

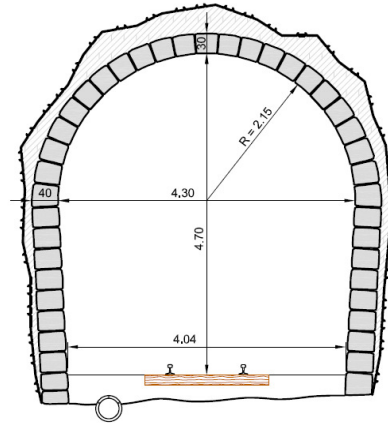
Aufgrund des heutigen Wissenstandes wird von folgenden Eckwerten ausgegangen:

- Normalbauweise Tunnels  
Laufmeterkosten CHF 45 ' 000.- bis 50'000.-  
Nutzungsdauer 70 – 100 Jahre
- Neubautunnel  
Laufmeterkosten CHF 55'000.- bis 65'000.-  
Nutzungsdauer 100 – 125 Jahre
- Bisherige Instandsetzungen  
Laufmeterkosten CHF 20'000.- bis 30'000.-  
Nutzungsdauer 25 - 50 Jahre
- Sanfte Instandsetzungen (Instandhaltung)  
Laufmeterkosten bis ca. CHF 10'000.-  
Nutzungsdauer 15 - 25 Jahre

Rhätische Bahn  
Infrastruktur

Karl Baumann  
Leiter Kunstbauten

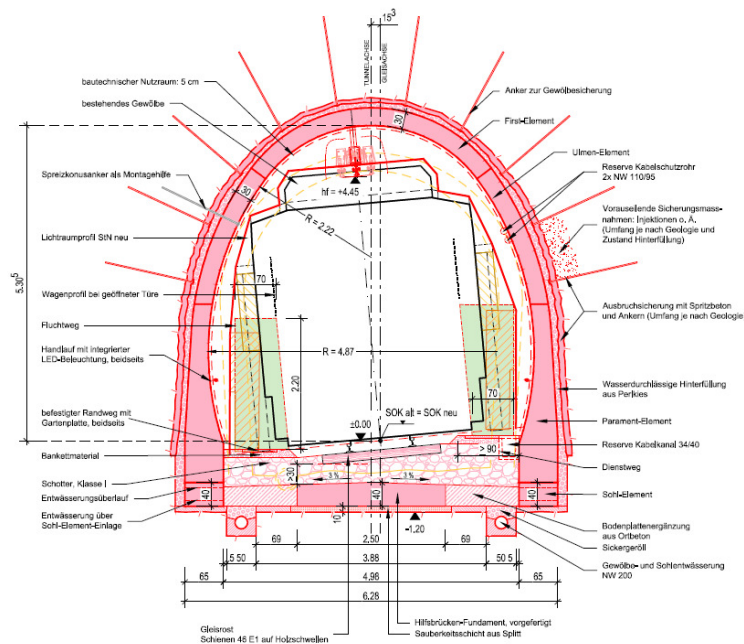
# Datenblatt



## Kenndaten

Lichte Breite	4.30 m
Lichte Höhe	4.70 m
Nettoprofilgrösse	17.90 m <sup>2</sup>
Ausbruchfläche	26.80 m <sup>2</sup>
Ausbruchumfang	19.50 m <sup>2</sup>
Schotterdicke	35 cm

## Bestehender Normalquerschnitt



## Kenndaten

Lichte Breite	5.49 m
Lichte Höhe	5.30 m
Nettoprofilgrösse	24.50 m <sup>2</sup>
Ausbruchfläche	40.50 m <sup>2</sup>
Ausbruchumfang	26.10 m <sup>2</sup>
Schotterdicke	55 cm
Fluchtweg	70 cm
Gehweg	90 cm

## Geplanter Normalquerschnitt



## Schematische Darstellung

### Neues und altes Tunnelprofil

