

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/
Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Tech-
nischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.

<http://www.ub.tuwien.ac.at>



The approved original version of this diploma or
master thesis is available at the main library of the
Vienna University of Technology.

<http://www.ub.tuwien.ac.at/eng>

DIPLOMARBEIT Master Thesis

Instandsetzung und bauliche Sanierung von Eisenbahntunnel am Beispiel des Arlbergbahntunnels

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

(Betreuer/-in)

o.Univ.Prof. Dr. Hans Georg Jodl

E234

Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

(Verfasser/-in)

Klaus Voit

0102415

Perggerstraße 9/1/7
2500 Baden bei Wien

Wien, am

9. September 2013

eigenhändige Unterschrift

A handwritten signature in blue ink that reads 'Klaus Voit'.



Technische Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement

Karlsplatz 13

1040 Wien

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Instandsetzung und bauliche Sanierung von
Eisenbahntunnel am Beispiel des Arlbergbahntunnels

Klaus Voit

Wien, September 2013

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur
(Dipl.-Ing.) unter der Leitung von:

Betreuer

o.Univ.Prof. Dr. Hans Georg Jodl

Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement

Technische Universität Wien

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Andreas Makovec

Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement

Technische Universität Wien

eingereicht von

Klaus Voit

Matr.Nr.: 0102415

Sämtliche Angaben in dieser Diplomarbeit erfolgen, trotz sorgfältiger Bearbeitung und Kontrolle, ohne Gewähr. Eine Haftung des Autors oder der Betreuer betreffend den Inhalt dieser Diplomarbeit ist ausgeschlossen.

Vorwort und Dank

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Jahr 2013 unter der Leitung von o.Univ.Prof. Dr. Hans Georg Jodl am Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement an der Technischen Universität Wien.

Für die Ermöglichung und Unterstützung dieser Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bei o.Univ.Prof. Dr. Hans Georg Jodl und Dipl.-Ing. Andreas Makovec bedanken.

Weiters möchte ich mich bei Klaus Eder für die gute Zusammenarbeit zu Studienzeiten auf der Technischen Universität Wien bedanken.

Ganz besonderen Dank gilt meinen Eltern Walter und Irmgard Voit sowie meiner Schwester Eva Voit und meinem Onkel Karl Voit. Nur durch ihre jahrzehntelange Unterstützung war es mir möglich einen Studienabschluss zu erlangen und meinen Lebensweg erfolgreich zu beschreiten.

Nicht vergessen möchte ich meine Freundin Claudia sowie meine Freunde Roman Vavrusa, Jürgen Leimlehner, Oliver Zeman, Sandra Angerer, Klaus Eder, Martin Rode, Ludwig Kampel, Eduard Rübenak und viele andere, bei denen ich mich für ihre langjährige Freundschaft und Hilfe bedanken möchte.

Motivation und Kurzfassung

Bei der Thematik der Tunnelsanierung handelt es sich um eine sehr aktuelle und praxisbezogene Fragestellung, was u.a. daran zu erkennen ist, dass der Umfang an Tunnelsanierungen in den letzten Jahren stetig ansteigt. Alleine in Österreich sind in den nächsten zehn bis fünfzehn Jahren insgesamt ca. 90 Tunnelbauwerke von einem umfangreicheren Sanierungs- oder Erneuerungsbedarf betroffen. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Zum einen sind es der alterungsbedingte Zustand der gemauerten Gewölbe, der einen gefahrlosen Betrieb der Tunnelanlage nicht mehr ermöglicht sowie ein unzureichendes, nach neuen Normen und Richtlinien nicht mehr zulässiges Lichtraumprofil. Auch aus Gründen des Brandschutzes und anderen sicherheitstechnischen Fragestellungen werden in Zukunft noch zahlreiche Tunnel an die aktuellen Sicherheitsbestimmungen adaptiert werden müssen.

Die rechtlichen Vorschriften und technischen Rahmenbedingungen, welche bei der Sanierung von Tunnelanlagen eingehalten werden müssen, sind dabei sehr komplex. Neben gesetzlichen Vorgaben von zentralen Stellen, wie z.B. der Europäischen Union, existieren eine Reihe nationaler Vorschriften und Regelungen. Auch die Baumaßnahmen und angewendeten Bauverfahren selbst sind einem ständigen Wandel unterworfen und werden laufend an den neuesten Stand der Technik angepasst.

In der vorliegenden Diplomarbeit werden deshalb Ursachen, die eine Tunnelsanierung erforderlich machen sowie Maßnahmen und Bauverfahren zur Tunnelsanierung im Detail erörtert und anhand von verschiedenen Beispielen aus der Praxis ausgeführt. Weiters werden die derzeit gültigen Richtlinien und Vorschriften sowie der aktuelle Stand der Sicherheits- und Brandschutzmaßnahmen besprochen und auf die Notwendigkeit detaillierter Vorerkundungsmaßnahmen hingewiesen. Auch die Versinterungsproblematik, welche in der Tunnelentwässerung oft zu Bauschäden und schlussendlich zur Notwendigkeit der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen führt, wird im Zuge dieser Diplomarbeit eingegangen.

Die angeführten Themengebiete werden zunächst allgemein und anschließend am aktuellen Fallbeispiel des Arlberg-Eisenbahntunnels behandelt.

Schlagwörter: Tunnelsanierung, Instandsetzung und bauliche Sanierung von Tunnel, Arlberg Eisenbahntunnel

Abstract

Tunnel refurbishment of railway tunnels using the example of the Arlberg rail tunnel

Currently, tunnel refurbishment measures concern a large number of tunnel buildings. In Austria alone, there are 90 Tunnels that need to be modernized or rehabilitated extensively over the next ten to fifteen years due to different reasons. Besides the fact that the age-related condition of the brick-built arches and vaults is inadequate and a safe operation cannot be ensured any longer, the minimum clearance outline doesn't meet the requirements of the newest standards and guidelines. Also for fire protection reasons and other technical safety problems, numerous tunnel buildings require rehabilitation of their physical fabric and safety equipment in the near future.

Legal standards and technical framework conditions concerning the refurbishment of a tunnel are very complex. Besides legal regulations from a central unit, like the European Union, there are a number of relevant national safety standards. Also the building measures and construction methods are continuously developing and are constantly upgraded to the latest technological standards.

This thesis deals with the reasons that make tunnel renovation work necessary and describes the building measures and construction methods for tunnel refurbishment in general terms and using specific examples from practice. Furthermore, the currently valid guidelines and appropriate safety and fire protection measures are outlined. Moreover, the necessity of detailed preliminary reconnaissance measures are indicated. The subject matter sintering and clogging of the drainage system is also discussed in the course of this work.

The mentioned topics are described in general terms at first and by using the current example of the Arlberg railway tunnel.

Keywords: Tunnel refurbishment, tunnel construction renovation, Arlberg rail tunnel

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Überblick.....	1
1.1 Allgemeines & Definition.....	2
1.2 Ursachen für die Notwendigkeit von Sanierungsmaßnahmen bei Eisenbahntunnel	3
1.3 STUVA-Arbeitskreis zur Tunnelsanierung	4
2 Vorschriften und technische Grundlagen.....	6
2.1 Rechtliche Vorschriften.....	6
2.1.1 Europarechtliche Grundlagen	6
2.1.2 Verfassungsgesetzliche Grundlagen	7
2.1.2.1 Eisenbahnrechtliche Baugenehmigung	7
2.1.2.2 Genehmigungsfreie Vorhaben.....	8
2.1.2.3 Vorgangsweise zur Durchführung einer Sanierung	8
2.2 Betriebliches Umfeld.....	9
2.3 Technische Rahmenbedingungen – Lichtraumprofil.....	10
2.3.1 Allgemeines	10
2.3.2 Lichtraumprofile der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB)	11
3 Sanierungsmaßnahmen bei Bahntunnel.....	14
3.1 Grundsätzliches und Sanierungsbereiche	14
3.2 Gewölbesanierung.....	15
3.3 Portalsanierung.....	17
3.4 Sanierung der Fahrbahn.....	17
3.4.1 Oberbauerneuerung	18

3.4.2	Untergrundsanie rung.....	18
3.4.3	Feste Fahrbahn	18
3.5	Sanierung von Bahntechnik und Bauausrüstung.....	19
3.6	Sanierung der Sicherheitseinrichtungen	20
4	Sicherheitsmaßnahmen für Bahntunnel	21
4.1	Allgemeines.....	21
4.2	Notfallkonzept und Risikoszenarien	22
4.3	Notfallmanagement und Einsatzkonzepte bei Fremdrettung.....	26
5	Brandschutz.....	29
5.1	Grundlegendes	29
5.2	Richtlinien und Vorschriften betr. Brandschutz	30
5.3	Anlagentechnischer Brandschutz	31
5.3.1	Brandrauchentlüftungssystem.....	31
5.3.2	Brandmeldesystem.....	32
5.3.3	Tunnellöschanlage	33
5.4	Baulicher Brandschutz.....	33
5.4.1	Anforderungen an den baulichen Brandschutz	33
5.4.2	Anforderungen an die Material- und Systemeigenschaften bei Brandereignissen .	35
5.4.2.1	Mindestanforderung an die Tragsicherheit – Schutzziele und Schutzniveaus	35
5.4.2.2	Brandbeständigkeit von Mauerwerksbauten	37
5.4.2.3	Brandbeständigkeit von Beton.....	37
5.4.2.4	Mechanische Eigenschaften von Beton und Stahlbewehrung im Brandfall	38
5.4.3	Bauliche Maßnahmen zur Erhöhung der Brandbeständigkeit in Tunnel.....	41
5.5	Betriebliche Brandschutzmaßnahmen	41
6	Bauverfahren zur Tunnel sanierung	43
6.1	Einleitung	43
6.2	Betriebliche Einschränkungen: Teil- oder Vollsperr e	43

6.3 Baubetrieb.....	46
6.3.1 Bauzeit und Baukosten	46
6.3.2 Arbeitsvorbereitung und Baustelleneinrichtung.....	47
6.4 Bauverfahren im Fahrbahn- und Sohlbereich	48
6.4.1 Schienenbearbeitung	48
6.4.2 Arbeiten am Schotterbett.....	49
6.4.3 Sohlerneuerung und -ausbau.....	52
6.4.3.1 Vorgangsweise und Geräte	52
6.4.3.2 Sohlabsenkung ohne und mit Sohlschluss.....	54
6.4.4 Errichtung einer Festen Fahrbahn	55
6.5 Bauverfahren im Gewölbebereich	56
6.5.1 Gewölbesanierung und -abtrag.....	57
6.5.2 Tunnelaufweitung mit Vortriebsportal	58
6.6 Bauverfahren zum Felsausbruch und -abtrag.....	59
7 Notwendigkeit von detaillierten Vorerkundungsmaßnahmen.....	61
7.1 Allgemeines und Zustandsbewertung	61
7.2 Messsysteme zur Durchführung einer Bestandsaufnahme	62
7.3 Fallbeispiele unzureichender Vorerkundung.....	63
8 Fallbeispiel Arlberg-Eisenbahntunnel	65
8.1 Einleitung	65
8.2 Untergrund und Bestandsausbau.....	67
8.3 Baumaßnahmen und Bauverfahren	70
8.4 Rettungswege und sicherheitstechnische Einrichtung	72
8.5 Abweichung von Ausschreibung und Ausführung	74
8.5.1 Lichtraumprofil.....	74
8.5.2 Trassenführung	75
8.5.3 Entwässerung.....	75
8.5.3.1 Tunnelgewölbe und Sohlkanal.....	75

8.5.3.2 Feste Fahrbahn.....	77
8.5.4 Kabel- und Randwege.....	78
8.5.5 Portal Langen am Arlberg	79
8.5.6 Ölabscheideanlage St. Anton am Arlberg.....	80
9 Versinterung von Tunnel drainagen	81
9.1 Grundlegendes	81
9.2 Art und Herkunft der Ablagerungen.....	82
9.3 Versinterungsentstehung.....	84
9.4 Vermeidung von Versinterungen.....	85
10 Zusammenfassung und Ausblick	86
<i>Abbildungsverzeichnis.....</i>	<i>i</i>
<i>Tabellenverzeichnis.....</i>	<i>iii</i>
<i>Literaturverzeichnis.....</i>	<i>iv</i>
<i>Curriculum Vitae.....</i>	<i>xiii</i>

Kapitel 1

Einleitung und Überblick

Die Sanierung von Tunnelbauwerken gewinnt in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Die Sanierung umfasst zum einen die Behebung von Schäden, die auf Grund von Nutzung und Exposition der Bauwerke aufgetreten sind sowie die Adaptierung der bestehenden Objekte an den Stand der Technik unter Einhaltung zeitgemäßer Sicherheitsanforderungen (vgl. Schwab & Neumayer, 2010).

In Österreich wurde eine große Zahl an Tunnelbauwerken Ende des 19., Anfang des 20. Jahrhunderts errichtet (STUVA, 2011). Dazu zählen beispielsweise der Arlberg-Eisenbahntunnel (Eröffnung 1884), der Tauern-, Karawanken- und Bosruck-Eisenbahntunnel (Fertigstellung jeweils 1906). Der älteste Eisenbahntunnel Österreichs mit einer Länge von 156 m liegt an der Südbahn bei Gumpoldskirchen und wurde im Jahre 1841 errichtet (eisenbahntunnel.at: „Gumpoldskirchner Tunnel“). Der erste Teilabschnitt der heutigen Wiener U-Bahn wurde 1888 in Betrieb genommen. Einer der ältesten Autobahntunnel Österreichs ist der Arlberg-Straßentunnel, welcher 1978 für den Verkehr freigegeben wurde.

Mittlerweile ist bei vielen dieser Bauwerke die technische Lebensdauer überschritten und es müssen Instandsetzungsmaßnahmen getätigt werden um Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit auch weiterhin gewährleisten zu können (vgl. Bergmeister, 2013). Der Arlberg-Eisenbahntunnel wurde beispielsweise erst vor wenigen Jahren (2004 bis 2010) einer Generalsanierung unterworfen, während eine umfassende Sanierung des Arlberg-Straßentunnels von 2014 bis 2017 geplant ist (oebb.at: „Nachrüstung Arlbergtunnel“, asfinag.at: „Generalsanierung Arlbergtunnel“). Hierbei lässt sich einerseits erkennen, dass die Thematik der Tunnelsanierung eine sehr aktuelle ist, andererseits, dass Straßentunnel im Vergleich zu Eisenbahntunnel generell in kürzeren Intervallen einer Sanierung zugeführt werden müssen, da sich Einwirkungen und Anforderungen je nach Verkehrsart

unterscheiden. Aber auch was Logistik und baubetrieblichen Randbedingungen betrifft, unterscheiden sich die Sanierungsarbeiten von Eisenbahn- und Straßentunnel grundlegend. Diese und weitere Aspekte sollen in dieser Arbeit zusammenfassend aufgezeigt werden. In diesem Kapitel soll im Folgenden ein kurzer Überblick über die Thematik der Tunnelsanierung im Allgemeinen gegeben werden.

1.1 Allgemeines & Definition

Schwab & Neumayer (2010) beschreiben die Tunnelsanierung als *Ertüchtigung oder Verbesserung von untertägigen Hohlraumbauten wie Verkehrstunnel der Bahn und Straße ebenso auch Bauwerke für Wasserkraftanlagen und untertägige Betriebe*. Dabei lassen sich generell zwei Themenbereiche unterscheiden:

- Instandsetzung und
- bauliche Sanierung.

Bei einer **Instandsetzung** wird nicht in das statische System des Bauwerks eingegriffen, es soll lediglich die Dauerhaftigkeit und Funktionstüchtigkeit einzelner Bauteile wiederhergestellt werden. Eine Instandsetzung umfasst im Wesentlichen eine Betonsanierung, um beispielsweise eine Korrosion der Stahlbewehrung zu verhindern, dabei wird schadhafter Beton der bestehenden Innenschale oberflächlich abgetragen und ausgetauscht. Ersetzt wird dieser Beton zumeist durch Spritzmörtel, wobei je nach Exposition auch Spachtel- und Anstrichmaterialien aufgebracht werden. Aber auch das Entfernen von Kalkablagerungen in Entwässerungssystemen oder optische Verbesserungen, wie das Aufbringen einer Tunnelbeschichtung, fallen unter die Definition der Instandsetzung (vgl. Schwab & Neumayer, 2010; Girmscheid et al., 2003).

Im Gegensatz dazu greifen **bauliche Sanierungsmaßnahmen** erheblich in das statische System des Tunnelbauwerks ein. Durch eine bauliche Sanierung erfolgt eine Adaptierung der bestehenden Bauwerke an den Stand der Technik unter Erfüllung zeitgemäßer Sicherheitsanforderungen. Die Vorgaben an die Tunnelsicherheit (v.a. Brandschutz) werden immer erheblicher, was die Notwendigkeit einer stetigen Umsetzung von Baumaßnahmen mit sich führt (Schneider & Horvath, 2006). Dazu zählen z.B. der gänzliche Austausch der Innenschale, die Errichtung von Querschlägen und Pannenbuchten oder der Abbruch von Zwischendecken. Aber auch eine Profilaufweiterung und die Anpassung des Lichtraumprofils an die aktuellen Vorschriften können zu den baulichen Sanierungsmaßnahmen gezählt werden.

Eine **Generalsanierung** umfasst neben Instandsetzung und baulicher Sanierung auch betriebliche und sicherheitstechnische Fragestellungen und betrifft die elektrotechnische und maschinelle Ausrüstung der Tunnelanlage (Schwab & Neumayer, 2010).

Unter **Instandhaltungsarbeiten** wiederum versteht man im Allgemeinen die laufende Wartung bzw. Reparaturen zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes der einzelnen Tunnelanlagen. Darunter fallen beispielsweise Reinigungsarbeiten von Tunnelwänden zur Erhöhung der Helligkeit (vgl. Steiner & Strommer, 2009) oder das Spülen von Drainageleitungen zur Entfernung von Ablagerungen und Versinterungen in den Leitungssystemen (vgl. Girmscheid et al., 2003; Dietzel, 2008).

1.2 Ursachen für die Notwendigkeit von Sanierungsmaßnahmen bei Eisenbahntunnel

In Europa weisen etliche Eisenbahn-Tunnelbauwerke eine Nutzungsdauer von über 150 Jahren auf (STUVA, 2011). Hier werden in den kommenden Jahren Teil- und Vollsanierungen erforderlich. Zur Sicherstellung der allgemeinen Verkehrssicherheit werden in allen Verkehrstunnel in regelmäßigen Zeitabschnitten Inspektionen durchgeführt und die Schäden erfasst. Bei älteren Tunnelbauwerken, welche unbekleidet oder gemauert sind, ergeben sich u.a. nach STUVA (2011) folgende Mängel, die für die Durchführung einer Sanierung ausschlaggebend sind:

- Profilprobleme bei Wagen oder Fahrleitung (Lichtraumprofil)
- Ankündigung bevorstehender Stabilitätsprobleme
- Schadhafte Mauerwerk
- Nasse Bereiche im Gewölbe
- Verfall des Betons durch aggressives Bergwasser
- Sicherheitstechnische Mängel

Neuere Tunnelobjekte sind zumeist in Betonbauweise ausgeführt, hier stellen sich die möglichen Ursachen für die Erfordernis von Sanierungsmaßnahmen wie folgt dar (vgl. Schwab & Neumayer, 2010):

- Instandsetzungsmaßnahmen zur Betonsanierung (Wiederherstellung der Dauerhaftigkeit des Betons)
- Tunnelsicherheit: Erhöhung der Sicherheitsmaßnahmen (z.B. Verbesserung der Brandbeständigkeit, Fluchtwegkennzeichnung)

Sind die Schäden bzw. Mängel derart ausgeprägt bzw. entsprechen die betrieblichen und technischen Rahmenbedingungen nicht mehr dem Stand der Technik, sodass auf längere Sicht ein gefahrloser Betrieb der Tunnelanlage nicht mehr garantiert werden kann, werden Sanierungsmaßnahmen unumgänglich und müssen daraufhin geplant und umgesetzt werden. Bei der Durchführung der Bauarbeiten gilt es, den Betrieb möglichst wenig zu beeinträchtigen, was große Anforderungen an die Baulogistik mit sich bringt.

Die genauen Ursachen, welche eine Sanierung bzw. Erneuerung notwendig machen sowie Bauverfahren und -methoden zur Erneuerung von Eisenbahntunnel und deren Rahmenbedingungen werden in nachfolgenden Kapiteln im Detail erörtert.

1.3 STUVA-Arbeitskreis zur Tunnelanierung

Unter Leitung der STUVA (Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen) wurde im Jahr 2010 der Arbeitskreis „Tunnelanierung“ eingerichtet, welcher sich aus Vertretern der Bahnbetreiber in Österreich (Österreichische Bundesbahn ÖBB), Deutschland (Deutsche Bahn DB) und der Schweiz (Schweizer Bundesbahn SBB), Fachkräften aus dem Forschungs- und Planungsbereich sowie der Maschinenbau-, Bau- und Bahnindustrie zusammensetzt (STUVA, 2011).

Bei der STUVA handelt es sich um eine unabhängige, gemeinnützige Forschungsinstitution mit Sitz in Köln, welche 1960 gegründet wurde und Grundlagenforschung sowie Spezialuntersuchungen v.a. auf dem Gebiet des unterirdischen Bauens sowie des Bahn- und Straßenverkehrs betreibt. Als offizielles Organ erscheint acht mal pro Jahr die Zeitschrift „Tunnel“, jedes zweite Jahr findet eine Tagung mit unterschiedlichen Themenschwerpunkten der Fachrichtungen Tunnelbau und Tiefbau statt (stuva.de: „Kurzprofil“).

Gegründet wurde der Arbeitskreis im Zug der Profilaufweitung zweier Bahntunnel in Deutschland (Mausenmühlen und Jähroder Tunnel). Hierbei wurde ein neues Bauverfahren, die sogenannte „Tunnel-im-Tunnel Methode“, kurz „TiT“, erstmals angewendet. Bei diesem Verfahren wird – unter Beibehaltung eines eingleisigen Bahnverkehrs – eine verschiebbare Einhausung durch den Tunnel gezogen, oberhalb dieser Einhausung wird das alte Mauerwerk entfernt und eine neue Tunnelschale im erweiterten Lichtraumprofil erstellt (vgl. Patentschrift 10 2007 014 104: „Verfahren zum Aufweiten eines Tunnels und Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens“).

Um den großen Forschungsbedarf hinsichtlich der Thematik der Tunnelanierung aufzuarbeiten, wurden für den Arbeitskreis spezifische Schwerpunktthemen festgesetzt. Dabei geht es laut Simon (2012) unter anderem um die Definition von Rahmenbedingungen

für Tunnelsanierungen bzw. Tunnelerneuerungen, die Beschreibung häufig wiederkehrender Problemstellungen bei der Sanierung von alten Tunnelbauwerken, eine Zusammenstellung von bereits erprobten Tunnelerneuerungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen sowie die Erstellung von zu erwartenden technischen Entwicklungen hinsichtlich der Tunnelsanierung. Ein weiteres wesentliches Ziel war die Erstellung eines Handbuchs als Handlungshilfe für Bauherren, Planer, Maschinenhersteller und ausführende Unternehmen (vgl. STUVA, 2011, Simon, 2012).

Weiters war die STUVA im europäischen Forschungsprojekt TUNCONSTRUCT (Technology Innovation in Underground Construction), welches sich unter anderem mit der Instandhaltung von Tunnelbauwerken und der Optimierung von Sanierungstechnologien beschäftigte, involviert (vgl. Rubin, 2007; ifb.tugraz.at: „TUNCONSTRUCT Project Evaluation“).

Kapitel 2

Vorschriften und technische Grundlagen

In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über die europarechtlichen Grundlagen, die nationalen rechtlichen Vorschriften sowie betriebliche und technische Rahmenbedingungen, die zur Gewährleistung eines sicheren Bahnbetriebs in Österreich eingehalten werden müssen und bei der Sanierung von Tunnelanlagen zum Tragen kommen, gegeben werden.

2.1 Rechtliche Vorschriften

2.1.1 Europarechtliche Grundlagen

Als europarechtliche Grundlage hinsichtlich der Sicherheit in Eisenbahntunneln existiert die von der europäischen Eisenbahnagentur ERA erarbeitete und vom europäischen Parlament beschlossene technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) bezüglich „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystem und im transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystem (Verordnung (EG) 163/2008). Diese enthält beispielsweise Brandschutzanforderungen an das Bauwerk und an Baumaterialien, regelt die Fluchtwegkennzeichnung, Notfallbeleuchtung, etc. Dabei handelt es sich um technische Vorschriften, herausgegeben von der Europäischen Kommission, um einen europaweiten interoperablen Eisenbahnverkehr zu ermöglichen und einen gewissen Sicherheitsstandard festzulegen (europa.eu: „Europäisches Hochgeschwindigkeitsbahnnetz“).

Diese technischen Spezifikationen bauen auf die allgemeine EG-Richtlinie 2008/57/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der EU auf. Diese Richtlinie legt grundsätzliche Anforderungen hinsichtlich Planung, Bau und Instandhaltung von Infrastrukturanlagen sowie die Aufgaben für Planer, Hersteller und

zuständige Behörden fest. Diese Anforderungen müssen in den einzelnen Mitgliedsstaaten durch nationale Rechts- und Verwaltungsvorschriften (Normen und nationale Vorschriften bzw. Richtlinien) umgesetzt werden (bmvit, 2009).

2.1.2 Verfassungsgesetzliche Grundlagen

Das Bundesgesetz über Eisenbahnen, Schienenfahrzeuge auf Eisenbahnen und den Verkehr auf Eisenbahnen (Eisenbahngesetz 1957 – EisbG) regelt die Organisation des österreichischen Schienenverkehrs (u.a. Zuständigkeit und Aufgaben der Eisenbahnbehörde, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, Interoperabilität) und nimmt hierbei auch Bezug auf die Richtlinie 2008/57/EG und die technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI; TSI, 2008), deren Bestimmungen anzuwenden sind.

Was die Festlegung des Ausbruchquerschnitts und die Linienführung von Tunnel betrifft, so gelten in Österreich die Richtlinie für das Entwerfen von Bahnanlagen auf Hochleistungsstrecken für Neu- und Ausbauten (kurz „HL-Richtlinien“), die unter anderem Tunnel- und Wannenschnitte (ÖBB, 2002a) sowie den baulichen Brandschutz (ÖBB, 2002b) regelt, und die Oberbauvorschrift B 50 zur Linienführung von Gleisen (ÖBB, 2004a).

Während in Deutschland im Zuge einer Sanierung von den Behörden die aktuellen gültigen Normen herangezogen werden müssen, gibt es für Österreich und für die Schweiz durchaus Ausnahmegenehmigungen, welche die Beibehaltung der bestehenden Gegebenheiten ermöglichen (z.B. Lichtraumprofil), sofern keine gravierenden Nutzungsänderungen in Folge der Sanierungsmaßnahmen eintreten (vgl. STUVA, 2011). Hierfür sind Genehmigungsverfahren entsprechend dem österreichischen Eisenbahngesetz (EisbG) erforderlich.

Betreffend eisenbahnrechtlicher Baugenehmigung kann unterschieden werden zwischen:

- § 31 EisbG: Erforderlichkeit einer eisenbahnrechtlichen Baugenehmigung
- § 36 EisbG: genehmigungsfreie Vorhaben

2.1.2.1 Eisenbahnrechtliche Baugenehmigung

Ist für die Durchführung der Sanierungsmaßnahmen eine eisenbahnrechtliche Genehmigung erforderlich, so ist diese bei der Behörde durch Einreichung eines Bauentwurfs und der notwendigen Gutachten über die projektrelevanten Fachgebiete (u.a. Wasser-, Forst- und Abfallrecht, Naturschutz, Umweltverträglichkeit, usw.) zu beantragen.

Dabei muss das Bauprojekt dem Stand der Technik entsprechen, den Betrieb und die Betriebssicherheit von Schienenfahrzeugen beinhalten sowie den Anforderungen des Arbeitnehmerschutzes genügen (vgl. Simon, 2012).

2.1.2.2 Genehmigungsfreie Vorhaben

Laut in Österreich gültigem Eisenbahngesetz 1957 idgF ist bei folgenden Tätigkeiten keine eisenbahnrechtliche Baugenehmigung erforderlich:

- *bei Neu-, Erweiterungs-, Erneuerungs- und Umbauten, soweit sie keine umfangreichen zu einer Verbesserung der Gesamtleistung der Eisenbahn führenden Arbeiten bedingen*
- *bei Veränderungen eisenbahnsicherungstechnischer Einrichtungen und für die Inbetriebnahme von veränderten Schienenfahrzeugen, soweit die Veränderungen keine umfangreichen zu einer Verbesserung der Gesamtleistung führenden Arbeiten bedingen*
- *für die Inbetriebnahme von Kleinstfahrzeugen mit Schienenfahrwerk sowie Zweiwegefahrzeugen, die ausschließlich in Bereichen eingesetzt werden, die für den sonstigen Verkehr auf der Eisenbahn gesperrt sind*
- *bei Abtragungen*

Als Voraussetzung müssen diese Arbeiten *unter der Leitung einer im Verzeichnis gemäß § 40 geführten Person ausgeführt* werden (Studium an einer Universität oder FH, praktische Berufserfahrung > 7 Jahre und Kenntnis der Rechtsvorschriften) und dürfen *subjektiv öffentliche Rechte Dritter* nicht verletzen (siehe EisbG).

Kommt es im Zuge der Sanierung zu größerer Bautätigkeit, wie z.B. der Errichtung einer zweiten Röhre, ist die umweltrechtliche Relevanz abzuklären und ggf. eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchzuführen. Vorhaben, welche einem UVP-Verfahren oder einer UVP im vereinfachten Verfahren unterliegen, sind dem Bundesgesetz über die Prüfung der Umweltverträglichkeit (Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 – UVP-G 2000) zu entnehmen.

2.1.2.3 Vorgangsweise zur Durchführung einer Sanierung

In Österreich werden in regelmäßigen Abständen Inspektionen an den Tunnelbauwerken durchgeführt. Wird im Zuge einer derartigen Überprüfung festgestellt, dass Bedarf für eine Sanierung vorliegt, so wird in einem Infrastrukturentwicklungsausschuss der ÖBB ein Antrag auf Aufnahme des Projektes in den Rahmenplan eingebracht. Bei Zustimmung des Antrags

wird die Finanzierung dieses Projektes freigegeben und die Planungsarbeiten können ausgeschrieben werden (STUVA, 2011). Für die Sanierung und Instandsetzung gelten die Richtlinie für das Entwerfen von Bahnanlagen (ÖBB, 2002a, 2002b), die RVS-Richtlinien 09 Tunnel, im Detail RVS 09.01 (Tunnelbau), RVS 09.02 (Tunnelausrüstung), RVS 09.03 (Sicherheit) und RVS 09.04 (Erhaltung und Betrieb) der österreichischen Forschungsgesellschaft für Straße, Schiene und Verkehr sowie der Instandhaltungsplan für konstruktive Ingenieurbauten der ÖBB (ÖBB, 2009a). Die Planung wird nach offizieller Ausschreibung, in welcher Strecken- und Bahnbetriebskonzept, Ausbaugeschwindigkeit, Lichtraumprofil, Sicherheitsanforderungen, ergänzende Nutzungsanforderungen und zumeist das Tunnelsystem selbst (eingleisig, zwei- oder mehrgleisig, zwei oder mehrere Tunnel, die ein- oder mehrgleisig ausgebaut werden) vorgegeben werden, zumeist von externen Ingenieurbüros durchgeführt (vgl. STUVA, 2011).

2.2 Betriebliches Umfeld

Je nach Wichtigkeit der Strecke sind unterschiedliche Beeinträchtigungen des Bahnverkehrs zulässig, oftmals kann der Bahnbetrieb jedoch nicht stillgelegt werden. Das Eingreifen in den laufenden Streckenbetrieb spielt bei der Wahl des Bauverfahrens – neben den technischen Anforderungen – eine entscheidende Rolle (vgl. Kap. 6). Dieses entscheidet über die notwendige zeitliche Unterbrechung während der Ausführung der Sanierungsarbeiten. Des Weiteren hat auch das vorhandene Tunnelprofil maßgeblichen Einfluss auf die notwendigen betrieblichen Einschränkungen im Zuge der Bauarbeiten. Während in zweigleisigen Tunnel eine Vielzahl von Sanierungsmaßnahmen unter Beibehaltung eines eingleisigen Betriebs durchführbar sind, können in eingleisigen Tunnel notwendige Arbeiten zumeist nur bei ganzlichem Betriebsstillstand ausgeführt werden. Die technischen Möglichkeiten für Tunnelarbeiten bei laufendem Eisenbahnbetrieb sind in Kap. 6.2 sowie 6.3.3.2 beschrieben bzw. in Tab. 2 und Tab. 3 überblicksmäßig veranschaulicht (Simon, 2012).

Grundsätzlich kann aus betrieblicher Hinsicht zwischen Vollsperrung und Teilsperrung (Sanierungsmaßnahmen unter teilweisem Betrieb, z.B. eingleisiger Betrieb) unterschieden werden. Totalsperrungen sind je nach Strecke zumeist nur bedingt durchführbar. Beim Bahnbetreiber ÖBB ist bei einer möglichen Umleitung eine Sperre von drei Nächten pro Monat möglich, ansonsten ist eine Vollsperrung von drei Tagen im Jahr zulässig. Außerdem können die Fahrtintervalle verlängert werden und so der Zeitraum ohne Zugbetrieb – was v.a. in der Nacht sinnvoll ist – vergrößert werden. Weiters gibt es die Möglichkeit, Nachtintervalle mit Einspurbetrieb durchzuführen. Eingleisiger Betrieb ist aus Sicherheitsgründen im Baustellenbereich an Langsamfahrten gebunden, provisorische

Schutzeinrichtungen werden nichtsdestotrotz in der Regel auf eine Geschwindigkeit von mindestens 100 km/h bemessen (STUVA, 2011).

Erfolgt die Sanierung während des Betriebs des Tunnels, so muss sichergestellt werden, dass alle vor Baubeginn auf der jeweiligen Strecke zugelassenen Fahrzeuge auch weiterhin ungehindert verkehren können, was Anforderungen an das freizuhaltende Lichtraumprofil stellt. Das Vorhandensein von Einragungen in das Lichtraumprofil sind keinesfalls zulässig. Gefährdende Arbeiten, wie beispielsweise das Durchführen von Sprengungen, sind bei laufendem Betrieb nicht erlaubt, um das Risiko für den Bahnbetrieb möglichst gering zu halten (STUVA, 2011).

2.3 Technische Rahmenbedingungen – Lichtraumprofil

Die technischen Rahmenbedingungen werden, neben angestrebter Entwurfsgeschwindigkeit oder Leistungsfähigkeit des sanierten Tunnelbauwerks – neben Mindestradien, Überhöhung, etc. – v.a. vom geltenden Lichtraumprofil bedingt. Das optimale Sanierungsverfahren, die gerätetechnische Ausstattung sowie die Planung der zeitlichen und logistischen Durchführung der Sanierungsarbeiten können erst nach Festlegung des endgültigen Lichtraumprofils ermittelt und festgesetzt werden.

2.3.1 Allgemeines

DIN EN 15273-3 (2012-07), welche die Lichtraumprofile für Bahnanwendungen regelt, definiert Lichtraum bzw. das Lichtraumprofil als *Raum in Bezug auf das jeweilige Gleis, das so genannte Bezugsgleis, der von allen Gegenständen oder Anlagen freizuhalten ist, auch im Hinblick auf den Verkehr auf den Nachbargleisen, um einen sicheren Betrieb auf diesem Bezugsgleis zu ermöglichen*. Dabei können drei Arten von Lichtraumprofilen unterschieden werden:

- Absolute Grenzlinie: *Raum, der nie überschritten werden darf und die Grenze für den normalen Verkehr darstellt*
- Mindestlichtraum: *Raum, der unter Berücksichtigung von Reserven für die Instandhaltung nicht überschritten werden darf*
- Lichtraum (Nenn-Lichtraum, Regellichtraum): *Raum, der frei von Objekten aller Art zu halten ist, um den Zugbetrieb und die Oberbauinstandhaltung zu ermöglichen, wobei Sicherheitszuschläge, Instandhaltungszuschläge und Reservezuschläge nach Wahl des Infrastrukturbetreibers enthalten sind*

Die absolute Grenzlinie enthält nur bestimmte Zuschläge bzw. Lichtraumerweiterungen (M_1), welche aufgrund von vor Ort erhobenen Parametern festgesetzt wurden. Die absolute Grenzlinie gewährleistet lediglich die Verkehrssicherheit zum Zeitpunkt der Inspektion. Der Mindestlichraum enthält einen zusätzlichen Aufschlag des Lichtraumprofils (M_2), der Verschiebungen und Verschleißerscheinungen berücksichtigt, die innerhalb von zwei Instandhaltungsfristen zutage treten können. Der Regellichraum wiederum enthält neben den Erweiterungen M_1 und M_2 noch einen dritten Zuschlag M_3 , der Lademaßüberschreitungen, zukünftige Änderungen der Trassierung oder des Lichtraumes u.ä. berücksichtigt (vgl. DIN EN 15273-3, 2012-07).

Grundsätzlich werden kinematische und statische Begrenzungslinien unterschieden, wobei heutzutage durchwegs kinematische Begrenzungslinien in der Praxis zur Anwendung kommen. Diese sind auf die jeweiligen Fahrzeuge abgestimmt und berücksichtigen u.a. eine weiche Federung der Wagons und hohe Fahrtgeschwindigkeiten und bringen damit ein höheres Maß an Sicherheit. Zur Veranschaulichung ist die kinematische Begrenzungslinie für den oberen Bereich (Begrenzungslinie G_1) in Abb. 1 dargestellt. Für detailliertere Informationen hinsichtlich aktueller Begrenzungslinien siehe ÖBB, 2002.

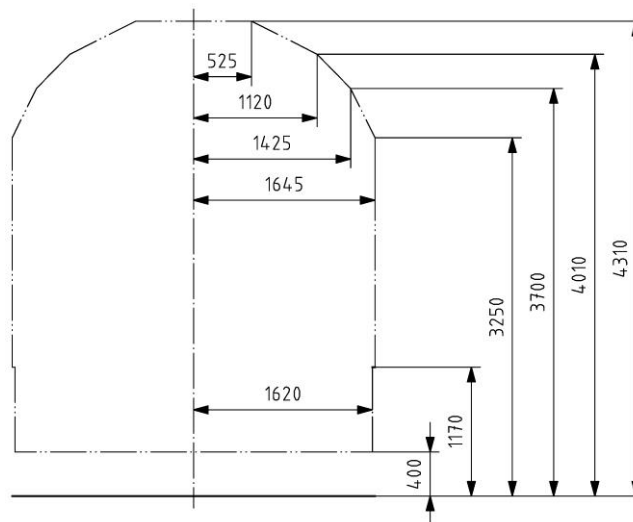


Abb. 1: Kinematische Begrenzungslinie G_1 nach DIN EN 15273-3 (2012-07)

2.3.2 Lichtraumprofile der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB)

In Österreich kommen auf dem Streckennetz der Österreichischen Bundesbahnen derzeit nachstehende vier Lichtraumprofile (Abb. 2), die den sicheren Verkehr von Fahrzeugen unterschiedlicher kinematischer Bezugslinien gewährleisten, zur Anwendung (vgl. ÖNORM EN 15273-3, 2013-06). Der vormals in den ÖBB-Dienstvorschriften geregelte Regellichraum (ÖBB DV B51 ZOV7, Zusatzbestimmung zur DV B 51 Oberbauvorschrift) entspricht nicht

Vorschriften und technische Grundlagen

mehr den aktuellen Anforderungen (vgl. bmvit, 2004). Für die zutreffenden kinematischen Bezugslinien wird auf STUVA (2011) verwiesen.

- LPR 1 – allgemein ($R \geq 250$ m)
- LPR 1 – feste Fahrbahn ($R \geq 3000$ m)
- LPR 2 ($R \geq 250$ m)
- LPR 3 ($R \geq 250$ m)

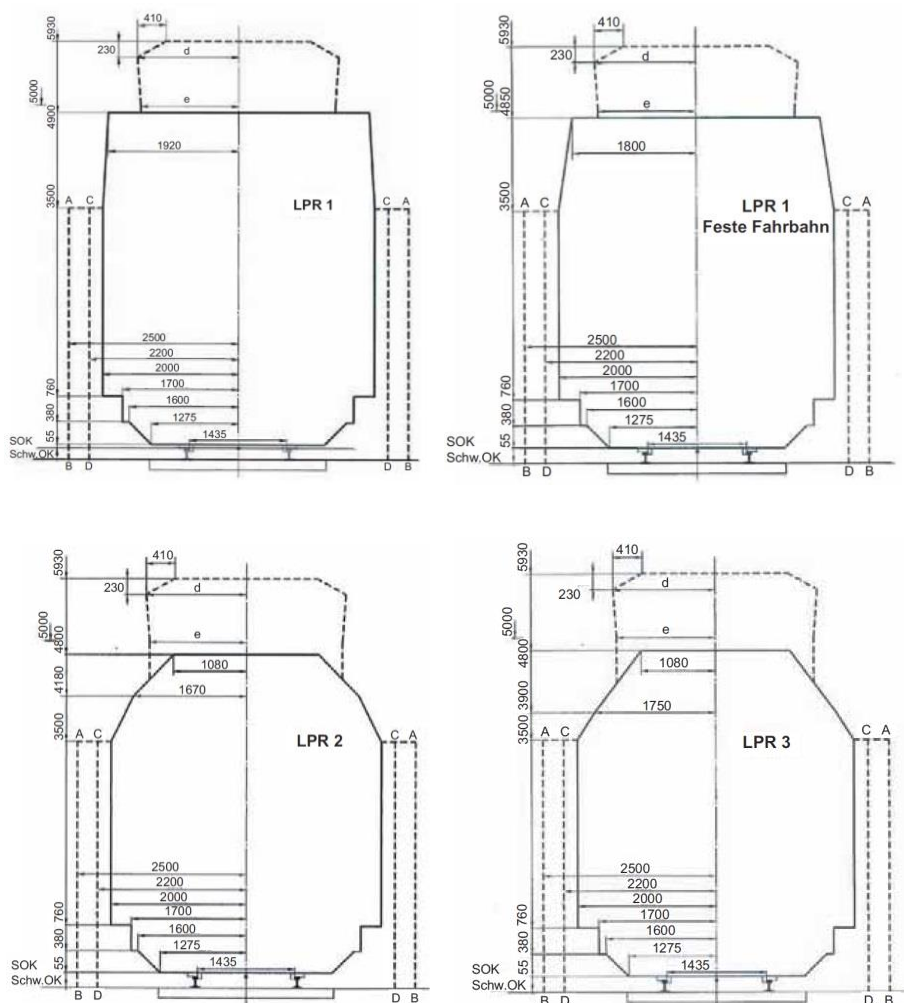


Abb. 2: Aktuelle Lichtraumprofile der ÖBB (nach STUVA, 2011)

Weiters existieren Tunnelregelquerschnitte je nach Bauweise, Anzahl der Gleise, ausgelegter Geschwindigkeit, Vortriebsart, geschlossener oder offene Bauweise und Art des Oberbaus (Schotter oder Feste Fahrbahn). Diese sind als Planbeilagen der HL-Richtlinie (ÖBB, 2002) beigelegt. Beispielhaft ist der Regelquerschnitt für die geschlossene Bauweise bei konventionellem und TVM-Vortrieb (Tunnelvortriebsmaschine) bei zweigleisigem Ausbau, einer projektierten Geschwindigkeit von ≤ 200 km/h sowie bei Herstellung einer Festen Fahrbahn in Abb. 3 dargestellt.

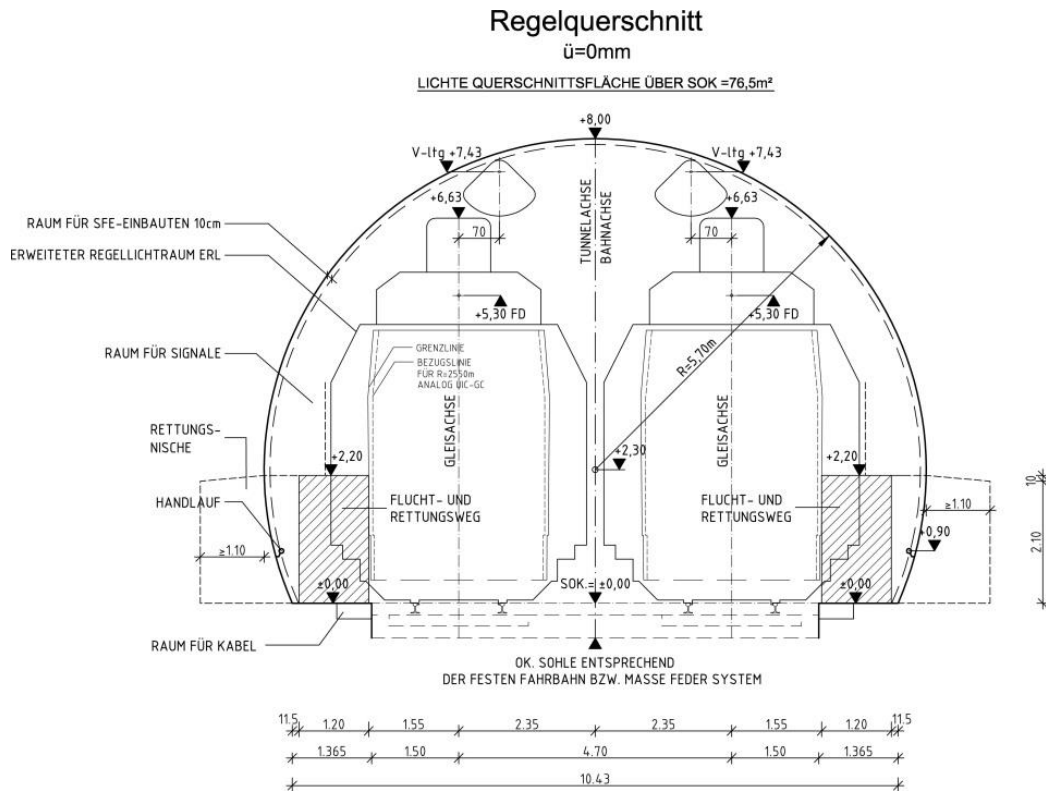
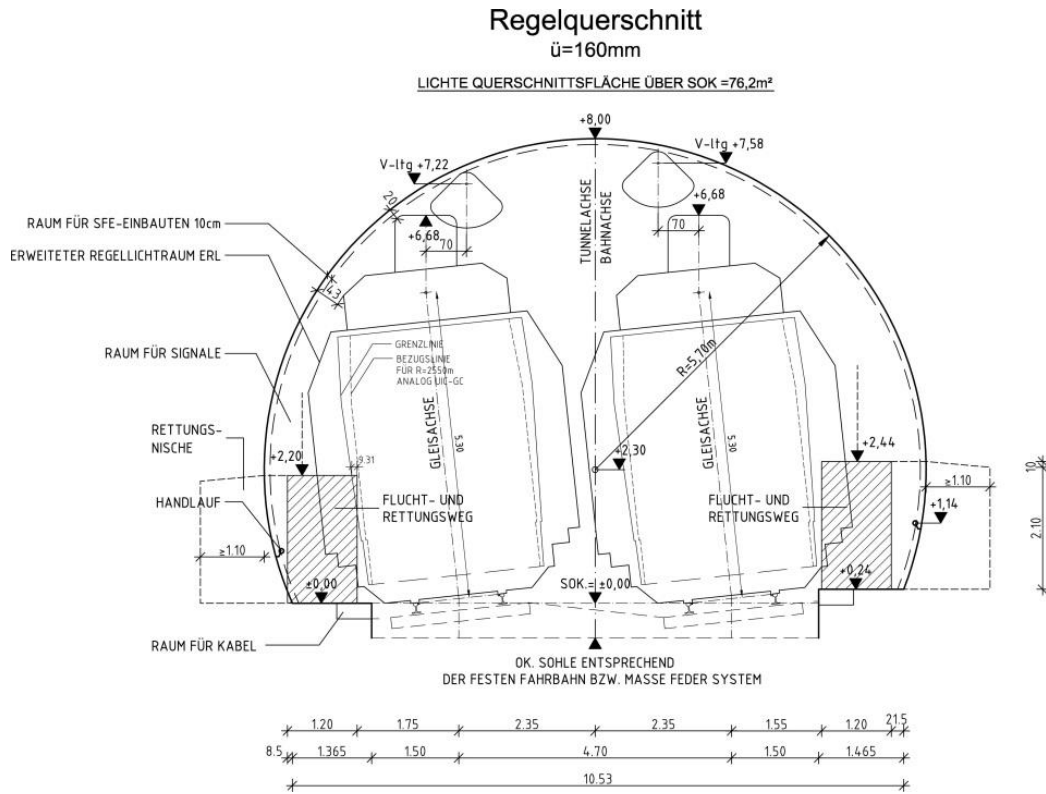


Abb. 3: ÖBB-Regelquerschnitt für einen zweigleisigen Tunnel mit Fester Fahrbahn (ÖBB, 2002, Plannummer 500); oben: im Bogen, unten: in der Geraden

Kapitel 3

Sanierungsmaßnahmen bei Bahntunnel

3.1 Grundsätzliches und Sanierungsbereiche

Die Ursachen für die Notwendigkeit von Sanierungsmaßnahmen sind vielfältig und wurden bereits in Kap. 1.2 kurz angeschnitten. Grundsätzlich geht es um die Behebung von Tunnelschäden, die Anpassung an geänderte Betriebsbedingungen sowie das Einhalten neuer Richtlinien und Normen.

Diese dienen vorwiegend der Anpassung bzw. Vergrößerung des Lichtraumprofils, zur Verbesserung der Fahrbahn (Stopfen des Schotterbetts, Einrichten einer Festen Fahrbahn), zur Behebung baulicher Schäden und der Erneuerung der Tunnelauskleidung, Maßnahmen zur Verlängerung der Gebrauchsdauer und zur Erhöhung der Sicherheit der Tunnelanlage. Gerade in Österreich gehen substanzverbessernde Maßnahmen oftmals mit einer sicherheitstechnischen Nachrüstung einher (vgl. STUVA, 2011).

Im Detail lassen sich die Sanierungsmaßnahmen auf folgende Bereiche zusammenfassen:

- Gewölbe bzw. Tunnelschale
- Portalbereich
- Fahrbahn
- Bahntechnik und Bauausrüstung
- Sicherheitseinrichtungen

3.2 Gewölbesanierung

Die Gewölbesanierung umfasst die Sanierung aller Konstruktionselemente des Gewölbes bzw. der Innenschale des Tunnels. Es sind dabei nach STUVA (2011) folgende Bauteile betroffen bzw. nachfolgende Sanierungsarbeiten involviert:

- 1) *Spritzbetonsicherung, Rippenbauweise, Firstaufweitung, Verfüllen von Ausbrüchen (Betonplomben), Einbau einer Spritzbetonschale unter vorhandenem Ausbau*
- 2) *Neuverfugung von Mauerwerk*
- 3) *Systemankerung zur Erhöhung der globalen Standsicherheit und der Systemduktivität*
- 4) *Verdübelung von abgelösten Spritzbetonschalen*
- 5) *Verfüllung von Hohlstellen im und hinter dem Ausbau (Injektionen)*
- 6) *Erneuerung der Entwässerung*
- 7) *Herstellung Gewölbeabdichtung und Drainage*
- 8) *Einbau einer Sohle/Sohlverstärkung/Gleisabsenkung*
- 9) *Unterfangungen der Widerlager durch Kleinbohrpfähle, Injektionen oder Beton*

Ad 1) Eine Spritzbetonsicherung sorgt für eine Versiegelung der Gewölbeoberfläche und verhindert eine weitere Auflockerung und das Herabfallen von schadhaftem Mauerwerk oder Fels (vgl. Girmscheid, 2008). Auf diese Weise können auch Ausbrüche versiegelt und mit sogenannten Betonplomben verfüllt werden.

Bei der Rippenbauweise (Abb. 4) werden aus statischen Gründen Stahlbetonrippen in einem bestimmten Abstand im Gewölbe- bzw. Firstbereich des Tunnels eingebaut. Dazu muss zuvor der bestehende Ausbau (z.B. Mauerwerk) ausgefräst oder ausgemeißelt werden um anschließend die Bewehrung einzubringen, diese zu verankern und schließlich mit Spritzbeton zu verfüllen (vgl. Simon, 2008).

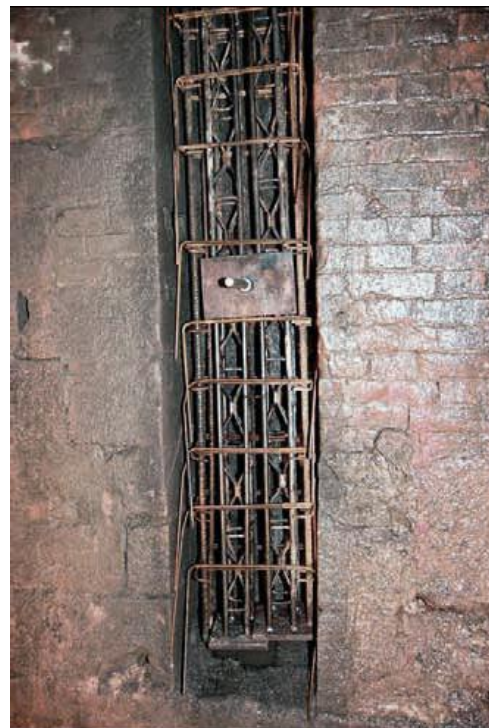


Abb. 4: Einbau einer Stahlbetonrippe in bestehendes Mauerwerk (STUVA, 2011)

Für eine Firstaufweitung wird der Ausbruch mittels Teilschnittmaschine, Tunnelbagger mit Reißzahn, Hydraulikmeißel oder Fräskopf bewerkstelligt (STUVA, 2011).

Als Sicherung der verschiedenen Bauzustände im Gewölbebereich kommen vorwiegend Spritzbeton, Anker (zumeist Systemankerung), Baustahlmatten und Tunnelbögen zum Einsatz (vgl. Jodl, 2011).

Ad 2) Die Neuverfugung von Mauerwerk kann händisch oder maschinell erfolgen, außerdem ist eine Verträglichkeit von historischem und neuem Mörtel zu prüfen (STUVA, 2011).

Ad 3) Falls ein dauerhafter Einsatz von Ankerungselementen beabsichtigt wird, ist für einen entsprechenden Korrosionsschutz zu sorgen. Bei Injektionsbohrankern kommt es überdies durch das Einbringen von Injektionsmörtel zu einer zusätzlichen Vergütung des Gebirges. Hohlräume und Klüfte werden verfüllt und ein Verbund zwischen den Trennflächen hergestellt (vgl. Adam, 2011).

Ad 4) Löst sich eine Spritzbetonschale mit noch intakter Bewehrung vom unterlagernden Fels oder Ausbau (vgl. Kap. 8.3), so kann diese mittels Befestigungselementen mit dem dahinterliegenden Gebirge verdübelt werden. Für Dübel ist – wie auch bei Ankern – auf einen entsprechenden Korrosionsschutz zu achten (vgl. STUVA, 2011).

Ad 5) Zur Vergütung des umliegenden Gebirges (Verfüllen von Hohlräumen, Abdichten von Wasserzutritten, etc.) werden häufig Injektionen verwendet. Als Injektionsgut können je nach Anforderungen und vorliegenden Gegebenheiten (Porosität und Durchlässigkeit des Gesteins) eine Zement- oder Feinstbindemittelsuspension, Wasserglas oder diverse Kunstharze dienen (vgl. Jodl, 2011).

Ad 6) Es muss ein auf die hydrologischen Verhältnisse (Wassermenge, -chemismus, Druckverhältnisse, usw.) abgestimmtes Entwässerungssystem gewählt werden. Dabei sollte bereits bei der Errichtung auf die Möglichkeit der Durchführung von Instandhaltungsarbeiten Rücksicht genommen werden, um das Entwässerungssystem laufend von Versinterungen und anderen Verunreinigungen befreien zu können (z.B. Spülen der Leitungen; vgl. Kap. 10).

Ad 7) Um anfallendes Gebirgswasser bestmöglich auffangen und ableiten zu können, sind punktuelle, linienhafte (Drains) oder flächenhafte Drainagesysteme (Noppenbahnen) einzurichten (Jodl, 2011). Außerdem können zu Abdichtungszwecken Spritzabdichtungen aufgetragen und eine Spritzbetonschale eingebaut werden.

Ad 8) Je nach statischen Erfordernissen können bauliche Sanierungsmaßnahmen den Einbau einer durchgehenden Sohle als Sohlplatte oder als Sohlgewölbe mit Krümmung

erfordern. Muss dafür Material aus der Sohle abgetragen werden, so kann dies mittels Sprengen oder mechanischem Lösen erfolgen. Beim Einbau selbst ist auf eine ausreichende Abdichtung und Funktionalität der Entwässerung zu achten und die Expositionsklasse des Sohlbetons in Abhängigkeit des Wasserchemismus nach ÖNORM EN 206-1 (2005-11) zu wählen (vgl. STUVA, 2011).

Ad 9) Eine Unterfangung der Widerlager kann mittels Kleinbohrpfählen, welche die vorhandene Fundamentsohle durchörtern und in den umgebenden Fels einbinden, oder durch Verpressen von Injektionsmaterial erfolgen (vgl. Adam, 2011).

3.3 Portalsanierung

Das Portal stellt den Einfahrtspunkt in den Tunnel dar und steht damit mit den oberflächennahen Prozessen, wie etwa Hangbewegungen, Oberflächenwasserandrang oder Steinschlaggefährdung, in direktem Kontakt. Die Sanierung von Portalen umfasst im Allgemeinen laut STUVA (2011) folgende Arbeiten:

- Reinigung der Oberfläche von Pflanzen, Versinterungen, o.ä. durch Wasser-, Wirbel- oder Nebelstrahlverfahren oder durch Abbürsten
- Aufbringen oder Sanieren von Schutzmaßnahmen gegen Durchfeuchtung oder eindringendes Wasser (z.B. Portalabdeckung)
- Erneuerung von schadhaftem Mauerwerk und Ausbaumaterial
- Neuverfugen von schadhaftem Mauerwerk
- Bei Bedarf Rückverankerung von Flügelwänden mittels Anker in das umliegende Gebirge

Außerdem müssen angrenzende Böschungen bei Bedarf stabilisiert und mit Steinschlag-Schutzeinrichtungen versehen werden. Handelt es sich außerdem um ein denkmalgeschütztes Bauwerk, so sind die Sanierungsmaßnahmen im Vorhinein mit dem zuständigen Denkmalamt abzustimmen.

3.4 Sanierung der Fahrbahn

Eine Sanierung der Fahrbahn kann sowohl vom Gleis aus (Arbeitszug) oder vom Zweiwegebagger in Betriebspausen erfolgen, als auch mit gleisungebundenen Geräten bei längerer Vollsperrung. Grundsätzlich lassen sich die Sanierungsmaßnahmen die Fahrbahn betreffend in drei Gruppen unterteilen (STUVA, 2011):

- Oberbauerneuerung
- Untergrundsanieuerung
- Einbau einer Festen Fahrbahn

3.4.1 Oberbauerneuerung

Eine Oberbauerneuerung kommt hauptsächlich dann zur Anwendung, wenn der Gleisschotter den materialtechnischen Anforderungen nicht mehr gerecht wird und ausgetauscht werden muss, eine zu geringe Mächtigkeit besitzt oder eine Anpassung der Linienführung an das vorhandene Lichtraumprofil durchgeführt wird. Im Zuge der Vorerkundung sind Schottermächtigkeit und Lage des Erd- oder Felsplanums zu ermitteln um anschließend die Oberbauerneuerung effektiv planen zu können (vgl. Kap. 7). Dabei ist auf vorhandene Einbauten, wie Kabel oder Entwässerungskanäle, Rücksicht zu nehmen.

3.4.2 Untergrundsanieuerung

Eine Untergrundsanieuerung zielt auf die Verbesserung der sich unterhalb des Schotteroberbaus befindlichen Frostschutzschicht, den eingelegten Geotextilien (Geogitter oder Vliese) und v.a. dem darunterliegenden Fels- oder Erdreichs ab. Die Frostschutzschicht kann dabei ausgetauscht, Geogitter und Vliese erneuert werden. Eine Verbesserung des unterlagernden Fest- oder Lockergesteins kann mittels Injektionen oder dem Einbringen von Kleinbohrpfählen erreicht werden.

3.4.3 Feste Fahrbahn

Bei der Festen Fahrbahn wird der herkömmliche lose Schotter, welcher für die Abführung der Lasten in den Untergrund sowie die Aufnahme der Schubkräfte zuständig ist, durch einen festen Oberbaufahrstrang, zumeist aus Beton, ersetzt. Dieses System wird v.a. für hochbelastete Abschnitte in Tunnelbauten, Wannen oder Galerien eingesetzt, in welchen Züge mit hoher Geschwindigkeit verkehren. Während beim Schotterbett die einzelnen Komponenten in losem Zustand vorliegen und durch eine Verzahnung der einzelnen Gesteinskomponenten untereinander einwirkende Kräfte (Normal-, Schub- und Querkräfte) ableiten können, besitzt eine Feste Fahrbahn eine elastische Schicht zwischen Schiene und Schwelle (z.B. Gummi) um die geringere Verformung des Betons zu kompensieren und die geforderte Elastizität und Dämpfung des Systems zu gewährleisten (vgl. Eisenmann & Leykauf, 2000; Zierl, 2012).

Der Baugrund muss sich jedoch für den Einbau einer Festen Fahrbahn entweder a priori eignen bzw. nachträglich verbessert werden um die dynamischen Lasten in den tieferen Untergrund ableiten zu können.

Oberbau- und Untergrundsanierung sowie eine Feste Fahrbahn lassen sich auch bei halbseitigem Einbau während des Betriebs durchführen. Dabei sind jedoch die entsprechenden Sicherheitsvorschriften einzuhalten (z.B. Freihalten des Lichtraumprofils) sowie Langsamfahrten auf dem in Betrieb befindlichen Gleis vorzuschreiben (STUVA, 2011).

3.5 Sanierung von Bahntechnik und Bauausrüstung

Die Bahntechnik umfasst alle technischen Anlagen, wie Gleisbau (Gleis- und Weichenneulagen, Erhaltung von Gleisen und Weichen), Kabelanlagen (zum „Übertragen“ von Strom, Signalen, Wasser, etc.), Bahnstrom, Energieversorgung, Signaltechnik, Telekommunikation, etc., die für den Betrieb eines Tunnels erforderlich sind. Die Bahntechnik umfasst ebenfalls die diversen Einrichtungen der Sicherheitstechnik (vgl. Kap. 3.2) und ist einer ständigen Wartung unterworfen.

Der Bahnstrom der ÖBB ist ein Einphasenwechselstrom mit $15 \text{ kV}/16^{2/3} \text{ Hz}$, bei neueren Hochleistungsstrecken mit $25 \text{ kV}/50 \text{ Hz}$, wobei die Speisung der Unterwerke mit 110-kV-Bahnstromleitungen erfolgt. Zur Erzeugung von Bahnstrom werden von den ÖBB acht eigene Wasserkraftwerke betrieben (Wikipedia, Seite „Österreichische Bundesbahnen“). Die Stromzufuhr erfolgt im österreichischen Zugnetz generell mittels Oberfahrleitung, die im Tunnel entweder als Kettenwerk unter Verwendung zusätzlicher Tragseile oder als Deckenstromschiene ausgeführt ist. Hierbei ist auf die Einhaltung des Lichtraumprofils und der vorgeschriebenen Sicherheitsabstände zu achten, um das Entstehen von Kurzschluss-Lichtbögen zwischen Bauwerk und Stromleitungen zu vermeiden (STUVA, 2011).

Für die Stromversorgung der Zugsicherung (z.B. Signaltechnik oder Beleuchtung) sowie der Bauausrüstung bei Durchführung von Sanierungsarbeiten ist generell Wechselstrom $230 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ notwendig. Die Transformation geschieht in sogenannten Netzstationen, hier wird die elektrische Energie aus dem Mittelspannungsnetz auf die im Ortsnetz verwendete Niederspannung umgewandelt (Schwab, 2006).

Was die Signaltechnik betrifft, so muss die Funktionsfähigkeit der Signale sowie eine freie Sicht auf diese gewährleistet werden. Des Weiteren müssen Anforderungen an Windlast, Staub und Druckschwankungen erfüllt werden (vgl. STUVA, 2011).

Kommunikationseinrichtungen umfassen Zugfunk, Notsprechstellen und Fernsprechanlagen, die eine Kommunikation während des Betriebs bzw. im Falle einer Störung sicherstellen.

3.6 Sanierung der Sicherheitseinrichtungen

Zur Gewährleistung der Sicherheit, sowohl in Straßen-, als auch in Eisenbahntunnel, existieren zahlreiche Einrichtungen, die vom Betreiber bereitzustellen und auf dem neuesten Stand der Technik zu halten sind um im Falle einer Notsituation (z.B. Brand, mit allen Folgeerscheinungen wie starke Rauch- oder Wärmeentwicklung) das Risiko von Personen- und Sachschäden zu minimieren.

Die Thematik der Tunnelsicherheit stellt heutzutage den Hauptgrund zur Erfordernis von Sanierungsmaßnahmen in Straßen- und Bahntunnel dar (vgl. Neumann, 2010). Dabei werden im Rahmen des Sicherheitsmanagements Konzepte und Maßnahmen erarbeitet um eine möglichst hohe Sicherheit in den jeweiligen Tunnelbauwerken zu garantieren. Da jeder Tunnel für sich ein individuelles Bauwerk mit speziellen Rahmenbedingungen darstellt, sind die durchzuführenden Maßnahmen sehr unterschiedlich und auf das vorhandene System abzustimmen.

Der Themenbereich der Tunnelsicherheit bzw. die betreffenden Sicherheitsmaßnahmen sollen in folgendem Kapitel (Kap. 4) im Detail behandelt werden.

Kapitel 4

Sicherheitsmaßnahmen für Bahntunnel

4.1 Allgemeines

Unfälle bzw. Notfälle in Tunnel sind im Allgemeinen sehr seltene Ereignisse (Neumann & Sommerlechner, 2009). Kommt es jedoch zum Eintreten eines solchen Ereignisses, so ist das Schadensausmaß zumeist sehr hoch und im Vergleich viel größer als auf freier Strecke. Gerade im Brandfall wird ein überaus hohes Schadensausmaß erreicht, was die Straßentunnelbrände von Euro-, Montblanc- und Tauern-Tunnel eindringlich verdeutlichen. Das Risiko, definiert als Produkt aus Eintretenswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß, kann somit im Hinblick auf Tunnelereignisse aufgrund des hohen möglichen Schadensausmaßes als erheblich eingestuft werden (vgl. Tamparopoulos, 2013). Deshalb werden heutzutage umfassende Sicherheitsmaßnahmen eingerichtet und Notfallkonzepte erarbeitet um im Falle eines Unfalls schnellstmöglich und optimal handeln zu können.

Für Eisenbahntunnel existiert eine Vielzahl von baulichen und ausrüstungstechnischen Maßnahmen zur Gewährleistung bzw. Erhöhung der Tunnelsicherheit. Folgende Richtlinien bestimmen laut Neumann und Sommerlechner (2009) die baulichen Sicherheitsmaßnahmen sowie die notwendige sicherheitstechnische Ausrüstung:

- Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ (TSI, vgl. Kap. 2.1.2)
- Eisenbahn-Arbeitnehmerinnenschutzverordnung (EisbAV)
- Richtlinie des österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes (vgl. Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, 2000)

Im Allgemeinen unterscheidet man bauliche und ausrüstungstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit in Tunnelanlagen.

Zu den baulichen Maßnahmen zählen heute an erster Stelle Maßnahmen zur Erhöhung der Brandbeständigkeit der Tunnelinnenschale (siehe Kap. 5). Dabei handelt es sich um das Aufbringen eines vorbeugenden baulichen Brandschutzes (z.B. Polypropylen-Faserbeton), der die Tragfähigkeit von Firstgewölbe bzw. Tunneldecke auch im Brandfall aufrechterhält. Des Weiteren zählen auch das Errichten von Flucht- und Rettungswegen (inkl. Wendenischen und Rettungsplätzen) und der Ersatz von Schotter und Bahnschwellen durch eine Feste Fahrbahn zu den baulichen Sicherheitsmaßnahmen (vgl. Neumann, 2010; Schneider & Horvath, 2006).

Die ausrüstungstechnischen Sicherheitsmaßnahmen umfassen nach Neumann (2010) bzw. Neumann & Sommerlechner (2009) vor allem folgende Installationen:

- Orientierungsbeleuchtung (Firstleuchten und tiefliegende Lichtlinie)
- Beschilderung und Fluchtwegkennzeichnung
- Notruftelefone
- Branddetektoren
- Feuerwehrfunk
- Lüftungskanäle
- Löschwasserversorgung
- Erdung der Oberleitung

4.2 Notfallkonzept und Risikoszenarien

Während bei Neubauprojekten die Entwicklung eines Notfallkonzeptes parallel mit der Errichtung des Bauwerks abläuft (von der Tunnelsystementscheidung über die eisenbahnrechtliche Baugenehmigung bis hin zur Vorbereitung der Inbetriebnahme mit Schulungen, Ortsbegehungen und Tunnelübungen), ergibt sich bei Tunnelbauwerken im Bestand eine Verbesserung bzw. Erhöhung der Sicherheitsleistung durch Nachrüstung von diversen Sicherheitsmaßnahmen (Neumann & Sommerlechner, 2009; Neumann & Fößleitner, 2010).

Die technischen Spezifikationen zur Interoperabilität betreffend der Sicherheit von Eisenbahntunnel (TSI, 2008) definieren sogenannte „tunnelspezifische Ereignisse“ und legen

Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit bzw. zur Vermeidung von Personenschäden bei derartigen Ereignissen fest. Die Vorgangsweise der TSI ist in Abb. 5 illustriert.

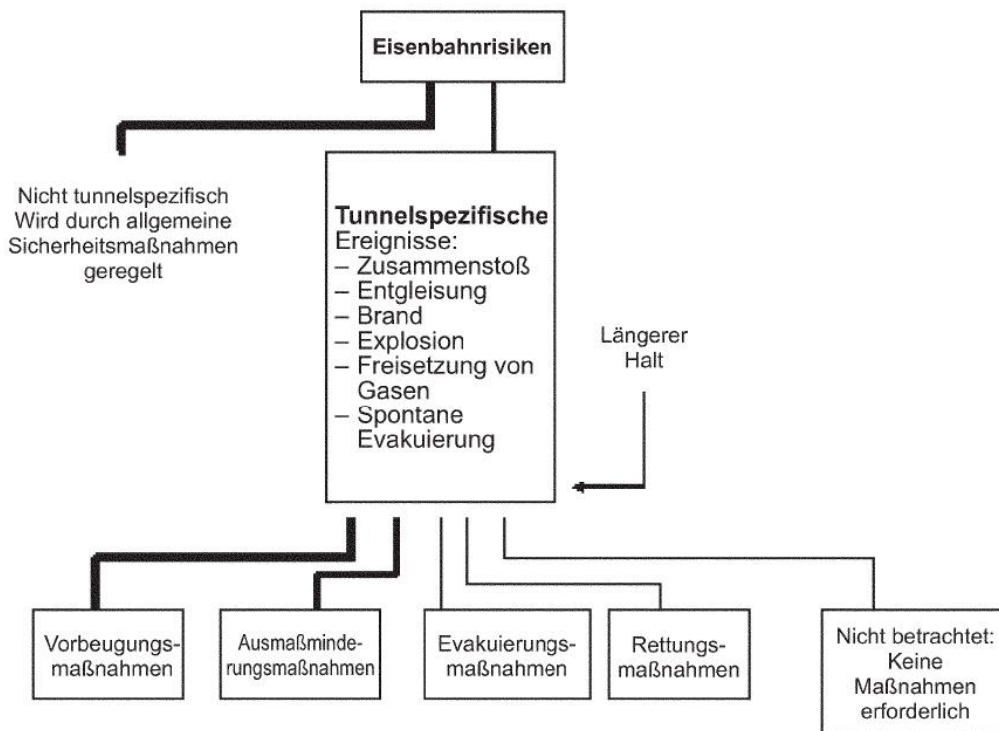


Abb. 5: Eisenbahnrisiken in Tunnel und Maßnahmen (TSI, 2008)

Die TSI (2008) fasst die Risiken auf drei charakteristische tunnelspezifische Tunnelereignisbereiche zusammen (vgl. auch Neumann & Sommerlechner, 2009):

- Heiße Ereignisse, wie Brand, Explosion mit Brand und Freisetzung von Rauch oder Gasen
- Kalte Ereignisse, wie Zusammenstoß oder Entgleisung
- Längerer Halt: außerplanmäßiger Halt ohne Brandereignis für eine Dauer von über 10 Minuten

Eine Erhöhung der Sicherheit in Tunnelanlagen erfolgt dabei laut Neumann & Sommerlechner (2009) nach den Grundprinzipien Prävention, Schadensminimierung, Selbstrettung und Fremdrettung. Dieses Konzept ist in Abb. 6 dargestellt.

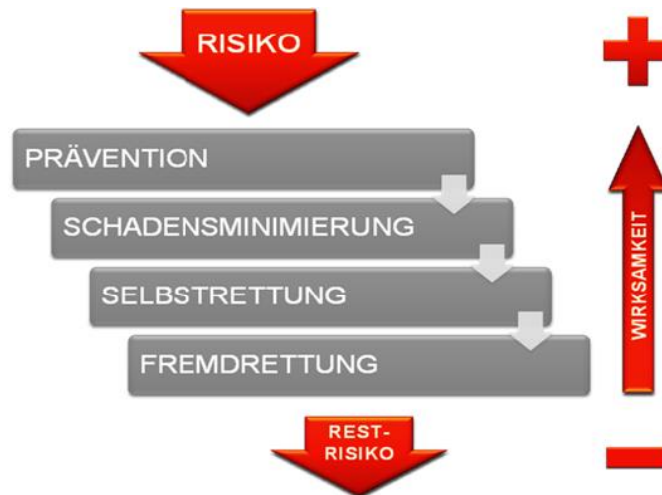


Abb. 6: Grundprinzipien zur Erhöhung der Tunnelsicherheit
(Neumann & Sommerlechner, 2009)

Zur Prävention zählen v.a. die ausreichende Verwendung von robuster Sicherheitstechnik und die Durchführung regelmäßiger Wartungen und Inspektionen. Zusammenfassend stellen sich die Maßnahmen zur Ereignisverhinderung nach Neumann und Sommerlechner (2009) wie folgt dar:

- *Geschwindigkeitsüberwachung, Signalsystem, Gleisfreimeldeanlage*
- *Zugfunk, GSM-R*
- *Zuglaufcheckpoints*
- *Anordnung (Minimierung) von Weichen*
- *Verhinderung von unerlaubtem Zugang zu Sicherheitsausgängen und technischen Räumen*
- *Kontrolle des Tunnel- und Gleiszustandes*
- *Beschränkung für den Betrieb*

Eine erfolgreiche Schadensminimierung bedingt eine frühzeitige technische Detektion und diverse Sicherheitseinrichtungen, wie beispielsweise die Installation von Branddetektoren und Brandschutztüren bzw. der bauliche Brandschutz (vgl. Kap. 4) im Allgemeinen. Weiters gilt hinsichtlich der Schadensminimierung das vorrangige Ziel, alle Züge, v.a. auch den vom Notfall betroffenen Zug, aus dem Tunnel zu befördern. Dabei ergeben sich Anforderungen an die verwendeten Schienenfahrzeuge selbst. So müssen diese nach TSI (2008) auch bei Vollbrand noch für die Dauer von 15 Minuten lauffähig bleiben um so ein Ausfahren aus dem Tunnel gewährleisten zu können.

Für eine Selbstrettung ist das Vorhandensein der nötigen Infrastruktur (Fluchtwege und Fuhrpark) sowie geschultes Personal notwendig, während die erfolgreiche Fremdrettung durch Einsatzorganisationen und Bahnpersonal die Erreichbarkeit des Tunnelsystems, das Vorhandensein von Ausrüstungskonzepten für die leitenden Einsatzorganisationen sowie Einsatz- und Alarmplänen und die Durchführung von Schulungen und Übungen vor Ort voraussetzt. Für eine Selbstrettung existieren vom Eigentümer und Betreiber der Tunnelanlage Vorschriften und Richtlinien für die unterstützenden Maßnahmen zur Selbstrettung (Neumann & Sommerlechner, 2009; Neumann & Föbtleitner, 2010). Bei den österreichischen Bundesbahnen gelten hier die Zusatzbestimmungen zur Signal- und Betriebsvorschrift (ZSB 24 idgF, Dienstvorschrift Selbstrettung), welche die Vorgangsweise bei Eintreten eines Notfalls definiert (Abb. 7). Für die Durchführung des Selbstrettungskonzepts (Abb. 7) ist der Zugführer verantwortlich.

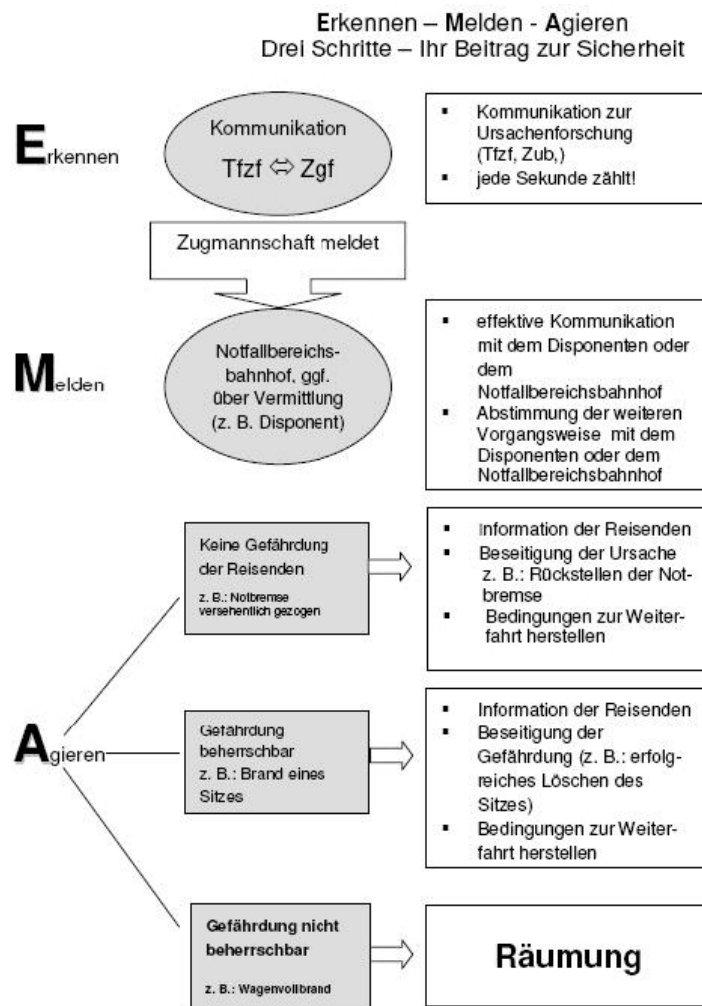


Abb. 7: Vorgangsweise zur Selbstrettung (Zusatzbestimmungen zur Signal- und Betriebsvorschrift ZSB 24 der ÖBB)

Die Maßnahmen bzw. Einrichtungen für eine erfolgreiche Selbstrettung lassen sich wie folgt zusammenfassen (Neumann & Sommerlechner, 2009; vgl. Neumann & Fößleitner, 2010):

- *Randweg (Flucht- und Rettungsweg)*
- *Notausgänge (Sicherheitsausgänge)*
- *Orientierungsbeleuchtung*
- *Rettungszeichen, Fluchtwegkennzeichnung*
- *Rauchfreihaltung*
- *Oberleitung, Abschaltung der Oberleitung, Erdungsschalter*
- *Portalvorplätze, Zufahrten, Zugänge*
- *Löschwasserversorgung*
- *Elektroanschlüsse*
- *Notruffernsprecher*
- *Funkeinrichtungen*
- *Für Straßenfahrzeuge befahrbare Feste Fahrbahn / Auffahrstellen*
- *Rollpaletten*
- *Hubschrauberlandemöglichkeit*
- *Übungen, Tunnelsicherheitsplan*
- *Training des Zugpersonals, Ausrüstung Zugpersonal*

4.3 Notfallmanagement und Einsatzkonzepte bei Fremdrettung

Wie bereits erwähnt trifft der Zugführer die Entscheidung zur Selbstrettung nach Abb. 7. Wird jedoch eine Fremdrettung nötig, so veranlasst der Bahnbetreiber die Verständigung der Rettungskräfte und koordiniert im weiteren Verlauf gemeinsam mit den Rettungskräften den Einsatz im Tunnel. Die genaue Vorgangsweise ist in den Zusatzbestimmungen zur Signal- und Betriebsvorschrift (ZSB) 26 geregelt (ZSB 26, idgF). Diese regelt drei wichtige Fragestellungen im Falle eines Notfalls (Neumann & Sommerlechner, 2009):

- *Zuständigkeit im Notfall*
- *Maßnahmensetzung im Ereignisfall (Notfallmappe)*
- *Umfang und Häufigkeit von Notfallübungen*

Die Notfallmappe gibt Informationen über Checklisten, Lagepläne und Alarmpläne und umfasst damit alle wichtigen Dokumente um eine effiziente Rettung durchzuführen. Notfallszenarien und Rettungskonzepte mit Verhaltensregeln im Gleisbereich und bei Bahnstromanlagen sind ebenfalls im Handbuch „Feuerwehreinsatz im Gleisbereich“ (ÖBFV & ÖBB, idgF) beschrieben.

Wird ein Einsatz zur Fremdrettung nötig, so gibt es drei grundlegende Möglichkeiten wie die Rettungsmannschaften mit Gerätschaft in den Tunnel vordringen um die Personenrettung und Löscharbeiten durchzuführen (vgl. Neumann & Sommerlechner, 2009):

- Rettungszug (Shuttle- oder Containerzug)
- Zweiwegefahrzeuge
- Gleisungebundene Fahrzeuge bei Fester Fahrbahn

Der Rettungszug nach dem Shuttle-Konzept (hierbei werden konventionelle Einsatzfahrzeuge und Rettungsmannschaft auf offenen Ladewagons verladen und gleisgebunden in den Tunnel transportiert) wird hauptsächlich bei Bestandstunnel mit einer Länge von über 1000 m angewendet, welche keine Notausgänge besitzen. Die Container-Variante (Rettungsmannschaft und Gerätschaft werden in speziellen Container-Wagons gleisgebunden in den Tunnel transportiert, die Container dienen dabei als Schutz gegen Feuer, Hitze und giftigem Rauch) kommt bei langen, zweigleisigen Bestandstunnel, wie beispielsweise dem Arlberg Eisenbahntunnel (vgl. Kap. 8), zum Einsatz.

Zweiwegefahrzeuge dienen vorwiegend einer ersten Lageerkundung und kommen in Österreich im Notfall nur gemeinsam mit einem Rettungszug zur Anwendung.

Neubautunnel mit einer Länge von über 1000 m werden heute vorwiegend mit einer Festen Fahrbahn ausgerüstet. Dieser schotterlose Schienenoberbau, bei dem Schotter und Bahnschwellen durch eine feste Oberbaufahrbahn ersetzt werden (vgl. Heinisch et al., 1997), ermöglicht es den gleisungebundenen Fahrzeugen im Gleisbereich direkt einzufahren. Eine Feste Fahrbahn bietet dabei im Hinblick auf den Rettungseinsatz folgende Vorteile (Neumann & Sommerlechner, 2009):

- *Rasche Zufahrt der Einsatzkräfte mit eigenen, auf das Ereignis abgestimmte Fahrzeugen*
- *Gewährleistung einer hohen Handlungssicherheit*
- *Keine Um- und Zuladungstätigkeiten von Rettungs- und Bergegeräten*
- *Optimale Nutzung der Personalressourcen für Rettung und Schadensminimierung*

Sicherheitsmaßnahmen für Bahntunnel

Demgegenüber stehen ein hoher Investitionsaufwand und eine erschwerte Instandhaltung dieses Schieneneroberbau-Typs.

Kapitel 5

Brandschutz

5.1 Grundlegendes

Brandschutz fasst alle Maßnahmen zusammen, die einer Brandentstehung oder -ausbreitung entgegenwirken. Grundsätzlich unterscheidet man einen vorbeugenden und einen abwehrenden Brandschutz. Letzterer umfasst die Ergreifung von Maßnahmen, wenn es bereits brennt, während der vorbeugende Brandschutz alle Maßnahmen umfasst, die eine Entstehung, Ausbreitung und Auswirkung von Bränden und deren Folgeerscheinungen (Rauch, giftige Gase, etc.) bereits im Vorhinein verhindern oder einschränken (Wikipedia, Seite: „Brandschutz“).

Vorbeugender Brandschutz gewinnt in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung und ist gerade nach den Tunnelbränden von Euro-, Montblanc- und Tauern-Tunnel bei der Planung von Neubautunnel sowie bei der Sanierung von Bestandstunnel allgegenwärtig (Schneider & Horvath, 2006). Im Allgemeinen kann zwischen anlagentechnischen, baulichen und organisatorischen Brandschutzmaßnahmen unterschieden werden. Die organisatorischen Maßnahmen betreffen die Bestellung von Brandschutzbeauftragten und Brandschutzwarten sowie das Erstellen von Alarmplänen, Brandschutzordnung und Brandschutzplänen sowie die laufende Schulung und Abhaltung von Übungen in regelmäßigen Zeitabständen (Wikipedia, Seite: „Brandschutz“). Die organisatorischen Maßnahmen in Bezug auf Eisenbahntunnel wurden bereits in Kap. 4 behandelt. Eine bauliche Sanierung beinhaltet vorwiegend die verwendeten Baustoffe und Bauteile sowie bauliche Maßnahmen, die eine Ausbreitung von Bränden verhindert und die Evakuierung von Personen ermöglicht. Eine bauliche Sanierung älterer Eisenbahntunnel ist zumeist mit tiefgreifenden Erneuerung der Innenschale verbunden. Der anlagentechnischer Brandschutz befasst sich mit allen technischen Anlagen und Einrichtungen, die zur weiteren Verbesserung des Brandschutzes

dienen (vgl. Schneider & Horvath, 2006). In der Literatur bzw. in verschiedenen Richtlinien wird der anlagentechnische Brandschutz z.T. nicht explizit vom baulichen Brandschutz getrennt, sondern unter den baulichen Sicherheitsmaßnahmen geführt.

5.2 Richtlinien und Vorschriften betr. Brandschutz

Es existieren zahlreiche Richtlinien betreffend des Brandschutzes zum Bau und Betrieb von Bahntunnel:

- Richtlinie des deutschen Eisenbahn-Bundesamtes (Eisenbahn-Bundesamt, 2008)
- Richtlinie des Österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes (Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, 2000)
- ÖBB-Richtlinie bzw. HL-Richtlinie (ÖBB, 2002b)
- ÖBV- (vormals ÖVBB-) Richtlinie Tunnelbeton (ÖBV, 2013-08) und Faserbeton (ÖBV, 2008-07)

Für Straßentunnel existieren noch weitere Richtlinien der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße und Verkehr (RVS 09.01.45, 2006-09) und Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT-Richtlinien).

Die Richtlinie des Eisenbahn-Bundesamtes über die „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“ definiert die Art und den Umfang der einzuhaltenden baulichen und betrieblichen Sicherheitsmaßnahmen. Die Einhaltung dieser Richtlinie ist beim Bau neuer Tunnelanlagen bindend, bei bereits vorhandenen Tunnel gilt der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit, was bedeutet, dass diese Richtlinie nur insoweit gilt, als im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen umfangreiche Erneuerungsmaßnahmen durchgeführt werden und die Einhaltung der Anforderungen finanziell tragbar ist. Insgesamt müssen die getroffenen Sicherheitsmaßnahmen den Schutz der Reisenden, des Betriebspersonals und der Einsatzkräfte ausreichend gewährleisten (Eisenbahn-Bundesamt, 2008). Die baulichen Maßnahmen sind in Kap. 5.4 im Detail erläutert.

Die Richtlinie des Österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes gibt Vorschläge und Anweisungen zum gefahrlosen Betrieb, der notwendigen Sicherheitsmaßnahmen und der Evakuierung von Eisenbahntunnel im Brandfall (siehe Kap. 4).

Die ÖBB-Richtlinie (HL-Richtlinie, vgl. Kap. 2.1.2) für den baulichen Brandschutz in unterirdischen Verkehrsbauten von Eisenbahn-Hochleistungsstrecken verfolgt laut Lemmerer & Kusterle (2007) folgende Ziele:

- Erhaltung der Restsicherheit während eines Brandfalles bei definierter Brandlast und Branddauer
- Begrenzung von Schäden auf ein technisch-wirtschaftliches Ausmaß
- Erhalt der Dichtigkeit der Tunnelauskleidung zur Verhinderung von Wassereintrüben
- Minimierung von Instandsetzungsmaßnahmen nach einem Brandfall
- Schutz der Oberflächenbebauung und Dritter bei seicht liegenden Tunnelbauwerken

Vergleichbare Schutzziele für den Sach- bzw. Objektschutz werden auch von der ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ (ÖBV, 2013) verfolgt. Die ÖBV-Richtlinie Tunnelbeton befasst sich mit den Grundlagen der mechanischen und thermischen Einwirkung, Konstruktion und Bemessung, Zusammensetzung, Herstellung und Einbau des Betons, die Richtlinie Faserbeton mit den Anforderungen und Zusammensetzung, Herstellung, Transport, Verarbeitung und Nachbehandlung von Faserbeton (ÖBV, 2013-08 bzw. 2008-07; vgl. Kap. 5.4).

5.3 Anlagentechnischer Brandschutz

Der anlagentechnische Brandschutz umfasst nach Schneider & Horvath (2006) Brandrauchentlüftungssysteme, Brandmeldesysteme sowie Tunnellöschanlagen. Derartige Systeme lassen sich auch in bestehenden Tunnelanlagen ohne unverhältnismäßigen Aufwand nachrüsten, was in den meisten Fällen einer Sanierung auch geschieht und bieten somit eine einfache, aber effektive Möglichkeit die Sicherheit in Bahntunnel zu erhöhen.

5.3.1 Brandrauchentlüftungssystem

Da es sich gerade bei neuen Eisenbahntunnel oftmals um Bauwerke mit hoher Überlagerung handelt (maximale Überlagerung Gotthard-Basistunnel ca. 1550 m, Brenner Basistunnel ca. 1800 m) und dadurch im Zuge des geothermischen Gradienten mit Temperaturen von über 40°C zu rechnen ist, kommt dem Lüftungssystem bereits grundsätzlich eine besondere Bedeutung zu. Im Brandfall entscheidet das Lüftungssystem maßgeblich über das Ausmaß des Schadens, hier sollen raucharme Bereiche in Bodennähe geschaffen werden, um die Flucht von Personen und das Durchführen von Rettungs- und Löschmaßnahmen zu

gewährleisten (vgl. Pucher, 2000). Um dies zu erreichen, sind folgende Gesichtspunkte hinsichtlich der Lüftung maßgebend (Schneider & Horvath, 2006):

- *Gleichmäßige Brandabfuhr in Brandherdnähe*
- *Frischluftezufuhr aus der Umgebung in den raucharmen Bereich*
- *Die Zuluftmenge sollte die Absaugmenge nicht unterschreiten*
- *Vermeidung von hohen Zuluftgeschwindigkeiten*
- *Nicht zu hohe Geschwindigkeit in den Absaugöffnungen*

5.3.2 Brandmeldesystem

Brandmeldesysteme und -anlagen sind Einrichtungen des vorbeugenden Brandschutzes zur frühzeitigen Detektion von Brandereignissen. Je frühzeitiger ein Brand erkannt wird, desto rascher sind die Einsatzkräfte zur Rettung von Personen und zur Brandbekämpfung vor Ort, die Auswirkungen eines Brandereignisses lassen sich somit reduzieren. Mägerle (2000) fasst die Anforderungen moderner Brandmeldesysteme wie folgt zusammen:

- Alarmierung des Betriebspersonals und der Sicherheitskräfte
- Ansteuerung der Lüftungsanlage um Rauch, Gase und Wärme abzuleiten
- Ansteuern der Signalanlage um die Zufahrt von weiteren Zügen in das Tunnel zu verhindern
- Ansteuerung von Videokameras zur Optimierung des Rettungs- und Löscheinsatzes
- Ansteuerung von Tunnellöschanlagen (z.B. Löschwasseranlage)

Die eingesetzten Branddetektoren arbeiten dabei auf unterschiedlichen Grundlagen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten alarmiert werden (vgl. Schneider & Horvath, 2006):

- Rauchmelder
- Flammenmelder
- Wärmemelder

Bei Brandmeldern ist darauf zu achten, dass diese auf die spezifische Luftlängsgeschwindigkeit im Tunnel abgestimmt (im Brandfall verteilen sich Rauchgase sehr schnell in Tunnellängsrichtung, wodurch eine genaue Detektion des Brandherdes erschwert wird), von einer akkreditierten Prüfstelle geprüft und mit einem Messpunktabstand von maximal zehn Metern in Tunnellängsrichtung installiert sind. Bei einem technischen

Gebrechen (Leitungsausfall o.ä.) darf maximal eine Überwachungslänge von 1000 m ausfallen (Schneider & Horvath, 2006; Mägerle, 2000).

5.3.3 Tunnellöschanlage

Eine Tunnellöschanlage dient zur frühzeitigen Reaktion auf ein Brandereignis. Diese ist dafür zuständig eine bestimmte Wassermenge über die betroffene Tunnellänge abzugeben um den Brand auf diese Weise einzudämmen. Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz solcher Systeme ist eine zuverlässige Lokalisierung des Brandherdes um den Brand mittels Sprühwasserlöschanlagen (hier sind die Leitungen nicht permanent mit Wasser gefüllt, sondern werden manuell oder automatisch über Brandmelder mit Wasser befüllt und wirkt damit flächig und – im Gegensatz zu Sprinkleranlagen – nicht nur punktuell). Eine Tunnellöschanlage wirkt nicht nur zur direkten Brandbekämpfung, sondern bedingt auch eine Kühlung der Rauchgase und schützt damit die beteiligten Personen sowie die Tunnelauskleidung selbst (vgl. Schneider & Horvath, 2006 sowie Kanitz, 2008).

5.4 Baulicher Brandschutz

Bauliche Brandschutzmaßnahmen betreffen in erster Linie die Sicherstellung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Reparierbarkeit der Tunnelkonstruktion (vgl. Kap. 5.4.3; TSI, 2008). Ein übermäßiges Abplatzen der Betondeckung der Stahlbewehrung soll verhindert werden, um die statische Funktionstauglichkeit des Ausbaus nicht zu beeinträchtigen (vgl. Kap. 5.4.2.3). Ein Ausfall von Stromversorgung, Kommunikations- und Alarminrichtungen soll durch bauliche Vorkehrungen möglichst lange verhindert und das Entstehen von toxischen Gasen durch Abbrennen von Kunststoffen vermieden werden. Der bauliche Brandschutz betrifft jedoch auch die Anlage von Flucht- und Rettungswegen (Schneider & Horvath, 2006).

5.4.1 Anforderungen an den baulichen Brandschutz

Die Anforderungen an den baulichen Brandschutz gemäß der Richtlinie des Eisenbahn-Bundesamtes (Eisenbahn-Bundesamt, 2008) stellen sich auszugsweise wie folgt dar:

- Was die bauliche Gestaltung betrifft, so müssen das Tunnelbauwerk und die vorhandenen Notausgänge standsicher und aus nicht brennbaren Materialien hergestellt sein. Die Tunnelauskleidung darf im Brandfall nicht versagen, die Tiefe der Betonabplatzungen im Brandfall ist auf Grundlage der Betonzusammensetzung und der Tiefenlage der Bewehrung (Betonüberdeckung) abzuschätzen und zu optimieren.

- Für zweigleisige Neubaustrecken besteht die Forderung nach zwei getrennten, eingleisigen Tunnel, welche über Querstollen miteinander verbunden sind, womit im Notfall die Personenrettung über die zweite intakte Tunnelröhre erfolgen kann. Derartige Tunnel, bei welchen eine Rettung über die benachbarte Tunnelröhre vorgesehen ist, müssen über eine für den Rettungsdienst befahrbare Fahrbahn im Tunnel verfügen (Feste Fahrbahn).
- Weiters ist eine einseitig gerichtete Längsneigung vorgeschrieben, die den Rollwiderstand der Züge überwindet. Der Zug kann somit auch ohne elektrische Versorgung aus dem Tunnel herausrollen.
- Die anlagentechnischen Brandschutzsysteme müssen baulich derartig angelegt sein, damit diese im Brandfall für eine Dauer von mindestens 90 Minuten einsatzfähig bleiben. Des Weiteren darf die Oberleitung bei Drahtbruch keine Personen gefährden.
- Ein sicherer Bereich bzw. Fluchtwege dürfen von jedem Punkt innerhalb des Tunnels einen Abstand von 500 Metern nicht überschreiten. Querschläge zu anderen Röhren müssen in einem Abstand von mindestens 500 Metern vorhanden sein. Die Fluchtwege müssen dabei mindestens 2,25 m hoch und 1,25 m breit – bzw. bei Tunnel mit einer Länge > 1000 m 1,50 m breit – sein (Eisenbahn-Bundesamt, 2008). Seitliche oder senkrechte Notausgänge müssen alle 1000 m vorhanden sein (TSI, 2008), diese Rettungsschächte und -stollen müssen außerdem bestimmte Anforderungen an Querschnitt, Länge und Längsneigung erfüllen. Weisen Rettungstunnel eine Länge von > 50 m auf, müssen diese außerdem mit einer Schleuse versehen sein, die Schleusentüren müssen dabei rauchdicht und selbstschließend sein.
- Eine Notbeleuchtung muss für mindestens drei Stunden aufrecht erhalten und von der betriebsüberwachenden Stelle ferngesteuert werden können.
- Notrufsprecher sind im Fahrtunnel, in der Nähe von Notausgängen sowie an den Tunnelportalen zu installieren. Die Notrufsprecher müssen mit einer entsprechenden Ausfallsicherung versehen werden um die Funktionstüchtigkeit der Anlage auch im Schadensfall bestmöglich zu garantieren.
- Gebräuchliche Funksysteme sowie Anschlusseinrichtungen für Feldfernsprecher müssen über die gesamte Tunnellänge vorhanden sein.
- Eine Energieversorgung mittels Elektranten (Entnahmestelle für elektrische Energie) ist in einem Abstand von höchstens 125 m sicherzustellen.

- Ebenfalls ist eine ausreichende Löschwasserversorgung sicherzustellen. Löschwasserentnahmestellen sind in einem Abstand von höchstens 300 m zu installieren. Über die gesamte Tunnellänge müssen trockene Löschwasserleitungen (Sprühwasserlöschanlagen) angelegt werden.
- Außerdem ist eine Fluchtwegkennzeichnung mit Rettungspfeilen in einem Abstand von maximal 25 Metern notwendig. Entlang der Fluchtwege sind Rettungszeichen anzuordnen mit Angaben über die Entfernung zum nächsten Notausgang.
- Rettungsplätze und Zufahrten sind entsprechend auszuführen und für Rettungskräfte frei und befahrbar sowie vor unberechtigtem Fremdzutritt geschützt zu halten.
- Die Oberleitung muss im Notfall abschnittsweise spannungslos zu schalten sein und muss an Verbindungsstellen zu Rettungsstollen mit Erdungsvorrichtungen ausgerüstet sein.
- Pro Tunnelportal und Rettungsstollen müssen zwei Rollpaletten als Transporthilfen zur Verfügung stehen.

5.4.2 Anforderungen an die Material- und Systemeigenschaften bei Brandereignissen

5.4.2.1 Mindestanforderung an die Tragsicherheit – Schutzziele und Schutzniveaus

Die ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ (ÖBV, 2013) ist für Neubautunnel zwingend anzuwenden und verfolgt sogenannte Schutzziele (Objektschutz) für Tunnelbauwerke (siehe Kap. 5.2) um ein Verstrützen der Tunnelkonstruktion nach einem definierten Brand zu verhindern. Die Dimensionierung von tragenden Bauteilen im Brandfall erfolgt anschließend im Allgemeinen über definierte Schutzniveaus (Tab. 1). Diese geben den Brandwiderstand eines Bauwerks in Minuten bei einer gewählten Temperatur-Zeit-Kurve an. Bei Temperatur-Zeit-Kurven handelt es sich um standardisierte Einheitstemperaturkurven, sogenannte Brandkurven, die den Temperaturverlauf im Brandfall über einen gewissen Zeitraum vorgeben (vgl. RVS 09.01.45, 2006-09). Die geforderten Schutzniveaus ergeben sich u.a. nach der Art der Überbauung, möglichen Auswirkungen auf Nachbarobjekte, der Wichtigkeit der Verkehrsstrecke sowie Dauer der Räum- und Absperrzeit.

Schutzniveau SN	Mindestanforderung an die Tragsicherheit
0	Brandwiderstand 30 Minuten auf Basis der Einheitstemperaturkurve nach ISO 834-1 (1999-09)
1	30 Minuten Brandeinwirkungsdauer Nachweis gemäß ÖNORM EN Reihe 1991 auf Basis der gewählten Temperatur-Zeit-Kurven
2	90 Minuten Brandeinwirkungsdauer Nachweis gemäß ÖNORM EN Reihe 1991 auf Basis der gewählten Temperatur-Zeit-Kurven
3	120 Minuten Brandeinwirkungsdauer Nachweis gemäß ÖNORM EN Reihe 1991 auf Basis der gewählten Temperatur-Zeit-Kurven; nach 120 Minuten Brandeinwirkungsdauer einschließlich Abkühlphase Sicherheit normgemäß.

Tab. 1: Mindestanforderung an die Tragsicherheit der Konstruktion (RVS 09.01.45, 2006-09)

Bei Eisenbahntunnel (Güterverkehr) ist generell mit einer Temperaturbelastung zu rechnen, die über der Einheitstemperaturkurve nach ISO 834-1 (1999-09) liegt. Hierfür wurde eigens die sogenannte EBM = HC_{1,200°}-Kurve für Eisenbahntunnel entwickelt, die zwar einen ungünstigen, aber dennoch realistischen Brandfall abzeichnet (vgl. Schneider & Horvath, 2006). Diese HC_{1,200°}-Kurve ist in Abb. 8 dargestellt.

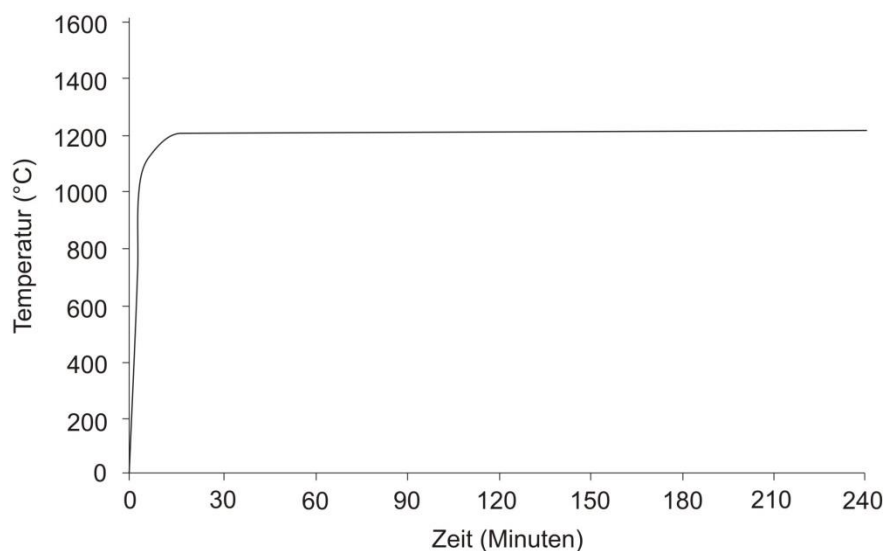


Abb. 8: Temperatur-Zeit-Kurve für Eisenbahntunnel (nach Schneider & Horvath, 2006 bzw. ÖBV, 2013)

Die detaillierte Vorgangsweise für die Konstruktion und Bemessung von Eisenbahntunnel wird von Schneider & Horvath (2006) wie folgt definiert:

- *Festlegung des Schutzniveaus*
- *Ableitung der maßgebenden Belastungen (Brandlast, Temperatur-Zeit-Kurve)*
- *Ermittlung der Konstruktionsbelastung (Temperaturverlauf im Querschnitt)*
- *Festlegung der Material- und Querschnittskennwerte (Hochtemperatureigenschaften von Beton und Stahl)*
- *Durchführung der Berechnung und Bemessung*
- *Konstruktive Ausbildung*
- *Resttragfähigkeit nach dem Abkühlen*

5.4.2.2 Brandbeständigkeit von Mauerwerksbauten

Mauerwerk weist ein sehr gutes Brandverhalten auf. So wurden Feuermauern früher aus nacktem Mauerwerk hergestellt, diese hielten ohne weitere Maßnahmen einer Brandeinwirkung von 90 Minuten problemlos stand. Mauerwerk erfüllt auch heute noch alle Anforderungen und behördlichen Auflagen. Eine Ziegelwand mit einer Stärke von 12 cm widersteht 180 Minuten lang dem Normbrand und erfüllt damit die in der Bauverordnung für statisch hochbeanspruchte Bauteile geforderte Brandwiderstandsklasse F 180 (ziegel.at, Seite „Brandschutz“). Die Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten im Brandfall erfolgt nach ÖNORM EN 1996-1-2 (2006-01). Die Brandbeständigkeit von Mauerwerksbauten ist damit als sehr gut einzustufen, der Brandschutz damit wesentlich unproblematischer als beim Baustoff Beton (vgl. Kap. 5.4.2.3) anzusehen.

5.4.2.3 Brandbeständigkeit von Beton

Beton selbst ist aufgrund seiner mineralischen Bestandteile nicht brennbar. Außerdem weist er eine hohe Feuerwiderstandsdauer und eine gute Wärmedämmung auf, es werden im Brandfall dank seiner Zusammensetzung keine toxischen Gase freigesetzt und es gibt die Möglichkeit einer Betonsanierung auch nach schweren Brandeinwirkungen. Die mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen sowie die Widerstandsfähigkeit gegen Brand- bzw. Temperatureinwirkung sind jedoch stark abhängig von der Zusammensetzung des Betons sowie den Eigenschaften seiner Komponenten (Schneider & Horvath, 2006).

Normalbeton ist a priori nicht brandbeständig und es kommt bei steigenden Temperaturen im Beton zu voranschreitender Schädigung der Betonstruktur. Neben der Änderung der mechanischen Eigenschaften des Betons und der im Beton eingebetteten Stahlbewehrung (Kap. 5.4.2.3) kommt es zum Auftreten von Abplatzungen. Dies geschieht bei Erhöhung der

Temperatur über 100°C durch die Verdampfung des Porenwassers im Betongefüge. Da das Betongefüge nahezu impermeabel ist, kann der entstehende Wasserdampf nicht aus dem Betongefüge austreten und es entsteht ein Dampfüberdruck. Dieser führt schließlich zum Versagen des Betons und zu Abplatzungen an der Oberfläche. Des Weiteren entstehen Chloridschäden durch aggressive, chloridhaltige Brandgase (bei Verbrennung von PVC) sowie strukturabhängige Schäden bei hohen Brandlasten (vgl. Schneider & Horvath, 2006).

Um die Brandbeständigkeit von Beton zu erhöhen und Abplatzungen entgegenzuwirken, ist eine Erhöhung der Brandbeständigkeit gemäß der ÖBV-Richtlinie „Faserbeton“ (ÖBV, 2008-07) durchzuführen. Dabei erfolgt die Überprüfung der erhöhten Brandbeständigkeit von Faserbeton an Großversuchskörpern gemäß der ÖBV-Richtlinie "Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke" (ÖBV, 2013). Diese Richtlinie beschreibt die Festlegung von erforderlichen Schutzziele und die Wahl der geeigneten Temperatur-Zeit-Kurven. Weiters wird das Materialverhalten von Stahl und Beton bei erhöhten Temperaturen beschrieben. Im Zuge der Erstellung dieser Richtlinie wurden umfangreiche Versuchsprogramme durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Zusatz von fein verteilten Polypropylenfasern explosionsartige Abplatzungserscheinungen verhindert und dadurch die Brandbeständigkeit von Beton deutlich erhöht werden kann (vgl. ÖBV, 2013).

5.4.2.4 Mechanische Eigenschaften von Beton und Stahlbewehrung im Brandfall

Im Brandfall nehmen mit steigenden Temperaturen die Festigkeitseigenschaften und der Elastizitätsmodul, also der Widerstand gegen Verformung, von Beton deutlich ab. Oberhalb von 600°C ist ein markanter Festigkeitsrückgang zu beobachten (Schneider & Horvath, 2006; Schlüter, 2004).

Der E-Modul sinkt bereits ab einer Temperatur von ca. 200°C stark ab. Erreicht die Temperatur 1000°C und mehr, so geht die Druckfestigkeit von Beton nahezu auf null zurück und es bleibt nur eine gewisse Haufwerksfestigkeit zurück (Abb. 9).

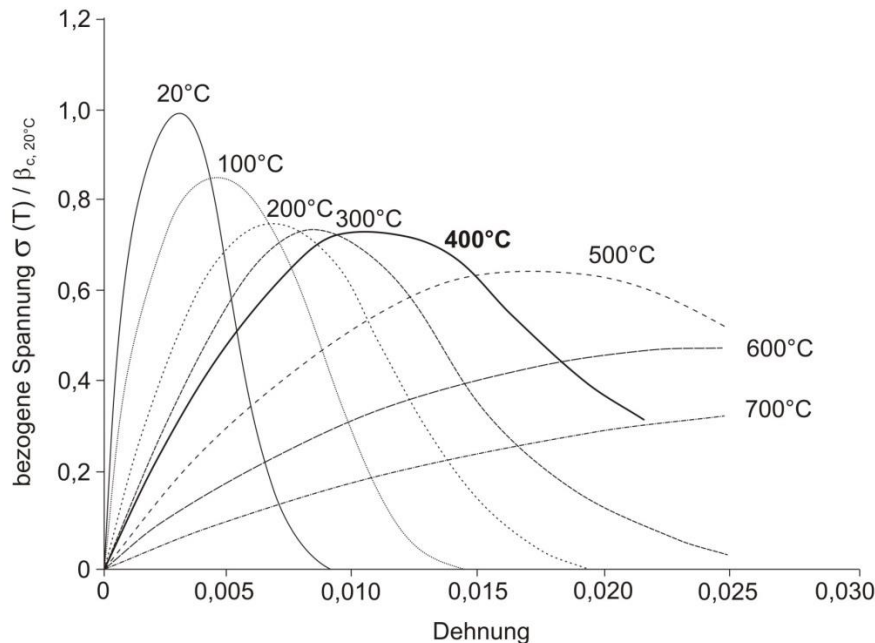


Abb. 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlägen bei unterschiedlichen Temperaturen (nach Schneider & Horvath, 2006)

Der markante Rückgang der Festigkeit und des E-Moduls (vgl. Abb. 9) ist v.a. auf die im Beton verwendete Gesteinskörnung zurückzuführen. Bei steigender Temperatur zeigt die Gesteinskörnung des Betons eine thermisch bedingte Ausdehnung. Die Volumszunahme bzw. -änderung eines Stoffes bei steigender Temperatur lässt sich mittels der Wärmedehnung beschreiben. Diese Eigenschaft wird durch den Wärmeausdehnungskoeffizient α , auch Wärmedehnzahl genannt, definiert, welcher die Längenänderung eines Körpers bei 1 K Temperaturerhöhung beschreibt. Die Einheit der Wärmedehnzahl ist K^{-1} . Materialien mit einem positiven Wärmeausdehnungskoeffizienten erfahren bei steigender Temperatur im Allgemeinen eine Volumszunahme (Tipler & Mosca, 2004). Die Wärmedehnzahl ist je nach Gesteinsart sehr unterschiedlich. Normale Gesteinskörnungen besitzen eine Wärmedehnzahl im Bereich von ca. 5 bis ca. $20 \cdot 10^{-6}/K$ (Grübl et al., 2001). Es gibt keine allgemein gültigen Regeln für Zuschlagsstoffe für hitzebeständigen Beton über 250°C, es wird jedoch empfohlen, Gesteinskörnungen mit geringer Wärmedehnung zu verwenden. Gesteinskörnungen sollten beim Erhitzen eine mehr oder minder lineare Wärmedehnung aufweisen und keine sprunghaften Volumsveränderungen zeigen, wie dies beispielsweise bei Quarz zu beobachten ist. Sprunghafte Volumszuwächse führen zu starken Gefügespannungen, die zu Zugbeanspruchungen führen, wodurch es zu einer Festigkeitsminderung im Beton kommt. Um Gefügespannungen generell zu minimieren, sollte die Wärmedehnung der Gesteinskörnung der des Zements entsprechen (Grübl et al., 2001). Ein weit verbreitetes

Mineral, das diesen Anforderungen nicht nachkommt, ist der Quarz. Quarz besitzt keine lineare Wärmeausdehnung, sondern zeigt bei 573°C einen sprunghaften Anstieg der Wärmedehnung, welcher durch die reversible Phasenumwandlung von Tiefquarz zu Hochquarz bedingt ist. Quarz ist ein Mineral mit der chemischen Zusammensetzung SiO_2 und zählt damit zur Mineralklasse der Oxide. Es tritt in mehreren Temperatur- und Druckmodifikationen auf. Tiefquarz, auch als α -Quarz bezeichnet, ist die stabile Form des kristallinen SiO_2 , wie es unter den auf der Erdoberfläche herrschenden Bedingungen vorzufinden ist. α -Quarz besitzt ein trigonales Gitter, welches bis zu einer Temperatur von 573°C beständig ist. Steigen die Temperaturen über diese Temperaturgrenze (bei einem Druck von einem bar), kommt es zu einer Phasenumwandlung von Tiefquarz zu Hochquarz (β -Quarz) und das trigonale Gitter wandelt sich spontan in ein hexagonales Gitter um. Diese Umwandlung ist reversibel, bei Abkühlung erfolgt bei gleicher Temperatur die Rückbildung zu Tiefquarz (Brauns & Chudoba, 1964; vgl. Voit, 2013). Diese spontane Gitterumwandlung von α -Quarz zu β -Quarz ist mit einem Expansionssprung von ca. 1,2 Vol.-% verbunden, was im Falle eines Tunnelbrandes zu Abplatzungen und zur Zerstörung des Betons führen kann.

Im Vergleich zu unbelasteten Betonbauteilen können druckbeanspruchte Betonbauteile im Brandfall länger ihre Festigkeit und Steifigkeit beibehalten, da die wirksamen Druckspannungen gegen die temperaturbedingte Rissbildung wirken (Schneider & Horvath, 2006).

Stahl zeigt eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit und erwärmt sich dementsprechend im Brandfall sehr schnell. Die mechanischen Eigenschaften von Stahl sind stark temperaturabhängig. So entspricht beispielsweise die Streckgrenze von Stahl bei einer Temperatur von 600°C nur mehr der Hälfte als bei einer Temperatur von 20°C. Auch der Elastizitätsmodul von Stahl nimmt mit steigenden Temperaturen deutlich ab, wodurch Stahl bei Temperaturbeanspruchung im Brandfall rasch seine Funktion als Zugbewehrung verliert und versagt (vgl. ÖBV, 2013). Um einen geforderten Feuerwiderstand (vgl. Tab. 1) von Bauteilen aus Stahl zu erreichen, werden diese deshalb entweder entsprechend überdimensioniert oder mit einer wärmehemmenden Ummantelung versehen (Wikipedia, Seite „Stahlbau“, vgl. Neroth & Vollenschaar, 2011).

Nachträglich an Stahlbauteilen installierte Brandschutzmaßnahmen haben deshalb dämmende, abschirmende oder wärmeabführende Wirkung. Beim dämmenden Brandschutz werden die Stahlprofile mit zementgebundenen Spritzputzen versehen – dieses System entspricht jenem von Stahlbeton, bei welchem die Stahlbewehrung von schützendem Beton ummantelt ist.

Abschirmende Brandschutzmaßnahmen zielen auf raumabschließende Systeme wie beispielsweise abgehängte Decken ab, während wärmeabführende Brandschutzmaßnahmen durch thermisch frei zirkulierendes Wasser gekühlt werden (Wikipedia, Seite „Stahlbau“).

5.4.3 Bauliche Maßnahmen zur Erhöhung der Brandbeständigkeit in Tunnel

Als Auskleidung für unterirdische Verkehrsanlagen kommt heutzutage fast ausschließlich der Baustoff Beton zum Einsatz. Der Ausbau erfolgt v.a. in Form von Tübbing bei TBM-Vortrieb oder als Tunnelinnenschale bei konventionellem Sprengvortrieb. Im oberflächennahen Bereich wird dabei heutzutage hauptsächlich Brandschutzbeton, welcher durch Zugabe von Polypropylenfasern zum Frischbeton hergestellt wird, verwendet. Die Brandbeständigkeit von Beton kann durch Einsatz von Polypropylen-Fasern (PP-Fasern) deutlich erhöht werden. Die Herstellung von PP-faserbewehrtem Beton erfolgt dabei nach der ÖBV-Richtlinie „Faserbeton“ (2008-07). Dabei werden dem Frischbeton monofilamentale Polypropylenfasern beigegeben, wobei bereits geringe Mengen von 1,5 bis 2,0 kg PP-Fasern pro m³ Frischbeton zur Erhöhung der Brandbeständigkeit ausreichen (vgl. RVS 09.01.43 (2004-05; Kusterle et al., 2004). Im Falle eines Feuers schmelzen diese Fasern und hinterlassen kleine Kanäle, durch die Wasserdampf entweichen bzw. sich ausdehnen kann, wodurch ein unkontrolliertes Ansteigen des Dampfdrucks verhindert wird. Dadurch lässt sich ein Abplatzen von Randschichten des Betonbauteils unterbinden und die darunter liegende Stahlbewehrung wird lange vor dem Versagen geschützt (vgl. Voit, 2013).

Eine weitere gängige Möglichkeit zur Erhöhung des Brandschutzes ist der Einsatz von Brandschutzbekleidung, wobei hier hauptsächlich Plattenbekleidungen, Brandschutzsysteme aus Stahllochblechen mit Dämmschichtbildnern, brandbeständige Putzbekleidung oder Opferschichten verwendet werden (vgl. Schneider & Horvath, 2006). Durch Platten- und Schutzbekleidung wird der Beton vor starker Wärmeeinwirkung geschützt, wodurch das Abplatzrisiko minimiert wird (Hosser et al., 2008). Moderne Brandschutzbekleidungen schützen das Tunnelbauwerk bereits bei geringen Aufbaudicken (wenige Zentimeter), wie es beispielsweise bei der Verwendung von Silikat-Brandschutzbekleidung möglich ist (vgl. Schlüter, 2005).

5.5 Betriebliche Brandschutzmaßnahmen

Betriebliche Brandschutzmaßnahmen betreffen organisatorische, fahrzeug- und betriebstechnische Vorkehrungen, die der Erhöhung der Tunnelsicherheit im Bezug auf den Brandschutz dienen. Diese werden gemäß TSI (2008) und der Richtlinie des Eisenbahn-

Bundesamtes über die „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“ (Eisenbahn-Bundesamt, 2008) geregelt.

Diese Vorschriften sehen eine Trennung von Reise- und Güterzügen bei zweigleisigem Tunnelbetrieb vor, Reise- und Güterzüge sollen sich bei ordnungsgemäßigem Betrieb nicht im Tunnel treffen.

Die Anforderungen an die Fahrzeuge stellen sich zusammenfassend wie folgt dar:

- Die Fahrzeuge benötigen eine brandschutztechnische Beurteilung bzw. Zulassung.
- Die Möglichkeit einer Notbremsüberbrückung von Fahrgastalarmen muss vorhanden sein (eine Notbremsung muss bis zum Verlassen des Tunnels aufgehoben werden können).
- Es müssen Lautsprecherdurchsagen im Zug getätigt werden können.
- In den Zuggarnituren selbst sind Löschmittel sowie Handlampen und Megaphone mitzuführen.

Der Betreiber hat überdies dafür zu sorgen, dass Dienstanweisungen, Notfallpläne o.ä., welche Auskunft über das Verhalten im Brandfall geben, ausgestellt werden und das Zugpersonal im Ergreifen der Sicherheitsmaßnahmen geschult ist. Die dafür notwendigen Mittel (z.B. Löschmittel) sind vom Betreiber zur Verfügung zu stellen. Außerdem ist der Betreiber zur Abhaltung regelmäßiger Unterweisungen der Rettungskräfte sowie Notfallübungen vor Ort verpflichtet (Schneider & Horvath, 2006; Eisenbahn-Bundesamt, 2008).

Kapitel 6

Bauverfahren zur Tunnelsanierung

6.1 Einleitung

Es gibt eine Reihe von Baumaßnahmen zur Sanierung von Eisenbahntunneln, die sich je nach Zweck und den betrieblichen und baulichen Rahmenbedingungen unterschiedlich gut für die Durchführung der jeweiligen Sanierungsarbeiten eignen.

Welche Verfahren geeignet sind, wird – wie eingangs bereits erwähnt – maßgeblich vom vorhandenen Lichtraumprofil bestimmt. Hierbei kann grundsätzlich zwischen Ersatz des alten Ausbaus ohne Aufweitung sowie Ersatz des alten Ausbaus mit Aufweitung unterschieden werden. Eine Aufweitung des Ausbaus kann dabei mittels Teilschnittmaschine, Tunnelbagger mit Reißzahn oder mit Hydraulikmeißel oder Fräskopf erfolgen (STUVA, 2011). Eine Aufweitung durch Sprengen ist zwar möglich, erfolgt jedoch nur in Ausnahmefällen, da hierfür der Zugbetrieb eingestellt werden muss und es überdies zu einer Auflockerung des angrenzenden Gebirges kommt.

6.2 Betriebliche Einschränkungen: Teil- oder Vollsperrung

Die Verfahrenstechniken müssen sich auch nach den betrieblichen Rahmenbedingungen richten. Eine Tunnelsanierung kann unter Betrieb, in Sperrpausen oder bei Vollsperrung (bei der Durchführung von Arbeiten mit Gerät ohne Gleisbindung) stattfinden. Ob eine Vollsperrung nötig oder möglich ist, hängt zum einen von den örtlichen Gegebenheiten, dem Ausmaß der geplanten Arbeiten sowie den betrieblichen Rahmenbedingungen statt. Bei Teilsperren wiederum ergeben sich u.a. Probleme hinsichtlich des Platzangebots für die Baustelleneinrichtung und kurzer Arbeitszeiten in Nachtsperrrpausen.

Bauverfahren zur Tunnelanierung

Bei eingleisigen Tunnel können umfangreichere Gewölbearbeiten, Sohlausbau und die Herstellung einer Festen Fahrbahn aufgrund der beengten Platzverhältnisse zumeist nur bei längerer Vollsperrung stattfinden. Sind die Platzverhältnisse jedoch ausreichend (zwischen Lichtraumprofil und bestehendem Tunnelgewölbe muss ausreichend Raum zur Verfügung stehen, ebenfalls muss der neue Tunnel-Sohlquerschnitt Platz für Abbau- und Transportgeräte bieten), so kann hier die Tunnel-im-Tunnel Methode (siehe Kap. 6.4.2) angewendet werden. Eine Sohlenerneuerung ist gegebenenfalls auch mittels Arbeit in Teilsperren und Überbrückung von frisch betonierten Abschnitten mittels Hilfsbrücken (Bsp. Budesheimer Tunnel bei Frankfurt am Main) möglich, jedoch sehr aufwändig und kostenintensiv (STUVA, 2011; Simon, 2012).

Bei zweigleisigen Tunnel erlaubt das Vorhandensein eines zweiten Gleises zumeist einen wechselseitigen Betrieb. Ein Gleis kann hier für den Betrieb aufrecht erhalten bleiben, die notwendigen Arbeiten werden dann wechselseitig durchgeführt (Abb. 10).

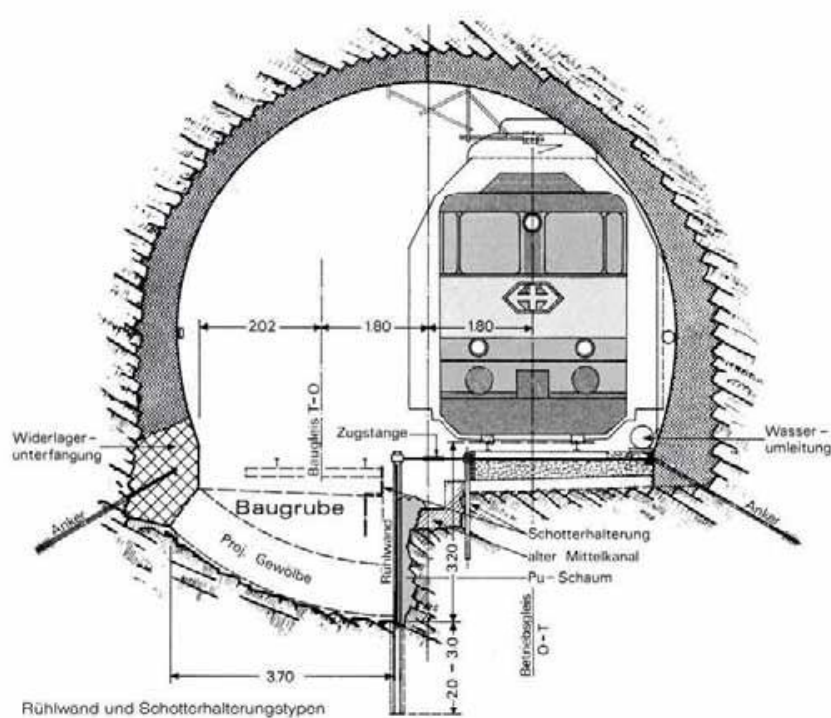


Abb. 10: Wechselseitige Sohlenerneuerung am Beispiel Hauenstein Basistunnel (STUVA, 2011)

Einige Arbeiten lassen sich jedoch trotz alledem nur bei zumindest mehrtägiger Totalsperre durchführen (vgl. Beispiel Arlberg-Eisenbahntunnel, Kap. 8). Bei wechselseitigem Gleisbetrieb werden jedoch sowohl die Sanierungsarbeiten, als auch der laufende Bahnbetrieb erschwert und es kommt zu finanziellen Mehrkosten. Bei zweigleisigen Tunnel ergibt sich ebenfalls die Möglichkeit, Sanierungs- und Tunnelaufweitungsarbeiten mittels

Tunnelvortriebsportal mit der sogenannten Tunnel-im-Tunnel Methode durchzuführen. Hierbei ist jedoch der Umbau auf 1-Gleis im Tunnel für die Bauzeit notwendig (vgl. Simon, 2008).

Es zeigt sich, dass das Sanierungskonzept bei jedem Tunnelbauwerk ein sehr individuelles ist, die Möglichkeiten der einzusetzenden Baumaßnahmen und des Fahrbetriebs während der Sanierungsarbeiten sind in Abhängigkeit der vorliegenden räumlichen und betrieblichen Gegebenheiten sehr unterschiedlich und müssen für jedes Projekt im Detail bewertet werden. Diese Umstände bedingen die Notwendigkeit einer detaillierten Bestandserkundung sowie Vorausplanung der Arbeiten z.B. mittels detailliertem Bauzeitplan, mit dessen Hilfe Geräte- und Personaleinsatz optimal abgestimmt werden können (vgl. STUVA, 2011).

Tab. 2 fasst die Möglichkeiten für Gewölbearbeiten aus betrieblicher Sicht zusammen und zeigt, welche Arbeiten unter Betrieb ohne Sperrzeiten sowie unter Betrieb mit Sperrzeiten durchgeführt werden können (vgl. Simon, 2012). Auf die einzelnen Maßnahmen wird im Folgenden detailliert eingegangen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich Arbeiten an Schienen und am Schotterbett innerhalb eines Tunnels nicht bzw. nur kaum von jenen bei Freistrecken unterscheiden. Lediglich was die Gerätegröße und -flexibilität betrifft, gibt es Unterschiede. So sind die Geräte, welche im Tunnel zur Anwendung kommen, aufgrund der beengten Platzverhältnisse oftmals kleiner und flexibler gestaltet.

Arbeiten im Tunnel*	unter Betrieb ohne Sperrzeiten			unter Betrieb mit Sperrzeiten		
	1-gleisiger Tunnel	2-gleisiger Tunnel		1-gleisiger Tunnel	2-gleisiger Tunnel	
		wechselseitiger Gleisbetrieb	Umbau auf 1-Gleis im Tunnel für die Bauzeit		wechselseitiger Gleisbetrieb	Umbau auf 1-Gleis im Tunnel für die Bauzeit
Gewölbesicherung						
bergmännisch						
Vorbruchsicherung durch Stützplatte						
Gewölbesanierung und lokale Aufweitungen						
Anpassung Lichtraumprofil						
Gewölbeertüchtigung						
Gewölbeaufweitung						
Gewölbeabtrag						
Tunnelaufweitung im Fels						
bergmännisch, ggf. mit Sprengungen			TIT			TIT
Gewölbeausbau						
1-schalig						
2-schalig						
Tübbingausbau						
Stand der Technik/Referenzen vorhanden			Umsetzung zukünftig denkbar			
* Bei elektrifizierten Strecken sind die Einschränkungen und Auflagen durch die Oberleitung separat zu prüfen!						

Tab. 2: Maßnahmen bei Gewölbearbeiten in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen (Simon, 2012)

6.3 Baubetrieb

6.3.1 Bauzeit und Baukosten

Wie bereits erwähnt hat die Wahl der betrieblichen Rahmenbedingungen (vgl. Kap. 6.2) massive Auswirkungen auf die Bauzeit und die im Zuge der Sanierungsmaßnahmen entstehenden Baukosten.

Sanierungsunternehmungen unter Teilsperre kommen aufgrund der erschwerten Arbeitsbedingungen bei – zumindest teilweise – laufendem Teilbetrieb im Allgemeinen erheblich teurer als bei Vollsperrung der Tunnelanlage. Dieser Umstand ist unter anderem in den zur Gewährleistung der Sicherheit bei Aufrechterhaltung eines Teilbetriebs notwendigen Sonder- und Sicherheitsmaßnahmen zu finden. Dabei betreffen die Sicherheitsmaßnahmen sowohl den laufenden Zugbetrieb des Betreibers, als auch die sich vor Ort befindlichen Arbeiter der ausführenden Unternehmen.

Bei Vollsperrung sind die Arbeiten deshalb im Allgemeinen kostengünstiger und in einem kürzeren Zeitraum durchführbar. Die Arbeiten können ungestört vom laufenden Betrieb wesentlich flexibler durchgeführt werden, was unter anderem folgende Vorteile mit sich bringt:

- Einsatz größerer, leistungsstärkerer Baumaschinen ist möglich, damit
- Höherer Grad der Mechanisierung
- Geringere Anforderungen an die Flexibilität der Geräte und Maschinen
- Verbesserte Platzverhältnisse, vereinfachte Bauabläufe und Logistik, da (bei zweigleisigen Tunnel) das Nachbargleis in den Baubetrieb miteingebunden werden kann

Insgesamt lassen sich dadurch die Arbeiten schneller und effizienter durchführen, die benötigten Gerätschaften sind weniger kostenintensiv als flexible Spezialgeräte.

Jedoch entstehen wiederum für den Betreiber bzw. für die umliegenden Unternehmen bei Vollsperrung erhöhte Aufwendungen und Mehrkosten, da der Personen- und Frachtverkehr zumindest für kurze Zeit gänzlich unterbrochen wird und Ersatzmaßnahmen bzw. -routen eingerichtet werden müssen. Werden diese zusätzlich anfallenden betrieblich bedingten Kosten ebenfalls in die Sanierungskosten miteingerechnet, kann es durchaus sein, dass der Kostenvorteil einer Vollsperrung verloren geht und die Gesamtkosten bei Teilsperren niedriger zu liegen kommen.

Welche Variante (Teil- oder Vollsperrung) zuletzt die kostengünstigere ist, muss für jedes Tunnelbauwerk im Einzelnen genau untersucht und abgeschätzt werden.

Ein aktuelles Beispiel, welches die Problematik einer Vollsperrung deutlich veranschaulicht, ist der Arlberg-Straßentunnel. Die Sanierung des Arlberg-Eisenbahntunnels wurde in den vergangenen Jahren bereits erfolgreich durchgeführt – zur Erhöhung der Sicherheit wurden neue Flucht- und Rettungswege zwischen Straßen- und Eisenbahntunnel errichtet (vgl. Kap. 8) – die Sanierungsarbeiten des benachbarten Straßentunnels folgen in den Jahren 2015 bis 2017 und machen zwei mehrmonatige Vollsperrungen des Straßentunnels zwingend notwendig. Die Sperrungen führen jedoch zu umfangreichen Einschränkungen im Schwerverkehr, da es sich beim Arlbergtunnel um die schnellste und einzig ganzjährig befahrbare Verbindung zwischen Vorarlberg und Tirol handelt, durch dessen Schließung sich die Transportwege in etwa verdoppeln. Die Transportwirtschaft wird dadurch gezwungen ihre Logistik umzustellen und die Streckensperrung mit großräumigen Ausweichrouten über Deutschland zu umgehen. Um die negativen Auswirkungen der Streckensperrung zu minimieren, werden im Vorfeld folgende Maßnahmen getroffen: ein Bonussystem für die mit der Durchführung der Sanierungsarbeiten beauftragten Firmen wird in der Ausschreibung festgehalten und soll eine möglichst rasche Fertigstellung garantieren und damit die Sperrzeiten möglichst kurz halten. Zusätzlich werden Informationskampagnen durchgeführt sowie eine Aussetzung des Fahr- und Anhängerverbots für den Schwerverkehr auf den Ausweichstrecken veranlasst (vorarlbergernachrichten.at, Seite „Tunnelsperrung Arlbergtunnel“).

Die Wahl der betrieblichen Einschränkung steht somit grundsätzlich am Beginn jeder Planungsvorbereitung und entscheidet vorab über die möglichen Bauverfahren zur Durchführung der Sanierungsarbeiten. Dies wirkt sich wiederum direkt auf die zu tätigen Arbeitsvorbereitungen und auf die notwendige Baustelleneinrichtung aus (vgl. Kap. 6.3.2).

6.3.2 Arbeitsvorbereitung und Baustelleneinrichtung

Die grundlegenden Arbeitsvorbereitungen beginnen nach der Festlegung der Sperrart (Teil- oder Vollsperrung) bzw. nach Auswahl des zum Einsatz kommenden Bauverfahrens.

Eine grundsätzliche Planung umfasst in erster Linie die Erstellung einer Arbeitskalkulation, eines Bauzeitplans, Personaleinsatzplanung, Geräteeinsatzplanung, Materialbeschaffung sowie die Erstellung eines Baustellen-Einrichtungsplans unter Berücksichtigung räumlicher, logistischer und fertigungstechnischer Faktoren (vgl. Girmscheid, 2008; Jodl, 2012).

Der Erstellung eines Baustellen-Einrichtungsplans kommt bei Instandsetzungsarbeiten von Bestandstunnel besonderes Augenmerk zu, da durch die beengten Platzverhältnisse Abstell-

und Lagerungsflächen nur sehr begrenzt vorhanden und auch Art und Möglichkeit des Transports – gerade bei Sanierungsarbeiten unter teilweiser Aufrechterhaltung des Zugbetriebs – nur sehr eingeschränkt möglich sind. Die Durchführung von Sanierungen bedarf deshalb umfangreicher Vorausplanung um einen reibungsfreien Ablauf der Arbeiten gewährleisten zu können (vgl. Kap. 7).

6.4 Bauverfahren im Fahrbahn- und Sohlbereich

6.4.1 Schienenbearbeitung

Durch die laufende Belastung des Zugverkehrs (Schnellzüge, hohe Achslasten bei Güterzügen) kommt es zu einer starken Beanspruchung des Oberbaus. Dies führt mit der Zeit zu einem Materialverschleiß, wodurch im Längs- und Querprofil der Schienen Oberflächenfehler entstehen. Letztere sorgen wiederum u.a. dafür, dass der Stahl ermüdet, die Schwellenauflagefläche stärker beansprucht wird, das Schottergefüge mit der Zeit zerstört und der Fahrkomfort beeinträchtigt wird. Derartige Unebenheiten und Fahrflächenfehler auf der Schienenfahrfläche müssen deshalb in regelmäßigen Abständen beseitigt werden um die ursprüngliche Profilform wiederherzustellen und die gewünschte Lauf- und Verschleißqualität beizubehalten (Wikipedia, Seite „Gleisbaumaschine“).

Die Bearbeitung der Schienen geschieht mittels sogenannter Gleisbaumaschinen. Dabei handelt es sich um zumeist rein schienengebundene Geräte, die beim Bau oder bei der Instandhaltung von Gleisbett oder Schienen eingesetzt werden.

Für die Schienenbearbeitung zur Erhaltung von Längs- und Querprofil gibt es drei unterschiedliche Möglichkeiten der Schienenbearbeitung: Schienenschleif-, Schienenfräs- und Schienenhobelmaschine. Das Schleifen von Schienen erfolgt mit sogenannten Schleifscheiben, gefräst wird mit speziellen Fräsköpfen und Hobelmaschinen werden mit Hobelmeißeln spanabhebend eingesetzt (vgl. Marx et al., 2001). Abb. 11 zeigt eine sich heute im Einsatz befindliche Schienenschleifmaschine der bbw Bahnbau Wels (bbw.at, Seite „Gleiserhaltung“), welche auch bei Rhomberg Bahnbau (rhombergtrail.com, Seite „Maschinen“) in Österreich eingesetzt wird.



Abb. 11: Schienenschleifmaschine (rhombegrail.com, Seite „Maschinen“)

6.4.2 Arbeiten am Schotterbett

Um Arbeiten am Schotterbett zu verrichten, kommen – aus Gründen der Kostenersparnis und des schnellen Arbeitsfortschrittes – heutzutage weitestgehend kontinuierlich arbeitende Gleisbaumaschinen zum Einsatz. Dabei werden einzelne, hochspezialisierte Maschinen (jede Maschine ist für die Erneuerung eines ganz speziellen Abschnitts bzw. Konstruktionsbereichs zuständig) zu bis zu 700 m langen Gleisbauzügen zusammengestellt. Solche Gleisbauzüge weisen eine hohe Leistungsfähigkeit auf und können bis zu 500 m an Gleisaufbau innerhalb einer Stunde erneuern (Wikipedia, Seite „Gleisbaumaschine“; Marx et al., 2001).

Zur Instandhaltung des Gleisaufbaus werden folgende Gleisbaumaschinen eingesetzt (Wikipedia, Seite „Gleisbauzug“):

- *Schotterpflug*
- *Gleisstopfmaschine*
- *Weichenstopfmaschine*
- *Planumsverbesserungsmaschine*
- *Materialförder- und Siloeinheit*
- *Bettungsreinigungsmaschine*
- *Gleisumbauzug*
- *Recycling- und Schotterreinigungszug*
- *Gleismesswagen*

Bauverfahren zur Tunnelanierung

- *Gleisbauschienenkran*
- *spezielle Transportwagen für Schwellen, Schotter und anderes*

Ein Schotterpflug sorgt für die Her- oder Wiederherstellung des Bettungsquerschnittes mittels sogenannter Pflüge, die den Schotterkörper wieder in die gewünschte Form bringen (Abb. 12).

Stopfmaschinen dienen zum Stopfen bzw. Verdichten des Oberbaus. Hierbei wird das Gleis geringfügig angehoben, währenddessen tauchen Stopfpickel vibrierend in das Schotterbett ein und verdichten dadurch den Schotterkörper. Zumeist wird auch neues Schottermaterial zugegeben und in den alten Aufbau einvibriert (vgl. Abb. 12; Marx et al., 2001).



Abb. 12: Links: Schotterpflug (lechfeldbahn.de); rechts: Stopfmaschine (plassertheurer.com)

Wenn das Erdplanum bzw. der Unterbau nicht mehr die gewünschte Tragfähigkeit besitzt, was z.B. bei wachsender Betriebsbelastung der Fall sein kann, so sind Verbesserungsmaßnahmen des Unterbaus erforderlich um eine Schädigung von Gleisen und Weichen zu verhindern. Moderne Planumsverbesserungsmaschinen erlauben die Instandsetzung des Unterbaus unter Beibehaltung des bestehenden Bahngleises bei laufendem Betrieb des Nachbargleises (Abb. 13). Planumsverbesserungsmaschinen bestehen zumeist aus drei miteinander verbundenen Geräten: einer Antriebseinheit, einer Maschine für Altmaterialaushub und Einbringung von neuem Material sowie einer Einrichtung zum Stopfen und Ausrichten der Gleise. Der Antransport von neuem Material sowie der Abtransport des Aushubs erfolgt mittels Fördereinrichtungen und Silowagen (Marx et al., 2001).

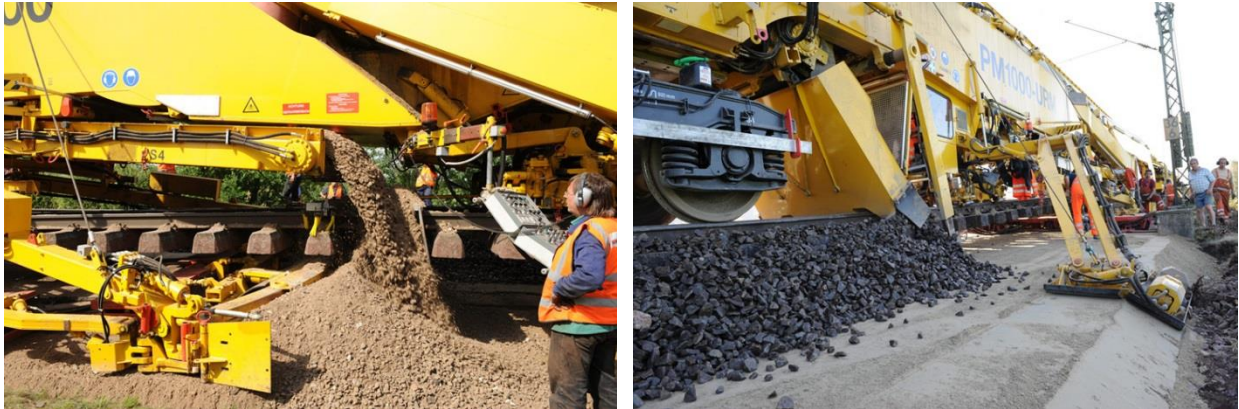


Abb. 13: Planumsverbesserungsmaschine. Links: Erstellen eines neuen Unterbauplanums (plassertheurer.com); rechts: Einbringen eines neuen Schotterbetts (plassertheurer.com)

Materialförder- und Silowagen dienen zum Transport und zur Übergabe von diversen Bau- oder Aushubmaterialien, die im Zuge von Gleisarbeiten benötigt werden bzw. anfallen und sind oftmals Bestandteile von Bauzügen (Abb. 14).



Abb. 14: Materialförder- und Silowagen (links: stummiform.de; rechts: vanoli-ag.ch)

Bettungsreinigungs- und Schotterreinigungsmaschinen befreien den Schotter von Verunreinigungen. Hierzu existieren spezialisierte, zumeist gleisgebundene Maschinen bzw. Geräte. Mittels Gleisumbauzug werden die alten Schienen durch neue ersetzt und die Gleisbettung erneuert, mittels Gleismesswagen bzw. –zug wiederum wird die Gleisgeometrie (Lage, Spurweite, Überhöhung, Verwindung) und der Verschleiß der Schienenprofile erhoben (vgl. Abb. 15, links). Ein Gleisbauschienenkran ist ein gleisgebundener Kran und dient zum Einheben von Lasten im Gleisbereich (Abb. 15, rechts).

Bauverfahren zur Tunnelanierung



Abb. 15: Links: Gleismesszug (<http://de.wikipedia.org/wiki/Gleismesswagen>); rechts: Gleisbaukran (bahnbilder.de)

6.4.3 Sohlerneuerung und -ausbau

6.4.3.1 Vorgangsweise und Geräte

Die Ursachen, die eine Erneuerung und den Ausbau der Sohle notwendig machen, sind vielfältig und umfassen u.a. Mängel an der Sohlentwässerung, Aufweitung des Lichtraumprofils, Herstellung einer neuen Innenschale mit neuem Sohlgewölbe aus statischen Gründen oder aufgrund von Bergwasserandrang. Ein Sohlausbau geht auch oftmals mit der Herstellung einer Festen Fahrbahn einher (vgl. Kap. 3.4.3 bzw. Kap. 6.3.4).

Eine mögliche Vorgangsweise für die Durchführung eines Sohlausbaus lässt sich übersichtsmäßig in folgende Schritte unterteilen (vgl. STUVA, 2011):

- Ausbau des Gleiskörpers mit Gleisbaukran
- Auskoffern und Laden des Schotterbetts
- Sichern (Rückankern) der Widerlager, ev. Injektionen von Mauerwerk etc.
- Absenkung der Sohle mittels Fräse, Meißel oder Bodensäge
- Abtransport des ausgebrochenen Felsguts mittels Materialförder- und Silowagen
- Reinigung der Fräsfläche
- Einbau des Sohlbetons
- Einbau Schotterung oder Feste Fahrbahn

Unabhängig von den durchzuführenden Arbeiten muss für eine ausreichende Standfestigkeit des Tunnelgewölbes gesorgt werden. Dies kann mittels Widerlagerunterfangung, durch

einen mobilen Längsverbau oder durch ein Rückverankern der Widerlager durchgeführt werden.

Zur Durchführung dieser Tätigkeiten gibt es eigene Bauzüge, welche alle angeführten Einzelschritte beherrschen und bei welchen die einzelnen Komponenten bzw. Geräte perfekt aufeinander abgestimmt sind. Ein Beispiel eines derartigen Systems ist das System Vanoliner der Vanoli AG aus der Schweiz. Dabei handelt es sich um einen Bauzug, welcher sich aus einem Zwei-Wege-Ladebagger (Vanoliner), einer Material-, Förder- und Siloeinheit (MFS) bestehend aus mehreren Einzelwagons, einem Gleiskran und einer Stopfmaschine zusammensetzt (vgl. Abb. 19).



Abb. 16: Bauzug mit Zwei-Wege-Bagger, MFS-Einheit und Stopfmaschine (Einzelbilder von: vanoli-ag.ch; modellbahnshop-lippe.com; miniaturmodelle.net)

Der Gleisschotter kann mit einem Ladebagger abgezogen und mit der Baggerschaufel in eine auf der Vorderseite des Baggers montierte Ladeschurre übergeben werden (Abb. 17), von wo aus das Abbaumaterial via Förderband in einen MFS-Wagen transportiert wird. Im Regelfall besitzt ein Bauzug mehrere Material-, Förder- und Siloeinheiten, wobei zuerst die letzten Wagen mit Material befüllt werden und zum Umschlagplatz zur Übergabe des Aushubmaterials geführt werden (vanoli-ag.ch, Seite „Vanoliner“).



Abb. 17: Zwei-Wege-Bagger beim Beladen der Ladeschurre und anschließender MFS-Einheit (vanoli-ag.ch)

Um Felsmaterial in der Tunnelsohle abzubauen, wird zusätzlich zum Baggerlöffel ein Baggermeißel eingesetzt, der das Felsmaterial ausbricht. Der Baggerlöffel schaufelt das ausgemeißelte Gesteinsmaterial anschließend in die Ladeschurre, von wo es über Förderbänder zu den nachlaufenden Material-, Förder- und Siloanlagen gelangt (Abb. 18; vgl. Kap. 6.6).

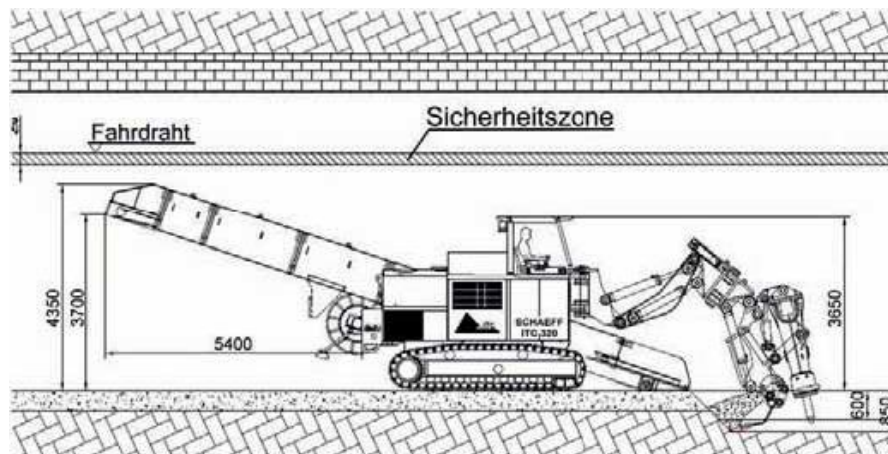


Abb. 18: Abtrag der Sohle mit Meißel am Beispiel Arlbergbahntunnel (STUVA, 2011)

6.4.3.2 Sohlabsenkung ohne und mit Sohlschluss

Auf den Einbau eines Sohlgewölbes kann verzichtet werden, wenn keine Kräfte oder Momente auf die Sohle wirken. Derartige Systeme kommen v.a. in standfestem Gebirge mit guter Felsqualität zum Einsatz. Der Gleisschotter kommt dabei direkt auf der Felssohle zu liegen.

Werden Kräfte aus dem Gebirge über die Gewölbeschale auf die Sohle geleitet, ist der Einbau eines Sohlgewölbes zur Herstellung eines Ringschlusses notwendig. Das Sohlgewölbe wird dabei mit Ortbeton in Abschnitten von 2 bis 8 Metern ausbetoniert. Bei zweigleisigen Tunnel kann die Sohlerneuerung dabei wechselweise vorgenommen werden (vgl. Abb. 10).

Der Einbau eines Sohlgewölbes findet generell bei Vollsperrung des betroffenen Gleises statt. Der Betrieb muss solange unterbrochen werden, bis der Beton die notwendige Frühfestigkeit erreicht hat. Soll der Betrieb jedoch aufrecht erhalten werden, kann mittels Hilfsbrücken der frisch betonierte Sohlenabschnitt überbrückt werden. Derartige Maßnahmen erschweren jedoch die Arbeiten in der Sohle. Alternativ können auch Betonfertigteile in die Sohle eingesetzt werden, dabei stellen das Setzen und Verbinden der Elemente die größte Schwierigkeit dar (STUVA, 2011).

Tab. 3 stellt die wesentlichen Maßnahmen bei einer Sohlerneruerung unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen nochmals überblicksmäßig gegenüber.

Sohlarbeiten	unter Betrieb ohne Sperrzeiten		unter Betrieb mit Sperrzeiten		
	zweigleisig		eingleisig	zweigleisig	
	wechselseitiger Gleisbetrieb	Umbau auf 1 Gleis im Tunnel für die Bauzeit		wechselseitiger Gleisbetrieb	Umbau auf 1 Gleis im Tunnel für die Bauzeit
Gewölbesicherung					
Widerlagerunterfangung					
Kontinuierlich verschiebbarer Längsverbau					
Sicherung Gleislage					
Träger-Bohlwand					
Sohlabsenkung					
mit Einbau Sohlgewölbe					
ohne Einbau Sohlgewölbe					
Einbau Sohlschluss					

Referenz vorhanden	Umsetzung zukünftig denkbar
--------------------	-----------------------------

Tab. 3: Maßnahmen bei Sohlarbeiten in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen (STUVA, 2011)

6.4.4 Errichtung einer Festen Fahrbahn

Die Errichtung einer Festen Fahrbahn zählt zu den baulichen Sicherheitsmaßnahmen und bringt deutliche Vorteile im Falle eines Rettungseinsatzes (vgl. Kap. 4.3) und wird für eingleisige Neubautunnel, bei welchem die Rettung über die benachbarte Tunnelröhre vorgesehen ist, zwingend vorgeschrieben (vgl. Kap. 5.4.1).

Eine Feste Fahrbahn bringt neben einer besseren Befahrbarkeit der Gleisanlage jedoch auch Vorteile hinsichtlich einer verbesserten Gleislagestabilität und eines geringeren Platzbedarfs im Vergleich zu herkömmlichen Schotteraufbauten (vgl. Kap. 3.4.3). Beim System Feste Fahrbahn existieren unterschiedliche Systeme: Feste Fahrbahn mit Schwellsockel, direkter Montage der Gleise auf die Fahrbahn sowie Systeme, bei denen die Schienen in die Fahrbahn eingegossen sind (Wikipedia, Seite „Feste Fahrbahn“).

In Österreich wird als Regelsystem seit dem Jahr 1995 das Feste-Fahrbahn-System ÖBB/PORR (elastisch gelagerte Gleistragplatte, GTP) eingesetzt (Abb. 19), welches seit 2001 auch in Deutschland auf Brücken und in Tunnel eingebaut wird. Dieses System entspricht einem Masse-Feder-System, bei welchem eine 5,16 m lange, schlaff armierte Fertigteilplatte aus Stahlbeton auf einer elastischen Trennschicht zu liegen kommt, welche die in den Untergrund emittierten Erschütterungen verringert. In Tunnel wird die elastisch gelagerte Gleistragplatte mit elastischer Trennschicht direkt auf der Sohle hergestellt (Porr, 2009).



Abb. 19: Verlegung Feste-Fahrbahn-System ÖBB/PORR (Porr, 2009)

Wie bereits erwähnt lässt sich eine Feste Fahrbahn auch bei halbseitigem Einbau während des Betriebs durchführen. Dabei sind jedoch die entsprechenden Sicherheitsvorschriften einzuhalten (z.B. Freihalten des Lichtraumprofils) sowie Langsamfahrten auf dem in Betrieb befindlichen Gleis vorzuschreiben (STUVA, 2011).

Bei den einzelnen Gleistragplatten handelt es sich um Fertigelemente, die mittels Bauzug an die entsprechende Stelle transportiert werden und anschließend mittels Schienenkran an die geforderte Stelle platziert werden (vgl. Abb. 19).

6.5 Bauverfahren im Gewölbebereich

Grundsätzlich können nachfolgende Arbeiten im Gewölbebereich unterschieden werden. Diese sind in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen in Tab. 2 gegenübergestellt (STUVA, 2011):

- Gewölbesicherung
- Gewölbesanierung und lokale Aufweitung
- Gewölbeaufweitung durch Gewölbeabtrag
- Tunnelaufweitung im Fels
- Gewölbeausbau

Eine Gewölbesicherung wird gemäß der im zyklischen Tunnelvortrieb mit konventionellen Sicherungsmaßnahmen durchgeführt und umfasst folgende Sicherungsmittel (Jodl, 2011):

- Spritzbeton zur Vergütung gegen Auflockerung des Gebirges und Unterstützung der Selbsttragwirkung des Gebirges
- Bewehrung zur Verbesserung der Tragwirkung des Spritzbetons
- Anker (zumeist als Systemankerung ausgeführt) und Spieße zur Verbindung bzw. Verdübelung des Gebirges
- Tunnelbögen zu Sicherungs- und Formgebungszwecken

Anschließend kommen im Zuge der Erweiterungsmaßnahmen Stützplatten und Schilde zum Schutz vor Verbrüchen und zur sofortigen Stützung des Gebirges zum Einsatz.

6.5.1 Gewölbesanierung und -abtrag

Lokale Einragungen des Mauerwerks in das Lichtraumprofil können im Bedarfsfall mit Schräg- und Ladebaggern entfernt werden (vgl. Abb. 18). Umfangreichere Gewölbesanierungen werden heutzutage, wie bereits erläutert, jedoch mit hochspezialisierten Bauzügen durchgeführt. Diese enthalten Einrichtungen zum Abtrag des bestehenden Gewölbeausbaus durch Hochdruckwasser (bis 1400 bar), falls nötig wird mittels Fräsen das Tunnelprofil lokal erweitert, anschließend folgt der Einbau der neuen Innenschale durch das Einbringen von Bewehrungsmatten und Auftrag von Spritzbeton und Brandschutzschicht.

Ein Gewölbeabtrag in größerem Umfang erfolgt ebenfalls in der Regel mittels Bauzug. Dabei erfolgt das Lösen des Mauerwerks zumeist mittels Bohrhämmern. Das anstehende Gestein wird dann mittels Fräs- oder Schrämköpfen, mit Fräswalze (breiter Fräskopf) oder im Sprengvortrieb entfernt (Abb. 20). Die maximale Abschlagslänge beträgt im Allgemeinen zwischen einem und drei Meter.

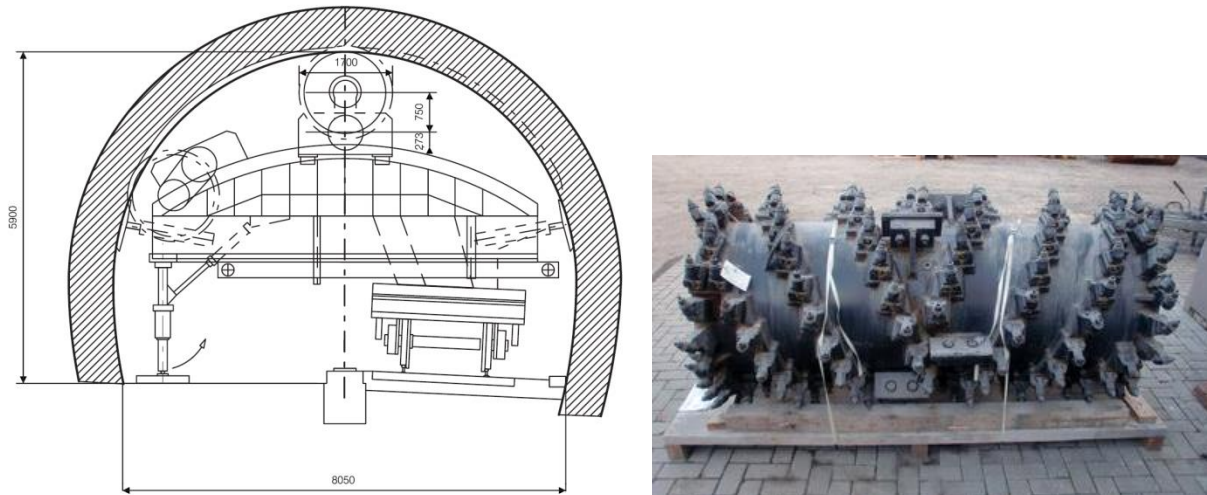


Abb. 20: Links: Fräsmaschine mit Fräswalze bei Vollsperre (STUVA, 2011); rechts: Fräswalze (smw-wagener.de)

Diese Arbeiten können bei Vollsperrung oder falls notwendig auch im wechselseitigen Gleisbetrieb durchgeführt werden. Hierbei ergeben sich jedoch Probleme mit der Gewährleistung der Gewölbesicherheit, auch die beengten Platzverhältnisse und die installierten Trennwände sorgen für Einschränkungen beim Gewölbeabtrag (STUVA, 2013).

6.5.2 Tunnelaufweitung mit Vortriebsportal

Um in ein- und zweigleisigen Tunnel zumindest einen eingeschränkten Betrieb während einer umfangreichen Tunnelaufweitung gewährleisten zu können, wurde die sogenannte Tunnel-im-Tunnel Methode entwickelt (vgl. Kap. 1.3; Breidenstein, 2007). Dabei wird ein Tunnelerweiterungsportal, bestehend aus einer Schutzeinhausung mit Stützplatten zur Sicherung der an das Portal angrenzenden alten Gewölbeausmauerung sowie seitlich angebrachten Hydraulikhämmern und fahrbaren Bohrrahmen, welche für Ausbruch und Sicherung sorgen, zwischen das zu erweiternde Gewölbe und den laufenden Bahnverkehr eingebracht. Im Nachlauf befindet sich ein Schalwagen, mit welchem eine Ortbetoninnenschale einbaut wird (vgl. Simon, 2012).

Für eingleisige Tunnel ist dieses Verfahren dann anwendbar, wenn genügend Freiraum zwischen altem Gewölbe und benötigtem Lichtraumprofil besteht. Bei zweigleisigen Tunnel erfolgt für die Bauzeit ein Umbau auf ein Ein-Gleis-System (vgl. Abb. 21).



Abb. 21: Tunnelvortriebsportal beim Langenauer und Hollricher Tunnel (Simon, 2012)

Bei der Tunnel-im-Tunnelmethode wird Fels bevorzugt nach dem Abspaltverfahren (Kap. 6.5) gelöst, da dieses System sowohl Bohreinrichtungen, als auch Hydraulikhämmer besitzt.

Während ein wechselseitiger Ausbau der Sohle mit Ortbeton durchaus möglich ist (vgl. Abb. 10), gibt es derzeit noch keine Methode den Gewölbeausbau mit Ortbeton wechselseitig auszuführen. Gründe sind die problematische Schalungsabdichtung bei halbseitigem Ausbau, verlängerte Ausschulfristen und der erhöhte Arbeitsaufwand für das Setzen von Fundamenten zur Gründung in Tunnelmitte (STUVA, 2011).

Ein Weiterentwicklung, welche eine Aufweitungseinheit mit dem Einbau von Betonfertigteilen bzw. Tübbingern verknüpft, ist die von der Firma Herrenknecht entwickelte „Tunnel Enlargement Machine“ TEM. Diese besteht aus einer Vorläufereinheit, welche die Elektro- und Hydraulikaggregate trägt, einer Tunnelaufweitungsmaschine, die die Felssicherung und den Ausbruch vornimmt, und einem Tübbingversetzwagen. Der weitere Ausbau kann dann anschließend im Schutz des Tübbingringes erfolgen (STUVA, 2011).

6.6 Bauverfahren zum Felsausbruch und -abtrag

Felsabtrag kann entweder zyklisch im Sprengvortrieb oder kontinuierlich mittels Meißeln oder Fräsen im Teilschnittvortrieb erfolgen. Jedes dieser beiden Systeme hat seine Vor- und Nachteile.

Ein Abbau mittels Sprengen ist vergleichsweise billig, jedoch nur in Sperrpausen möglich, wodurch es zu größeren Betriebseinschränkungen kommen kann. Ein kontinuierlicher Ausbruch ist auch parallel zum Bahnbetrieb möglich. Des Weiteren erfolgt bei Teilschnittmaschinen das Lösen des Felses gebirgsschonend. Teilschnittmaschinen können wirtschaftlich jedoch nur bis zu einer Gesteinsfestigkeit von ca. 120 N/mm² eingesetzt werden und erreichen deshalb rasch ihre Anwendungsgrenzen (Jodl, 2011). Liegt die Gesteinsfestigkeit über den besagten 120 N/mm², nimmt die Vortrieb- bzw. Abbauleistung rasch ab (< 10 m³/h) sowie der Verschleiß der Fräs- oder Schrämköpfe stark zu.

Heutzutage werden für die Aufweitung von Tunnel hauptsächlich Hydraulikhämmer und Bohrgeräte eingesetzt. Zunächst wird das alte Gewölbe mechanisch entfernt, anschließend Bohrlöcher im Gebirge gesetzt und Lockersprengungen durchgeführt. In Zukunft könnten auch alternative Schneidtechniken zum Zug kommen, hierzu laufen intensive Forschungsarbeiten bei namhaften Geräteherstellern wie Herrenknecht oder Wirth.

Eine neue Methode zum Ausbruch von Gestein mit hoher Festigkeit ist das Abspaltverfahren. Dabei wird das Gestein zunächst mit zahlreichen Bohrlöchern versehen. Anschließend wird ein Hammermeißel in das Bohrloch eingeführt, der das Gestein entlang der gesetzten Bohrungen aufspaltet. Vorteile dieses Systems ist die profilgenaue Erweiterung sowie die Einsetzbarkeit in hartem Fels (STUVA, 2011).

Kapitel 7

Notwendigkeit von detaillierten Vorerkundungsmaßnahmen

7.1 Allgemeines und Zustandsbewertung

Für die Beurteilung des Ist-Zustandes eines Tunnels sind Vorerkundungsmaßnahmen und eine detaillierte Bestandsaufnahme zwingend notwendig und als Planungsgrundlage unentbehrlich. Alte Baupläne sind – wie Beispiele aus der Vergangenheit zeigen – oftmals zu ungenau oder fehlerhaft. Erkundungsmaßnahmen betreffen sowohl den Baugrund, als auch das bestehende Bauwerk selbst (vgl. Schwab & Neumayer, 2010). Unzureichende Informationen führen zu Mehrkosten und zu Bauzeitverlängerungen (Kohlböck & Moser, 2010).

Im Sachstandsbericht der STUVA zur Sanierung von Eisenbahntunnel (2011) werden u.a. folgende Untersuchungen für Gebirge und bestehendes Bauwerk vorgeschlagen:

- Geotechnische Erkundung des Gebirges
- Untersuchung der Bergwasserverhältnisse (Menge und Chemismus, eventuelle Aggressivität der Wässer)
- Identifizierung der Ursachen für die auftretenden Bauwerksschäden
- Materialuntersuchungen im Labor (Feststellung mechanischer und chemischer Eigenschaften der Gesteine)
- Durchsicht bereits bestehender Unterlagen

Notwendigkeit von detaillierten Vorerkundungsmaßnahmen

Die Bewertung des Tunnelzustands zur Optimierung der Sanierungsmaßnahmen sollten nach Schwab & Neumayer (2010) u.a. folgende Erkundungsmaßnahmen umfassen:

- Detaillierte Vermessung des Bestandstunnels (z.B. Tunnelscan, vgl. Kap. 7.2) und des umliegenden Geländes
- Identifikation und Bewertung von Schäden, wie etwa Nassstellen, Wasserzutritte oder Risse
- Bewertung von Ausbaudicke und -qualität sowie der Abdichtung
- Aufnahme bestehender Entwässerungskanäle, alter Schächte, etc.
- Erfassung der vorliegenden Leit- und Sicherheitstechnik
- Untersuchungen im Hinblick auf die Entsorgung der im Zuge der Sanierung entfernten Baustoffe
- Untersuchung der Portalbauwerke
- Berücksichtigung etwaiger Nachbarbauwerke

Daneben sind, je nach Beeinflussung wasser- oder straßenbaulicher Gegebenheiten, die geplanten Maßnahmen mit den zuständigen Behörden (z.B. Straßen- und Wasserbau, Forst) abzuklären bzw. abzustimmen.

Wird auf eine Vorerkundung verzichtet und treten dann bei der Bauausführung Abweichungen zwischen Planung und Bestand ein, so führt dies zu Behinderungen der Sanierungsdurchführung, zur Notwendigkeit geänderter und zusätzlicher Leistungen und zu Abweichungen zwischen im Zuge der Erstellung des Leistungsverzeichnisses kalkulierten und tatsächlichen Massen. Schlussendlich kommt es dadurch zu einer Verlängerung der Bauzeit und zu Kostennachtragsforderungen der ausführenden Unternehmen (vgl. Kohlböck & Moser, 2010).

7.2 Messsysteme zur Durchführung einer Bestandsaufnahme

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten die vorliegenden Gegebenheiten mit ausreichender Genauigkeit und vertretbarem Aufwand zu erfassen. Nachfolgend werden die wichtigsten Erkundungsbereiche und -maßnahmen aufgezählt (vgl. Kohlböck & Moser, 2010):

- Detaillierte Erfassung des Lichtraumprofils mittels Laserscanner oder Theodolit (Grundlage zur Massenermittlung des Abraummaterials)

- Erkundung der Sohlgewölbstärke und Tiefe des anstehenden Felses (z.B. Auffinden von Bereichen mit Sohlhebung) durch Bohrungen oder Georadarmessungen
- Erkundung von Innenschalendicke und -aufbau mittels Kernbohrungen
- Aufbau des Widerlagers (u.a. Bewehrungsstärke) durch Metalldetektion
- Erkundung des Oberbau-Aufbaus im Zuge von Gleisschürfen
- Erfassung des Entwässerungssystems (Lage und Geometrie) durch Öffnen der Entwässerung oder mittels Georadar
- Erkundung von Kabelkanälen (Lage und Geometrie) durch punktuellen Öffnen des Kabeltroges

7.3 Fallbeispiele unzureichender Vorerkundung

Es gibt eine ganze Reihe von aktuellen Fallbeispielen, bei welchen Abweichungen der alten Baupläne, auf deren Grundlage die Planung und Ausschreibung erfolgte, vom tatsächlichen Ist-Zustand des Bauwerks zu Mehrkostenforderungen und Bauzeitverzögerungen führten. Durch detaillierte Vorerkundungsmaßnahmen wäre dieser finanzielle und zeitliche Mehraufwand vermeidbar gewesen.

Im Zuge der Sanierungsmaßnahmen des **Tanzenberg Tunnels** der S6 Semmering Schnellstraße sollte u.a. das Entwässerungssystem erneuert und eine Trennung von Fahrbahn- und Bergwässern durchgeführt werden. Der Einbau einer Schlitzrinne sowie die Erneuerung der Hauptentwässerungsschächte sollten durchgeführt werden. Als Planungsgrundlagen dienten vorwiegend alte Bau- bzw. Bestandspläne. Kurz nach Beginn der Arbeiten stellte sich heraus, dass die Lage der Tunnelhauptentwässerung nicht jener der Planung entsprach. Die bestehenden Schächte mussten abgebrochen und ein neuer Hauptentwässerungsschacht in der Fahrbahnmitte erstellt werden (Schwab & Neumayer, 2010).

Bei der Sanierung des **Massenberg Tunnels** (ebenfalls S6 Semmering-Schnellstraße) sollte die Innenschale erneuert und die alte Innenschale abgetragen werden. Für die Ausschreibung bzw. zur Massenermittlung wurden deshalb vor Beginn der Arbeiten alle 2,5 m Profilaufnahmen des bestehenden Lichtraumprofils erstellt und in der Ausschreibung drei unterschiedliche Abtragstiefen für den Ausbruch ausgegeben. Im Zuge der Fräsarbeiten wurden vom Auftragnehmer Theodolitmessungen durchgeführt. Dabei wurde erkannt, dass die Genauigkeit der für die Ausschreibung erstellten Profilaufnahmen unzureichend ist und stellenweise deutlich mehr Material abgefräst werden muss. Dieser Umstand bewirkte, dass

Notwendigkeit von detaillierten Vorerkundungsmaßnahmen

die tatsächlichen Massen die ursprünglich berechneten Massen deutlich überstiegen (Schwab & Neumayer, 2010). Tab. 4 zeigt eine Gegenüberstellung von ursprünglich geplanten Abtragsstufen und in der Ausführung zur Anwendung gekommene Abtragstiefen.

Abtragsstufe (cm)	Massen Ausschreibung (m²)	Massen Ausführung (m²)
0-3	1.604,0	6.730,78
3-6	726,0	6.616,98
6-9	49,5	6.470,11
9-12	in Ausschreibung nicht vorgesehen	6.161,11
12-15		4.720,52
15-18		2.134,42
Summe	2.379,5	32.833,92

*Tab. 4: Gegenüberstellung von ausgeschriebenen und tatsächlichen Massen
(Daten aus: Schwab & Neumayer, 2010)*

Auch beim **Arlberg-Eisenbahntunnel** konnten Unregelmäßigkeiten zwischen bestehenden Bauplänen und Erkenntnissen aus der Vorerkundung beobachtet werden. Unter anderem variierte die tatsächliche Mauerwerksdicke gegenüber den Angaben der alten Baupläne beträchtlich (vgl. ÖBB, 2004b).

Ein weiteres Beispiel, bei welchem zahlreiche Abweichungen zwischen alten Bauplänen und durchgeführter Erkundung beobachtet werden konnte, ist die erste Röhre des alten **Tauerntunnels**. Hier konnte dank umfangreicher Erkundungsmaßnahmen die Ausschreibung dementsprechend angepasst werden, wodurch ein finanzieller Mehraufwand bei der Sanierung verhindert werden konnte (vgl. hierzu Kohlböck & Moser, 2010).

Kapitel 8

Fallbeispiel Arlberg-Eisenbahntunnel

8.1 Einleitung

Der 10.650 m lange Arlberg-Eisenbahntunnel wurde in den Jahren 1879 bis 1884 nach der Alten Österreichischen Tunnelbauweise errichtet. Der zweigleisige Tunnel ist Teil der Westbahnstrecke zwischen Wien und Bregenz und verbindet die Orte St. Anton am Arlberg und Langen am Arlberg. Sie stellt damit neben dem Arlberg Straßentunnel, der mit einigen hundert Metern Abstand parallel zum Eisenbahntunnel verläuft (vgl. asfinag.at, Seite „Generalsanierung Arlbergtunnel“ sowie Abb. 22), die einzige ganzjährig befahrbare Verbindung zwischen Vorarlberg und Tirol dar (ÖBB, 2008; ÖBB, 2009b). Für die alpine Skimeisterschaft 2001 wurde das Ostportal des Tunnels verlegt um direkt in den Bahnhof St. Anton einzubinden. Dadurch verlängerte sich der Arlbergbahntunnel um ca. 400 m. Zur Erneuerung der Sicherheitstechnik und Erhöhung der Sicherheit folgten zwischen 2004 und 2010 weitere Ausbau- und Erneuerungsarbeiten, wobei unter anderem acht neue Flucht- und Rettungswege errichtet wurden (ÖBB, 2008).



Abb. 22: Trassenverlauf Arlbergstraßen- und eisenbahntunnel mit Rettungsstollen (ÖBB, 2009b)

Der Großteil der Arbeiten erfolgte unter Beibehaltung eines eingleisigen Bahnbetriebs (vgl. Abb. 26), einige Arbeiten mussten bei mehrtägiger Vollsperrung durchgeführt werden. Zum Schutz der Arbeiter während der Bauarbeiten wurden Langsamfahrtstellen an bestimmten Streckenabschnitten eingeführt, Arbeiten durften nur innerhalb dieser Langsamfahrbereiche erfolgen. Weiters wurden hydraulisch ausfahrbare Trennwände eingesetzt um den Arbeitsraum vom Betriebsgleis abzutrennen. Auch die Logistik der Baustelle gestaltete sich insgesamt als schwierig, da aufgrund der mangelnden Platzverhältnisse auf der Seite St. Anton am Arlberg die Versorgung der Baustelle nur über das Westportal erfolgen konnte (STUVA, 2011).

Diese umfassten vorwiegend folgende Maßnahmen (vgl. ÖBB, 2009b):

- Lichtraumaufweitung
- Sanierung des Gewölbes (v.a. mit Spritzbeton)
- Vertiefung der Tunnelsohle um bis zu 30 cm (Containereinsatz im Güterverkehr war bisher nur auf einem Gleis möglich)
- Errichtung von acht Flucht- und Rettungswegen zum benachbarten Straßentunnel (2004 - 2007; vgl. Abb. 22)
- Einbau Feste Fahrbahn mit Wendenischen (für straßentaugliche Rettungsfahrzeuge befahrbar, Masse-Feder-System zur Minderung von Vibrationen)
- Umbau von Fahrleitung auf Stromschiene (höhere Stabilität, geringerer Wartungsaufwand)
- Erneuerung der Sicherheitstechnik (Löschwasserleitung, Orientierungsbeleuchtung, Notruftelefone, Funkausrüstung, etc.)

Tab. 5 zeigt den im Zuge der Sanierungs und Ausbauarbeiten getätigten Massenumsatz.

Errichtung Flucht- und Rettungswege	
Ausbruchmaterial	120.000 m ³
Spritzbetonauftrag	15.000 m ³
Stahl verbaut	600 t
Ankerstangen	20.000 Stk.
Tunnelsanierung – Abbruch und Reinigung	
Mauerwerksabtrag	3.500 m ²
Spritzbetonabtrag	48.000 m ²

Felsabtrag Sohle	15.000 m ³
Felsausbruch Nieschen	5.200 m ³
Abtrag Gleisschotter	27.000 t
Ausbau Schwellen	25.000 Stk.
Ausbau Schienen	40.000 m
Ausbau Weichen	8 Stk.
Gewölbereinigungsmaßnahmen	22.500 m ²
Tunnelsanierung – Einbau	
Spritzbetonauftrag neu	48.600 m ²
Errichtung Feste Fahrbahn (auf einer Länge von zweimal ca. 10.000 m)	
Gleistragplatten	3.700 Stk.
Schienen	40.000 m
Weichen	8 Stk.

Tab. 5: Daten zur Sanierung des Arlbergbahntunnels (Daten aus: oebb.at, Seite „Nachrüstung Arlbergtunnel“)

8.2 Untergrund und Bestandsausbau

Der Arlbergtunnel kommt in der Phyllit-Gneis-Zone (Oberostalpinen Kristallin) der Silvretta-Masse südlich der Nördlichen Kalkalpen zu liegen. Das Gebirge wird durch eine Wechsellagerung von Phylliten und Gneisen unterschiedlicher Qualität und Härtegrade charakterisiert (vgl. Abb. 23; Gruppe Geotechnik Graz, 2008; ÖBB, 2009b).

Während im östlichen Drittel hauptsächlich Gneis ansteht, finden sich im westlichen und zentralen Bereich des Tunnels hauptsächlich Glimmerschiefer und Schiefergneise. Die Schieferungsflächen der Glimmerschiefer sind planar bis wellig und sorgen für stark anisotrope mechanische Eigenschaften des Gebirges (ÖBB, 2004b). Die Gneise weisen eine einaxiale Druckfestigkeit von ca. 10 bis 77 N/mm² (E-Modul zwischen ca. 7.800 und 21.900 N/mm²) auf, während die einaxiale Druckfestigkeit der Glimmerschiefer zwischen ca. 10 und 99 N/mm² (E-Modul ca. 3.300 bis 20.500 N/mm²) beträgt (ÖBB, 2004b). Die einaxiale Druckfestigkeit der Glimmerschiefer ist dabei stark vom Anstellwinkel (Winkel zwischen der Schieferung und der Richtung der Kraffteinleitung) abhängig (vgl. Prinz, 2012; Müller & Pacher, 1965).

Im Zuge der geomechanischen Planung (vgl. ÖGG, 2008) wurden insgesamt fünf Gebirgsarten ausgewiesen, wobei der mechanisch wirksame Trennflächenabstand als

Fallbeispiel Arlberg-Eisenbahntunnel

Schlüsselparmeter für die Einteilung der Gebirgsarten herangezogen wurde. Weiters wurden folgende fünf Gebirgsverhaltenstypen definiert (ÖBB, 2004b):

- *GVT 2/1: gravitativ bedingtes Herauslösen (Gleiten, Fallen) von Kluffkörpern im unmittelbaren Anschlagbereich*
- *GVT 2/2 gravitativ bedingtes Herauslösen (Gleiten, Fallen) von Kluffkörpern außerhalb des unmittelbaren Anschlagbereich*
- *GVT 3 Spannungsbedingte Überbeanspruchung des Gebirges mit hohlraumnahen Neubrüchen*
- *GVT 4/1 Spannungsbedingte Überbeanspruchung des Gebirges mit tiefreichenden Neubrüchen*
- *GVT 4/2 Spannungsbedingte Überbeanspruchung des Gebirges mit tiefreichenden Neubrüchen in Verbindung mit starker Zerlegung des Gebirges*

Des Weiteren wurden Lösbarkeitsklassen für das anstehende Gebirge, als auch für den Sohlusbau definiert. Insgesamt wurden vier Lösbarkeitsklassen für den Fels und zwei Lösbarkeitsklassen für den Sohleinbau vorgegeben (vgl. ÖBB, 2004b). Der Fels wird dabei als überwiegend nicht reibar beschrieben, wodurch ein Ausbruch mit Baggerlöffel nicht möglich ist.

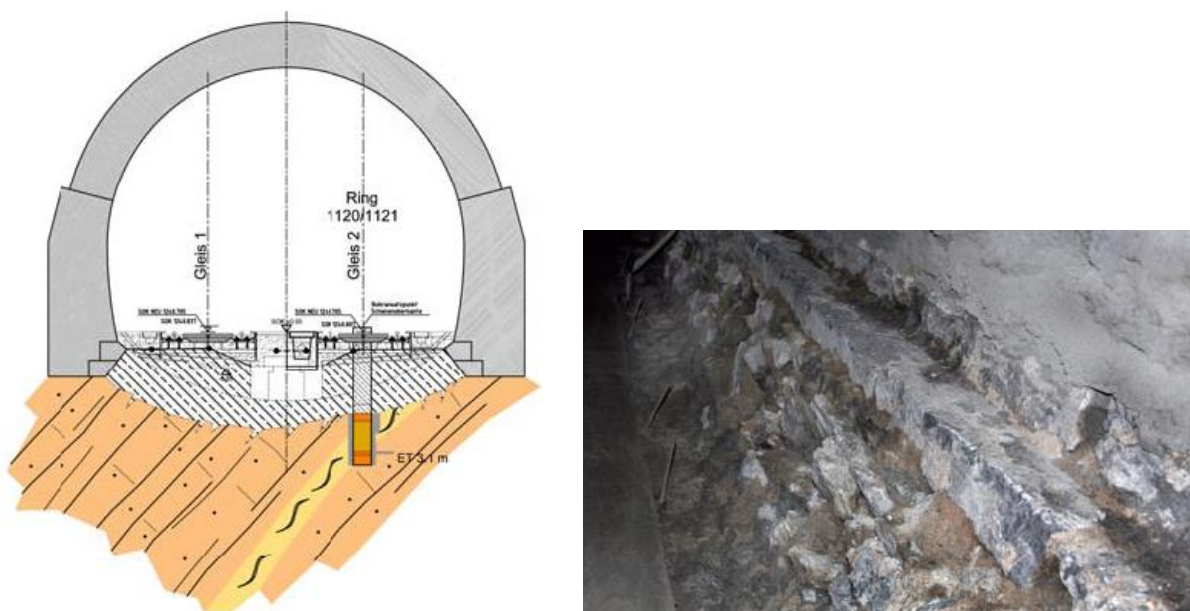


Abb. 23: Links: Tunnelschale mit geologischem Untergrund; rechts: Felsstunnelsohle im Arlberg-Eisenbahntunnel (Gruppe Geotechnik Graz, 2008)

Das Gebirgsverhalten sowie die Gesteinsfestigkeit hatten damit maßgeblichen Einfluss auf die Wahl der Baumaßnahmen, wie Abtragslänge, Stützmaßnahmen und Abtragsarten (STUVA, 2011).

Der Bestandsausbau ist in den Ausschreibungsunterlagen zur sicherheitstechnischen Nachrüstung des Arlbergtunnels (ÖBB, 2004b) detailliert aufgezeichnet und soll im Folgenden kurz wiedergegeben werden.

- Der lichte Querschnitt des alten Tunnels vor Durchführung der Sanierungsmaßnahmen betrug ca. 41 m². Ein Zugang war lediglich über die beiden Portale sowie einen Rettungsschacht in St. Anton am Arlberg möglich.
- Der Tunnel wurde mit Mauerwerk unterfangen (Abb. 24), die einzelnen Mauerungsblockabschnitte wurden mit einer Länge von ca. 8 m hergestellt. Dabei kamen unterschiedliche Mauerwerkstypen mit unterschiedlichen Ausbaudicken (0,5 bis 2,0 m) zum Einsatz. Das Mauerwerk besteht im Allgemeinen aus unregelmäßigen Bruchsteinen, bei ungünstigen geologischen Verhältnissen wurde auch Quadermauerwerk zur Hohlraumstützung verwendet.
- Die Hinterfüllung des Mauerwerks besteht aus Steinen, aber auch aus Baumaterial, wie beispielsweise Holz. Die Mächtigkeit der Hinterfüllung ist sehr unregelmäßig und weist im Firstbereich Dicken bis zu 1,5 m auf.
- In den Jahren 1982 und 1983 wurden im westlichen Tunnelabschnitt Sanierungsmaßnahmen auf Grund von Wasserzutritten (Durchnässung des Mauerwerks) durchgeführt. Im Zuge dieser Arbeiten wurde die Tunnelleibung mit Spritzbeton (vgl. Kap. 8.3) versehen und Injektionen des Gebirges durchgeführt.
- Bis 1986 wurde außerdem eine Aufweitung des Lichtraumprofils von Gleis 2 vorgenommen um das Befahren mit Containerzügen zu ermöglichen. Die Sohle wurde im Rahmen dieser Erweiterung um ca. 20 cm abgesenkt und die Tunnelschale im Kämpferbereich bereichsweise aufgeweitet und anschließend mit Spritzbeton gesichert. In Bereichen mit hohem Mauerwerksabtrag kam eine bewehrte Spritzbetonschale zum Einsatz, welche mit Ankern rückgesichert wurde. Im Zuge dieser Arbeiten wurde bereits über eine Länge von ca. 3,6 km eine Feste Fahrbahn in das Tunnel eingebaut.
- Im Laufe der Zeit zeigte die Spritzbetonschale Abplatzungen bzw. Ablösungen vom Mauerwerk, was eine Sanierung der Innenschale dringend erforderlich machte.



Abb. 24: Gewölbemauerung des Arlbergbahntunnels im Bestand (Gruppe Geotechnik Graz, 2008)

8.3 Baumaßnahmen und Bauverfahren

Die Rettungstollen und Kavernen für die Sammelräume wurden nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise im zyklischen Vortrieb ausgebrochen. Der Ausbruch fand ohne Unterbrechungen des Straßen- bzw. Eisenbahnverkehrs statt. Zur Sicherung des Gebirges kamen Spritzbeton, Anker und Stahlbögen zum Einsatz (ÖBB, 2009b).

Am zu sanierenden Haupttunnel wurde vorab eine zur Aufnahme des Bestands und zur Optimierung der eingesetzten Ausbruchtechniken durchgeführte Erkundung mittels Kernbohrungen und geophysikalischen Untersuchungen (Georadar mit Eindringtiefen von zwei bis vier Metern sowie seismische Messungen) durchgeführt (vgl. Kap. 7).

Der Mauerwerksabtrag in den Ulmen zur Vergrößerung des Lichtraumprofils erfolgte unter Einsatz von Diamantsägen und anschließendem hydraulischem Ausbruch. Diese Abbruchweise ist nahezu erschütterungsfrei und stellt die Schonung von zu erhaltendem Mauerwerk sicher.

Eine Trockenspritzbetonschale, welche in den Jahren 1982 bis 1986 zu Sicherheitszwecken abschnittsweise auf das Mauerwerk aufgetragen wurde (vgl. Kap. 8.2), wurde durch einen Abtragsroboter mittels Hochdruckwasserstrahlen zur Gänze entfernt (Abb. 25). Der Abtrag war nötig, da die alte Spritzbetonschale größtenteils keinen Verbund mehr zum Untergrund besaß, wodurch sich immer wieder Spritzbetonplatten von mehreren m² Fläche von der Wandung ablösten (STUVA, 2011).

Die Sanierung der Tunnelauskleidung stellte sich nach ÖBB (2004b) wie folgt dar: in Bereichen mit Frosteinwirkung wurde das Mauerwerk zunächst mittels Sandstrahlen gereinigt und anschließend eine fünf Zentimeter dicke Spritzbetonversiegelung in zwei Schichten aufgebracht, zwischen den Schichten wurde eine Glasfaserbewehrung eingebaut und die Spritzbetonversiegelung anschließend mit Ankern im Raster 1,5/1,5 m rückverankert. Für Bereiche außerhalb der Frosteinwirkung wurde entweder eine Fugensanierung durchgeführt oder das Mauerwerk ebenfalls mit Spritzbeton versiegelt. Auftretende Wasserzutritte wurden in beiden Fällen gefasst und in Mauerwerksschlitzen zum Entwässerungskanal abgeleitet.

Vereinzelt konnten an der Tunnelwandung flächenhafte Wasserzutritte festgestellt werden. Diese wurden in weitere Folge durch Flächendrains gesammelt und der Tunnelentwässerung zugeführt (ÖBB, 2010).

Der Gleisabtrag wurde mittels Bauzug durchgeführt, hierbei wurde gleichzeitig das Gleis abgetragen und Abraumwagons mit Schotter- oder Felsabtrag beschickt, da aufgrund der Platzverhältnisse eine Zwischenlagerung von Ausbruchmaterial nicht möglich war (Abb. 25).



Abb. 25: Links: Hochdruckwasserstrahlen mit Roboter (STUVA, 2011); rechts: Gleisabtrag mittels gleisgebundenem Spezialkran (vbgv1.orf.at)

Aufgrund der wechselhaften Gesteinseigenschaften mit nur mäßigen Gesteinsfestigkeiten entschied man sich zum Abtrag des Sohlgewölbes sowie für den Felsabtrag in der Sohle für den Einsatz von Hydromeißeln (vgl. Abb. 18). Der Ausbruch erfolgt dabei mittels Kettenbagger, auf welchem sowohl ein Meißel, als auch ein Baggerlöffel vorhanden sind. Der Baggermeißel löst die auszubrechende Sohle bzw. den unterlagernden Fels, das ausgebrochene Material wird anschließend mit Hilfe des Baggerlöffels in eine Ladeschurre befördert, von wo es über Förderbänder zu den nachlaufenden Material-, Förder- und Siloanlagen gelangt (STUVA, 2011).

Wurden im Zuge der Sohleintiefung die Widerlager derart untergraben, dass die Standsicherheit der Tunnelschale nicht mehr gewährleistet werden konnte, so mussten Sicherungsmaßnahmen mit Ankern vorgenommen werden. Außerdem wurden bestehende Eintiefungen der Tunnelsohle, welche mit Lockermaterial ausgefüllt waren, mit Betonplomben versehen (ÖBB, 2004b).

Im Rahmen der Sohleintiefung von Gleis 2 wurde ebenfalls der bestehende Sohlkanal durch einen neuen Kanal ersetzt und im Abstand von 40 m Kontrollschächte errichtet.

Nach Beendigung der Aushubarbeiten und Reinigen der Sohle wurde bewehrter Sohlbeton mit einer Mindestdicke von 10 cm eingebracht und Gleistragplatten zur Herstellung einer Festen Fahrbahn (System ÖBB-Porr, vgl. Kap. 6.4.4) installiert (vgl. Abb. 26).



Abb. 26: Links: Bauarbeiten unter Beibehaltung eines eingleisigen Betriebs; rechts: Bauzug mit Betonmischer zum Einbringen von Sohlbeton (FCP, 2009)

8.4 Rettungswege und sicherheitstechnische Einrichtung

Das Rettungsprinzip basiert auf einer Selbstrettung der beteiligten Personen, die im Falle eines Unfalls über die Flucht- und Rettungswege zunächst in einen der sechs Personensammelräume (Abb. 27), welche mit Schleusentoren gegen Rauch und Hitze geschützt sind, flüchten und anschließend über die angrenzende Tunnelröhre ins Freie gelangen können (vgl. Neumann & Wehr, 2003; Neumann, 2010; ÖBB, 2008).

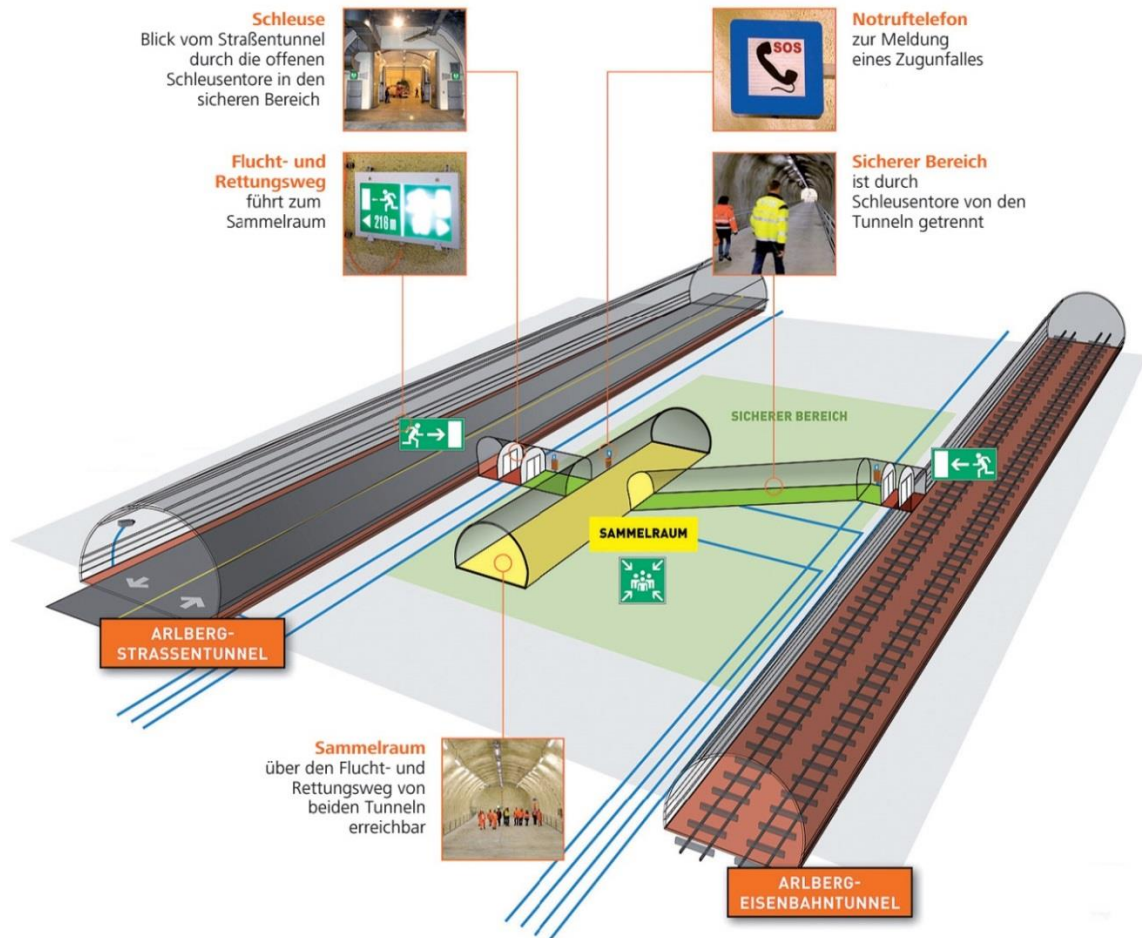


Abb. 27: Fluchtwege- und Rettungssystem im neuen Arlberg-Eisenbahntunnel (ÖBB, 2008)

Die Flucht- und Rettungswege wurden laut ÖBB (2009b) im Detail mit folgenden sicherheitstechnischen Einrichtungen ausgestattet:

- Personensammelraum
- Autark betriebenes Lüftungssystem
- Beleuchtung
- Handlauf
- Barrierefreie Wege
- Schleusentore
- Notruftelefone
- Videokameras
- Mehrsprachige Informationssysteme
- Fluchtwegkennzeichnung

Des Weiteren wurden nach Neumann (2010) zur Erhöhung der Sicherheit folgende Installationen getätigt bzw. Maßnahmen durchgeführt (vgl. Kap. 3): Feuerwehrlinien, brandgeschützte Ausführung der Versorgungsleitungen, Stromanschlussmöglichkeiten alle 100 m, Möglichkeit der Erdung der Oberleitung für die Einsatzkräfte, Einfahrtsmöglichkeiten in den Tunnel und Rettungsplätze sowie Räumlichkeiten für die Einsatzleitung.

8.5 Abweichung von Ausschreibung und Ausführung

Unzureichende Vorerkundungsmaßnahmen bzw. ungenügende Kenntnis über die Bestandsgegebenheiten im Tunnel haben in der Vergangenheit bereits des öfteren unausgereifte bzw. fehlerhafte Ausschreibungen von Auftraggeberseite her verursacht, was zu Problemen im Bauablauf mit Auswirkungen auf Kosten und Bauzeit geführt hat (vgl. Kap. 7 bzw. Kohlböck & Moser, 2010 sowie Schwab & Neumayer, 2010).

Auch bei der Sanierung des Arlbergeisenbahntunnels kam es im Zuge der Bauarbeiten zu Änderungen gegenüber dem genehmigten Bauentwurf bzw. der vom Bauherrn erstellten bzw. in Auftrag gegebenen Ausschreibung. Hierzu existiert ein eigenes Dokument „Sicherheitstechnische Nachrüstung Arlbergtunnel – Dokumentation der Änderungen gegenüber dem genehmigten Bauentwurf zum Antrag um Betriebsbewilligung gemäß §34b des Eisenbahngesetzes 1957, BGBl Nr 60, idF BGBl Nr 95/2009“ (ÖBB, 2010). Die Änderungen betrafen unter anderem folgende Bereiche (ÖBB, 2010):

- das festgelegte Lichtraumprofil
- die Streckenplanung mit Änderungen in der Trassenführung
- das Entwässerungssystem
- die Kabelwege
- den Randweg
- das Portalgebäude bei Langen sowie
- einen zusätzlichen Ölabscheider mit Auffangbecken in St. Anton am Arlberg.

Die getätigten Änderungen gegenüber der Ausführungsplanung und Ausschreibung sollen im Folgenden jeweils kurz erörtert werden.

8.5.1 Lichtraumprofil

Während der Erstellung der Ausführungsplanung zur Sanierung des Arlberg-Eisenbahntunnels kam es zu einer Änderung der Anforderungen an das auszuführende

Lichtraumprofil. Dabei wurde das Lichtraumprofil P/C78 bzw. 408 durch das Lichtraumprofil PR172 ersetzt (vgl. Kap. 2.3.3; Zierl, 2012), was eine Erweiterung des Lichtraumes im Bereich der oberen Ecken bedeutet.

Eine Veränderung des Lichtraumprofils mit größerem Freiraum im First- bzw. Kämpferbereich bedingt einen erheblichen Eingriff in das bestehende Tunnelgewölbe (Mehrabtrag der Innenschale im Kämpferbereich), der sich grundlegend auf das Sanierungskonzept auswirkt. Durch einen Mehrabtrag bedingt durch die Wahl eines größeren Lichtraumprofils kommt es zu einer Schwächung der Gewölbemauerung, wodurch die Tragfähigkeit der Innenschale negativ beeinflusst wird und statische Neuberechnungen in Bereichen mit tieferreichenderem Gewölbeabtrag erforderlich macht. Die geänderten Bedingungen können wiederum eine Änderung der zum Einsatz kommenden Bauverfahren notwendig machen und sich somit auf den gesamten Baubetrieb auswirken.

Im Falle des Arlberg-Eisenbahntunnels konnte einem übermäßigen Eingriff in das bestehende Tunnelgewölbe durch eine geringfügige Änderung der Trassenführung entgegengewirkt werden (vgl. Kap. 8.5.2; ÖBB, 2010).

8.5.2 Trassenführung

Um den Eingriff in die bestehende Gewölbemauerung durch Änderung des Lichtraumprofils zu reduzieren, wurde die Trassenführung des Arlberg-Eisenbahntunnels optimiert. Dabei kam es zu geringfügigen Veränderungen der Gradienten beider Gleise, die Trassierung in der Lage wurde für beide Gleise nicht verändert. Eine detaillierte Beschreibung der Gradienten von Gleis 1 sowie Gleis 2 sind in ÖBB (2010) zu finden.

Des Weiteren konnten bei Gleisvermessungsarbeiten im Bereich des Portals Langen am Arlberg im Rahmen von Vorbereitungsarbeiten zur Anbindung der neuen Gleise an den Bestand Abweichungen betreffend der Lage und Höhe der Bestandsgleise festgestellt werden. Eine Anpassung erfolgte durch geringfügige Verschiebung des Bogenendes und des Übergangsbogenanfangs (vgl. ÖBB, 2010).

8.5.3 Entwässerung

Im Zuge der Bauausführung kam es zu Änderungen der Entwässerung im Bereich des Tunnelgewölbes, des Sohlkanals und der Festen Fahrbahn.

8.5.3.1 Tunnelgewölbe und Sohlkanal

Bei Vor-Ort-Untersuchungen als Vorbereitung zur Durchführung der Lichtraumaufweitung wurden abschnittsweise flächenhafte Wasserzutritte im Bereich des Tunnelgewölbes

Fallbeispiel Arlberg-Eisenbahntunnel

festgestellt. Diese wurden in weiterer Folge mit Flächendrains gesammelt und zu den Ringfugen abgeleitet, von wo das Wasser mittels Rohren gefasst und unter dem Randweg und der Festen Fahrbahn zum verrohrten Sohlkanal geführt wird (Abb. 28).

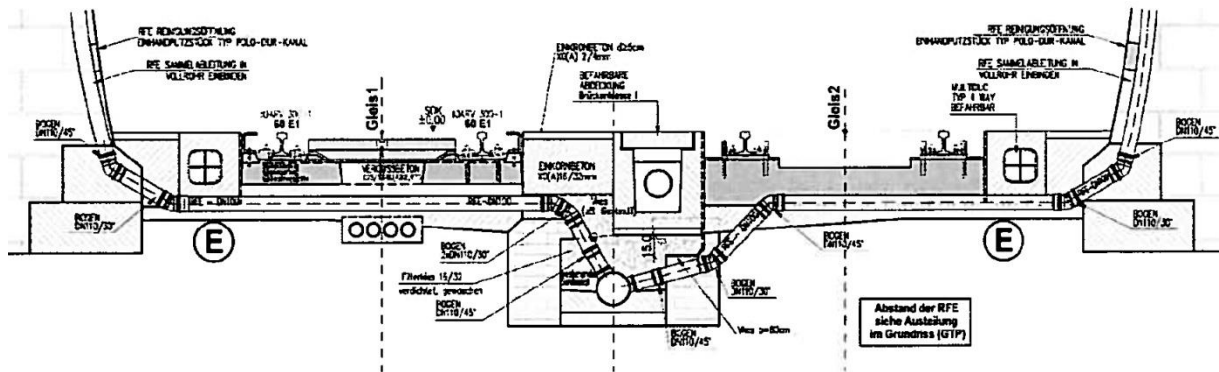


Abb. 28: Einleitung der Ringfugenwässer in den verrohrten Sohlkanal (ÖBB, 2010)

Im Bereichen mit größerem Wasserandrang entschied man sich im Zuge der Bauausführung für die Wahl eines runden Mehrzweckrohres DN 300 (anstelle des geplanten tunnelförmigen Mehrzweckrohres DN 250) für den Sohlkanal, um größere Wassermengen über diesen abführen zu können. Dazu musste die Kanalsohle von 1,24 m unter SOK auf 1,34 m unter SOK abgesenkt werden. Abb. 29 und Abb. 30 zeigen den verrohrten Sohlkanal im genehmigten Bauentwurf sowie im Ausführungsprojekt (ÖBB, 2010).

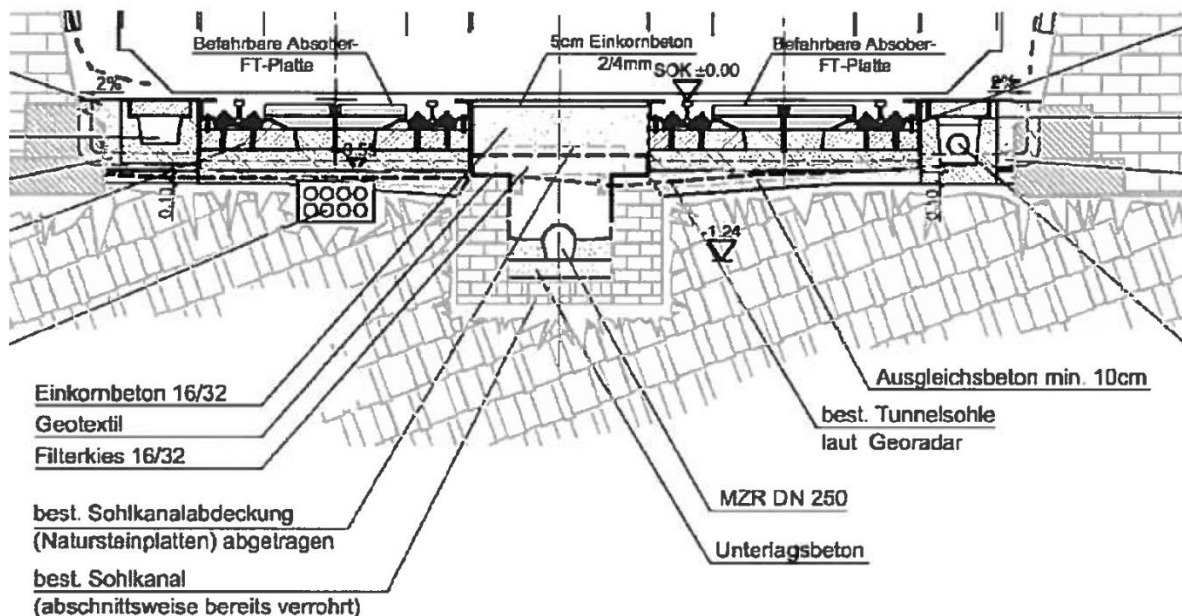


Abb. 29: Ausführung des Sohlkanals laut Planung (ÖBB, 2010)

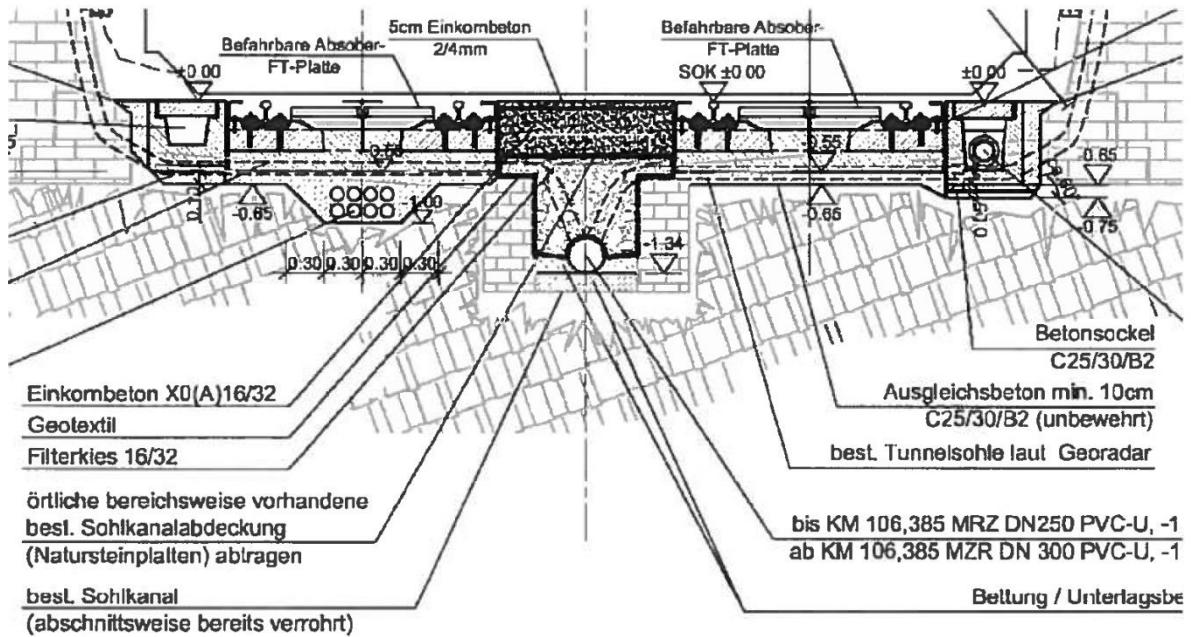


Abb. 30: Tatsächliche Ausführung des Sohlkanals (ÖBB, 2010)

8.5.3.2 Feste Fahrbahn

Für die Entwässerung der Feste Fahrbahn war ursprünglich die Erstellung von vertikalen Drainagematten zwischen Fester Fahrbahn und dem Randweg bzw. dem Mittelstreifen geplant, von wo aus das Wasser in zwei parallelen Kastenprofilen in die Mitte des Tunnels zum Sohlkanal geleitet werden sollte (Abb. 31). Durch den bei Gleis 2 angrenzenden Trog für die Löschwasserleitung wäre eine zusätzliche Eintiefung für den Ableitungstrog unterhalb des Löschwasserleitungstrog vorgesehen gewesen (ÖBB, 2010).

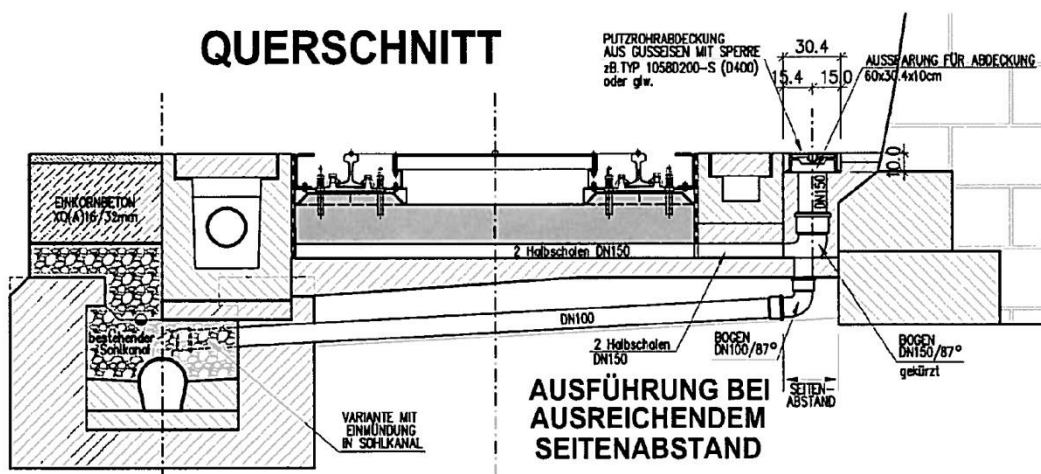


Abb. 31: Entwässerung Feste Fahrbahn laut Planung (ÖBB, 2010)

Im Zuge der Bauarbeiten zeigte sich jedoch, dass eine zusätzliche Vertiefung zur Herstellung des Ableitungstroges unterhalb der Löschwasserleitung (vgl. Abb. 31) mit einem hohen technischen und finanziellen Aufwand sowie aus geotechnischer Sicht mit einem ungünstigen Mehrabtrag im Bereich der Tunnelsohle verbunden ist. Deshalb entschied man sich laut ÖBB (2010) dafür, die bestehende Sohlkanalwand unterhalb des Löschwassertroges abzutragen und durch eine Filterkiespackung zu ersetzen, wodurch eine zusätzliche Sohleintiefung vermieden werden konnte. Die Verbindung zwischen Filterkies und kastenprofil erfolgt durch eine vertikale Aussparung in der Tunnelsohle (Abb. 32).

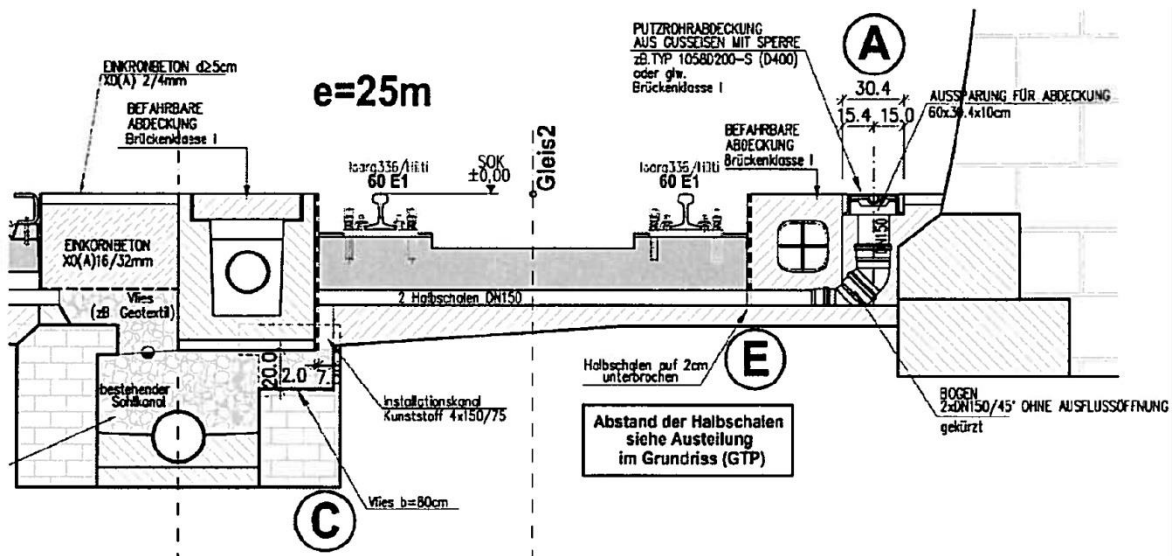


Abb. 32: Entwässerung Feste Fahrbahn in der Ausführung (ÖBB, 2010)

8.5.4 Kabel- und Randwege

Zur Führung der Kabelwege war die durchgehende Herstellung von Kabeltrögen unterhalb der Randwege vorgesehen (Abb. 33). Zur Reduzierung der Eingriffe in das bestehende Sohlgewölbe bzw. den Widerlagersockel entschied man sich im Zuge der Bauausführung jedoch dafür, den Kabeltroge bereichsweise durch einen sogenannten 4-fach Multikabelkanal zu ersetzen (ÖBB, 2010). Auch der unter Gleis 1 geführte Kabelkollektor wurde modifiziert und so der Ausbruch in der bestehenden Tunnelsohle minimiert (Abb. 34).

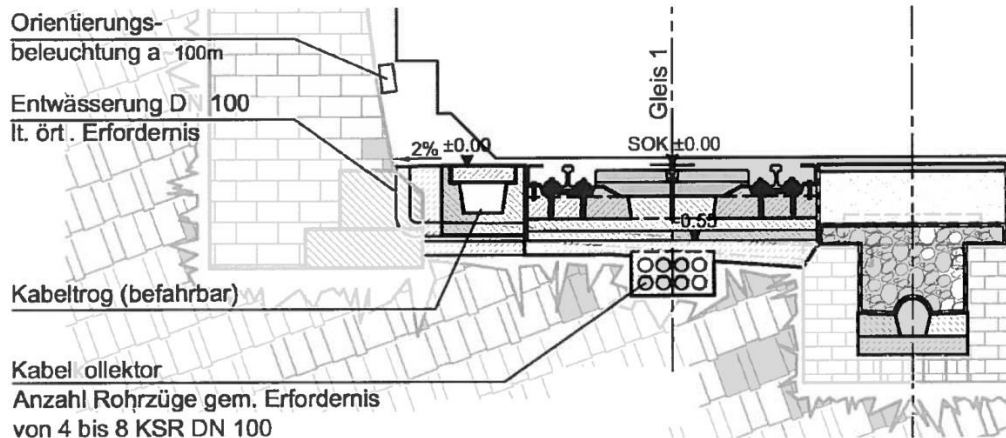


Abb. 33: Kabeltrog und Kabelkollektor laut Einreichprojekt (ÖBB, 2010)

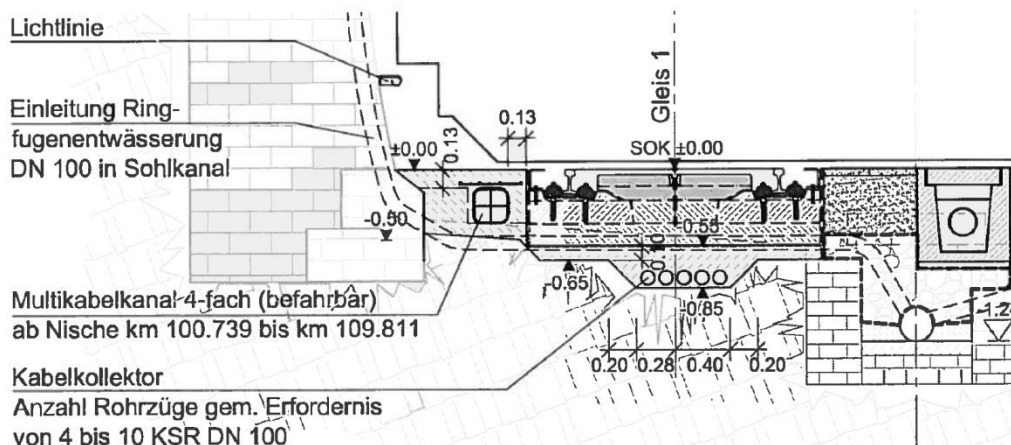


Abb. 34: Kabeltrog und Kabelkollektor im Ausführungsprojekt (ÖBB, 2010)

Aufgrund der im Tunnel herrschenden beengten Platzverhältnisse, der Reduzierung der Eingriffe in das bestehende Mauerwerk, den Brandschutzanforderungen und aus Gründen der Befahrbarkeit entschied man sich im Zuge der Bauausführung ebenfalls dafür, den Randweg und die Nischenböden bereichsweise sieben bis neun Zentimeter über SOK erhöht auszuführen (ÖBB, 2010).

8.5.5 Portal Langen am Arlberg

Aus Gründen der Kostenersparnis wurde beim Portalgebäude Langen am Arlberg auf eine Natursteinverkleidung verzichtet und stattdessen eine kostengünstigere Wärmedämmfassade errichtet (ÖBB, 2010).

8.5.6 Ölabscheideanlage St. Anton am Arlberg

Des Weiteren wurde im Zuge der Bauausführung erkannt, dass das Ostportal in St. Anton am Arlberg zur Anpassung an den Stand der Technik ebenfalls über einen Ölabscheider mit Auffangbecken (analog zur Ölabscheideanlage beim Westportal) verfügen muss und abfließende Wässer nicht mehr ungereinigt in den Vorfluter eingeleitet werden dürfen. Die Anlage wurde entsprechend der Anlage in Langen am Arlberg errichtet (ÖBB, 2010).

Kapitel 9

Versinterung von Tunnel drainagen

9.1 Grundlegendes

Versinterungen von Tunnel-Drainageleitungen sind ein häufiges Problem und führten in der Vergangenheit bei einer Vielzahl von Tunnelbauwerken zu Schäden an den Kanal- bzw. Entwässerungsanlagen (vgl. Abb. 35). Dementsprechend birgt die Versinterungsproblematik einen erheblichen Instandhaltungsaufwand und verursacht dem Tunnelbetreiber dadurch erhebliche Kosten.



Abb. 35: Versinterung einer Drainage-Rohrleitung (Dietzel et al., 2008b)

Wird auf eine laufende Reinigung und Instandhaltung verzichtet bis das Drainagesystem zur Gänze verlegt ist, so sind umfangreichere Sanierungsmaßnahmen die Folge und reichen bis zur Erneuerung von Sohlkanal und anderen Entwässerungseinrichtungen (vgl. Rinder et al., 2008; Dietzel et al., 2008a; Dietzel et al., 2008b). Eine stetige Reinigung ist deshalb

unerlässlich um die Funktionstüchtigkeit der Entwässerung erhalten zu können. Durch Einhaltung von bestimmten Vorschriften und Gestaltungsrichtlinien kann jedoch die Entstehung von Versinterungen minimiert und damit die Lebensdauer des Entwässerungssystems deutlich gesteigert werden (Gamisch & Girmscheid, 2007).

9.2 Art und Herkunft der Ablagerungen

Bei den Ablagerungen in den Leitungssystemen selbst handelt es sich zumeist um Kalk bzw. Kalziumkarbonat ($\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$). Das Kalziumkarbonat stammt dabei im Allgemeinen aus zwei Quellen (vgl. Dietzel et al., 2008a):

- Ausscheidung aus kalziumreichen Bergwässern
- Auflösung des im Beton vorhandenen Portlandits (Kalziumhydroxid, CaOH_2) durch Bergwässer

Vor allem Spritzbeton ist für die Auslösung von Portlandit sehr anfällig, da sich dieser in seiner Funktion als Erstsicherung in direktem Kontakt mit dem Gebirge und damit dem Gebirgswasser steht. Auch die heutzutage im Tunnelbau verwendeten Baustoffe weisen nach wie vor ein erhebliches Kalziumpotential auf. Das Kalzium wird durch Bergwässer aus den Baustoffen gelöst und es entsteht bei Vorhandensein von CO_2 Kalk, der in die Tunnel drainagen transportiert wird, anschließend dort aufgrund der vorherrschenden atmosphärischen Gegebenheiten ausfällt und durch Bildung von harten bis sehr harten Ablagerungen zur Versinterung der Drainageleitungen führt (Girmscheid et al., 2003a). Das Karbonat der Kalksinter stammt dabei entweder aus dem Bergwasser oder wird durch die Absorption von atmosphärischem CO_2 in die Versinterungen eingebaut (vgl. Kap. 9.3; Dietzel et al., 2008a; Rinder et al., 2008). Abb. 36 zeigt typische Reaktionszonen zur Entstehung von Versinterungen entlang der Fließrichtung von Berg- und Drainagewässern.

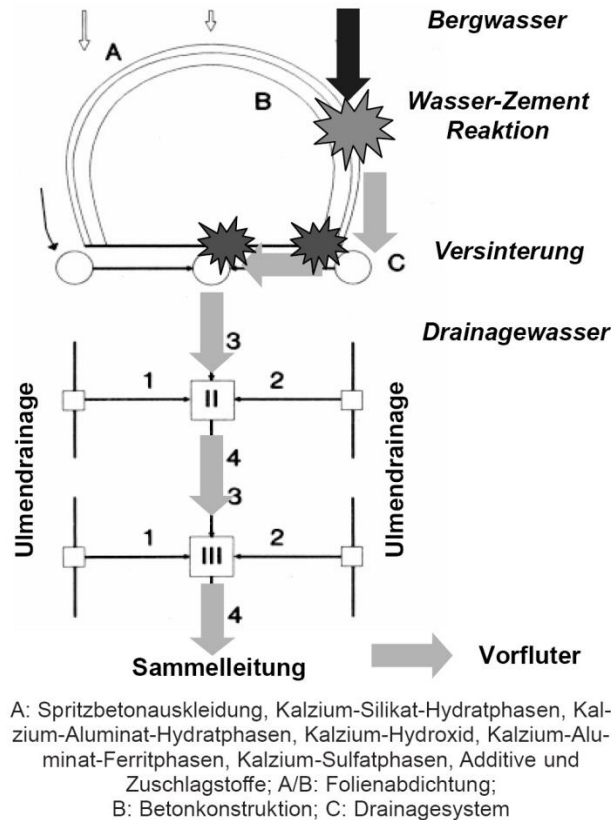


Abb. 36: Entstehung von Versinterungen im Drainagesystem (Dietzel et al., 2008a)

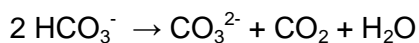
Aus Abb. 36 ist ersichtlich, dass Bergwasser zunächst in Kontakt mit der Spritzbetonauskleidung kommt. Hier kommt es zu unterschiedlichen Wasser-Zement-Reaktionen (vgl. Kap. 9.3), bei welchen u.a. Kalzium gelöst wird. Das Wasser gelangt anschließend entlang der Betonkonstruktion zum eigentlichen Drainagesystem im Widerlagerbereich und anschließend über eine Sammelleitung in der Tunnelsohle zum Vorfluter.

Grundsätzlich kann zwischen deszendente und aszendente Wässern unterschieden werden. Während es sich bei deszendente Wässern generell um absteigende Sickerwässer mit lösenden Eigenschaften, die bestimmte Stoffe lösen, transportieren und wieder absetzen, handelt, bezeichnen aszendente Wässer aufsteigende bzw. umlaufende mineralstoffreiche Wässer, die bereits von vornherein eine hohe Konzentration an verschiedenen Elementen, wie Kalzium oder Kalium, aufweisen (vgl. geodz.com; Murawski & Meyer, 2010). Im alpinen Raum sind es v.a. letztere, die für die Ausbildung von Ablagerungen in Entwässerungsleitungen verantwortlich sind. Deszendente Wässer lösen in Abhängigkeit ihres Kohlensäuregehalts bzw. des pH-Wertes Kalk aus kalkhaltigen Gesteinen oder Kalkstein, während aszendente Wässer zumeist bereits a priori viel Kalk in gelöster Form beinhalten. Führen Umgebungsbedingungen (z.B. Änderung der Temperatur, des Luftdrucks

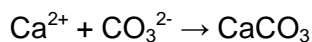
oder des pH-Werts) zu einer Erniedrigung der Löslichkeit, kommt es zur Ausfällung der gelösten Stoffe in Form makroskopischer Salzkristalle (vgl. Girmscheid et al., 2003a).

9.3 Versinterungsentstehung

Auf Grund hoher Kohlendioxid-Gehalte v.a. in Böden, aber auch im Fels, weisen Gebirgswässer in der Regel eine hohe Kohlensäure-Konzentration und damit – wie bereits in Kap. 9.2 beschrieben – eine hohe Löslichkeit auf. Treten diese Wässer im Tunnel oder der Drainage aus, wo atmosphärische Bedingungen mit einem geringeren Kohlendioxid-Partialdruck vorherrschen, so kann die ursprüngliche Menge an Kohlensäure nicht mehr gehalten werden und wird an die Drainageluft abgegeben. Damit sich wiederum ein Kohlendioxid-Dissoziationsgleichgewicht (vgl. Riedel & Janiak, 2011) einstellen kann, dissoziiert das Hydrogencarbonat (HCO_3^-) zu Kohlendioxid, Karbonat-Ionen und Wasser (Girmscheid et al., 2003):



Steht eine ausreichende Anzahl an Kationen (zumeist Kalziumionen, Ca^{2+}) zur Verfügung (z.B. ausgelöst aus dem Spritzbeton), verbinden sich diese mit den Karbonat-Ionen und es kommt zum Ausfällen von Kalzitkristallen bzw. Kalk (CaCO_3):



Die Reaktionsgeschwindigkeit ist dabei nach Girmscheid et al. (2003a) hauptsächlich von folgenden Parametern abhängig:

- Größe der Kontaktfläche zwischen Gasphase und Lösungsmittel (Wasser)
- Temperatur im Tunnel bzw. Drainagesystem (die Löslichkeit sinkt mit steigender Temperatur)
- Fließgeschwindigkeit in den Drainagesystemen (langsame Fließgeschwindigkeiten erhöhen das Versinterungspotential)
- Abflussart des Wassers in der Drainage (turbulentes Fließen sorgt für eine starke Durchmischung des Wassers mit Luft, was zu einer schnelleren Abnahme des Kohlendioxidgehaltes führt)

9.4 Vermeidung von Versinterungen

Die Ursache von Versinterungen liegt zumeist in baulichen Mängeln begründet, deren Korrektur oftmals mit teuren Instandsetzungs- und Rekonstruktionsmaßnahmen einhergeht. Daneben tragen die vorliegende Gesteinsart und der vorherrschende Wasserchemismus zum Grad der Versinterung bei. Aus baulicher Sicht spielen die Verwendung ungünstiger Baustoffe (z.B. bestimmte Zementarten und Beschleunigern im Spritzbeton, wodurch ein hohes Lösungspotential von Kalzium-Ionen generiert wird) oder ungünstiger Systeme eine tragende Rolle (Girmscheid et al., 2003a).

Girmscheid et al. (2003b) definiert folgende Gestaltungsgrundsätze zur Verringerung von Versinterungsablagerungen:

- Verwendung von eluationsarmen Spritzbetonen, Injektions- und Anker Mörteln. Die Größenordnung der Eluation ist dabei eine Funktion von Bindemittel- und Porengehalt bzw. der Permeabilität. Es wird empfohlen, Beton mit geringerem Zementgehalt und eluationsarmen Betonrezepturen (u.a. Verwendung von Rundkorn, Verzicht auf Beschleuniger) zu verwenden.
- Minimierung des Kontakts zwischen Bergwässern und Baustoff durch spezielle Abdichtungen
- Drainagerohre sollen möglichst glatt und derart ausgeführt werden, dass eine übermäßige Durchmischung von Drainagewasser und der Luft verhindert wird. Ein Zugang zu den Rohrsträngen zur Durchführung von hydromechanischen und mechanischen Reinigungsarbeiten muss gewährleistet werden. Insgesamt soll das Wasser schnell und gezielt aus dem Tunnel abgeleitet werden. Bauliche Lösungsvorschläge hinsichtlich des Rohrsystems umfassen die Herstellung von Staubecken (Kalzitablagerungen entstehen hier flächig verteilt und entlasten das Rohrsystem), die Installation von Siphonierungen (Vermeidung von Luftkontakt) sowie das Errichten von druckhaltenden Systemen.
- Weiters wird eine getrennte Ableitung unterschiedlicher Wässer empfohlen, da es bei Durchmischung unterschiedlicher Wässer zu plötzlichen Ausfällungen kommen kann.

Durch Einbau von Härtestabilisations-Deposteinen im Bereich der Spritzbetonschale, welche kontinuierlich Polyacrylate zur Härtestabilisation freisetzen, konnten bisher die gewünschten Erfolge nicht erreicht werden (Girmscheid et al., 2003b). Neue Lösungsansätze versuchen durch das kontinuierliche Eintropfen von Salzsäure (vgl. Stur, 2011) die entstandenen Versinterungen wieder zu lösen und die Entstehung neuer Versinterungen zu verhindern.

Kapitel 10

Zusammenfassung und Ausblick

Beim Gegenstand der Tunnelsanierung handelt es sich nach wie vor um eine sehr aktuelle Thematik. Alleine in Österreich sind in den nächsten zehn bis fünfzehn Jahren ca. 90 Tunnelbauwerke (STUVA, 2011) von einem umfangreicheren Sanierungs- oder Erneuerungsbedarf betroffen. Die Ursachen hierfür liegen zumeist im alterungsbedingten Zustand der gemauerten Gewölbe oder in einem unzureichenden, nach neuen Normen und Richtlinien nicht mehr zulässigen Lichtraumprofil. Auch aus Gründen des Brandschutzes und anderen sicherheitstechnischen Fragestellungen werden in Zukunft noch zahlreiche Tunnel an die aktuellen Sicherheitsbestimmungen adaptiert werden müssen. Die rechtlichen Vorschriften und technischen Rahmenbedingungen werden dabei immer stärker von zentraler Stelle, wie z.B. der Europäische Union, vorgegeben, was zu einer Vereinheitlichung der Sicherheitsstandards in Europa führt.

Es zeigt sich, dass eine genaue und durchdachte Planung der Sanierungsarbeiten eine entscheidende Rolle für eine – aus finanzieller und zeitlicher Sicht – erfolgreiche Durchführung einer Tunnelsanierung spielt. Dieser Umstand wird v.a. durch die im Tunnel herrschenden begrenzten Platzverhältnisse und die betrieblichen Einschränkungen bestimmt. Sanierungsmaßnahmen finden oftmals unter Beibehaltung eines eingeschränkten Zugbetriebs statt, wobei bei zweigleisigen Tunneln in der Regel ein Gleis für den Betrieb aufrecht erhalten wird und die Sanierungsarbeiten wechselseitig erfolgen.

Zu einer erfolgreichen Planung zählt in erster Linie die Umsetzung von Erkundungsmaßnahmen, um die Gegebenheiten des Bestandes genauest möglich erfassen und die im Zuge der Sanierung angewendeten Methoden und Systeme anschließend darauf abstimmen zu können. Denn jedes Tunnelbauwerk ist auf Grund seiner unterschiedlichen Rahmenbedingungen sehr individuell und es fließen Gebirgsparameter, bestehender Ausbau,

betriebliche Gegebenheiten, etc. als Einflussfaktoren in die Planung ein. Für eine effiziente Sanierung ist man daher auf das Know-how und die Erfahrung von spezialisierten Unternehmen angewiesen. Zahlreiche Beispiele aus der Vergangenheit zeigen, dass eine unzureichende Erkundung – wie dies im übrigen bei allen Tiefbaudisziplinen der Fall ist – auch bei der Sanierung von Eisenbahntunnel zu deutlichen Mehrkosten und Bauzeitverlängerungen führt.

Was die Durchführung der Maßnahmen betrifft, so schreitet der maschinentechnische Fortschritt stetig voran. Ein Großteil der Sanierungsarbeiten wird heutzutage mit spezialisierten Bauzügen mit hohem Automatisierungsgrad durchgeführt, was einen raschen Baufortschritt und ein hohes Maß an Arbeitssicherheit mit sich bringt.

Ähnlich wie beim Tunnelbau wird auch bei der Tunnelsanierung, sofern es um die Erneuerung der Innenschale geht, in immer stärkerem Maße auf Betonfertigteilelemente gesetzt. Hierbei werden vorgefertigte Tübbingelemente im Tunnel versetzt und hinterfüllt. Diese Vorgangsweise garantiert einen raschen Baufortschritt, der hohe Mechanisierungsgrad spart Arbeitskräfte und damit langfristig Kosten ein.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Kinematische Begrenzungslinie G1 nach DIN EN 15273-3	11
Abb. 2: Aktuelle Lichtraumprofile der ÖBB	12
Abb. 3: ÖBB-Regelquerschnitt für einen zweigleisigen Tunnel mit Fester Fahrbahn	13
Abb. 4: Einbau einer Stahlbetonrippe in bestehendes Mauerwerk	15
Abb. 5: Eisenbahnrisiken in Tunnel und Maßnahmen	23
Abb. 6: Grundprinzipien zur Erhöhung der Tunnelsicherheit	24
Abb. 7: Vorgangsweise zur Selbstrettung	25
Abb. 8: Temperatur-Zeit-Kurve für Eisenbahntunnel	36
Abb. 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Normalbeton mit quarzhalt. Zuschlägen	39
Abb. 10: Wechselseitige Sohlernerneuerung am Beispiel Hauenstein Basistunnel	44
Abb. 11: Schienenschleifmaschine	49
Abb. 12: Links: Schotterpflug; rechts: Stopfmaschine	50
Abb. 13: Planumsverbesserungsmaschine. Links: Erstellen eines neuen Unterbauplanums; rechts: Einbringen eines neuen Schotterbetts	51
Abb. 14: Materialförder- und Silowagen	51
Abb. 15: Links: Gleismesszug	52
Abb. 16: Bauzug mit Zwei-Wege-Bagger, MFS-Einheit und Stopfmaschine	53
Abb. 17: Zwei-Wege-Bagger beim Beladen der Ladeschurre und anschließender MFS- Einheit	53
Abb. 18: Abtrag der Sohle mit Meißel am Beispiel Arlbergbahntunnel	54
Abb. 19: Verlegung Feste-Fahrbahn-System ÖBB/PORR	56
Abb. 20: Links: Fräsmaschine mit Fräswalze bei Vollsperrung; rechts: Fräswalze	58
Abb. 21: Tunnelvortriebsportal beim Langenauer und Holtricher Tunnel	59

<i>Abb. 22: Trassenverlauf Arlbergstraßen- und eisenbahntunnel mit Rettungsstollen</i>	<i>65</i>
<i>Abb. 23: Links: Tunnelschale mit geologischem Untergrund; rechts: Felstunnelsohle im Arlberg-Eisenbahntunnel</i>	<i>68</i>
<i>Abb. 24: Gewölbemauerung des Arlbergbahntunnels im Bestand</i>	<i>70</i>
<i>Abb. 25: Links: Hochdruckwasserstrahlen mit Roboter; rechts: Gleisabtrag mittels gleisgebundenem Spezialkran</i>	<i>71</i>
<i>Abb. 26: Links: Bauarbeiten unter Beibehaltung eines eingleisigen Betriebs; rechts: Bauzug mit Betonmischer zum Einbringen von Sohlbeton</i>	<i>72</i>
<i>Abb. 27: Fluchtwege- und Rettungssystem im neuen Arlberg-Eisenbahntunnel</i>	<i>73</i>
<i>Abb. 28: Einleitung der Ringfugenwässer in den verrohrten Sohlkanal.....</i>	<i>76</i>
<i>Abb. 29: Ausführung des Sohlkanals laut Planung</i>	<i>76</i>
<i>Abb. 30: Tatsächliche Ausführung des Sohlkanals</i>	<i>77</i>
<i>Abb. 31: Entwässerung Feste Fahrbahn laut Planung.....</i>	<i>77</i>
<i>Abb. 32: Entwässerung Feste Fahrbahn in der Ausführung</i>	<i>78</i>
<i>Abb. 33: Kabeltrog und Kabelkollektor laut Einreichprojekt</i>	<i>79</i>
<i>Abb. 34: Kabeltrog und Kabelkollektor im Ausführungsprojekt.....</i>	<i>79</i>
<i>Abb. 35: Versinterung einer Drainage-Rohrleitung</i>	<i>81</i>
<i>Abb. 36: Entstehung von Versinterungen im Drainagesystem.....</i>	<i>83</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 1: Mindestanforderung an die Tragsicherheit der Konstruktion</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2: Maßnahmen bei Gewölbearbeiten in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 3: Maßnahmen bei Sohlarbeiten in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 4: Gegenüberstellung von ausgeschriebenen und tatsächlichen Massen</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 5: Daten zur Sanierung des Arlbergbahntunnels</i>	<i>67</i>

Literaturverzeichnis

Adam D. (2011): Fels- und Tunnelbau. LVA 220.000. Vorlesung am Institut für Geotechnik, Technischen Universität Wien im WS 2011.

Bergmeister K. (2013): Lebensdauer von Bauwerken. Festschrift Konrad Bergmeister. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Bmvit (2004): AUSTRIAN NOTIFICATION according Articles 10/5 and 16/3 of directives 96/48/EC and 2001/16/EC and according article 6/1 of directive 96/48/EC (decisions from 30 May 2002). Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

Bmvit (2009): Interoperabilität. Informationsbroschüre zur Interoperabilität in der Europäischen Union. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

Brauns R., Chudoba K.F. (1979): Spezielle Mineralogie. Sammlung Göschen 2622. Verlag Walter de Gruyter & Co., Berlin.

Breidenstein M. (2007): Neues Tunnelbauverfahren zur Streckenmodernisierung unter laufendem Betrieb. Tunnel 2/2007. Bauverlag, Gütersloh.

Dietzel M. (2008): Drainagesysteme im Tunnelbau. Design, Versinterung und Instandhaltung; Beiträge zum Symposium „Drainagesysteme im Tunnelbau“. Technische Universität Graz.

Dietzel M., Rinder T., Niedermayr A., Mittermayr F., Leis A., Klammer D., Köhler S., Reichl P. (2008a): Ursachen und Mechanismen der Versinterung von Tunnelndrainagen. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Heft 10/2008.

Dietzel M., Rinder T., Leis A., Reichl P., Sellner P., Draschitz C., Plank G., Klammer D., Schöfer H. (2008b): Koralm Tunnel as a Case Study for Sinter Formation in Drainage Systems - Precipitation Mechanisms and Retaliatory Action. Geomechanik und Tunnelbau 1 (2008), Heft 4. Verlag Ernst und Sohn, Berlin.

Eisenbahn-Bundesamt, 2008: Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln. Eisenbahnbundesamt, Bonn.

Eisenmann J., Leykauf G. (2000): *Feste Fahrbahn für Schienenbahnen. Betonkalender 2000, Band 2.* Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

FCP (2009): *Arlbergeisenbahntunnel – Sicherheitstechnische Maßnahmen. Informationsbroschüre.* Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, Wien.

Gamisch T., Girmscheid G. (2007): *Versinterungsprobleme in Bauwerksentwässerungen.* Beuth Verlag, Berlin.

Girmscheid G., Gamisch T., Klein T., Meinschmidt A. (2003a): *Versinterung von Tunnel drainagen – Mechanismen der Versinterungsentstehung. Bauingenieur, Band 78.* Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf.

Girmscheid G., Gamisch T., Meinschmidt A. (2003b): *Versinterung von Tunnel drainagen - Empfehlungen für die Planung und Bauausführung von Tunneln in deszendenden Wässern. Bauingenieur, Band 78.* Springer Verlag, Berlin.

Girmscheid G. (2008): *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. 2.Auflage.* Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Grübl P., Weigler H., Karl S. (2001): *Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften. 2. Auflage.* Berlin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH.

Gruppe Geotechnik Graz 3G (2008): *Arlbergtunnel – Projektbeschreibung.* 3G Gruppe Geotechnik Graz.

Heinisch R., Kracke R., Lehmann E. (1997): *Feste Fahrbahn.* Hestra Verlag, Darmstadt.

Hosser D., Richter E., Schnetgöke R. (2008): *Baulicher Brandschutz für Tunnel in der ZTV-ING. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig.*

Jodl H.G. (2011): *Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau – Tunneling Construction Methods. LVA 234.074. Lehrveranstaltung an der Technischen Universität Wien. Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Wien.*

Jodl H.G. (2011): *Einrichtung und Betrieb von Baustellen. LVA 234.082. Lehrveranstaltung an der Technischen Universität Wien. Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Wien.*

Kanitz A. (2008): *Analyse und Vergleich möglicher Brandbekämpfungskonzepte stationärer Löschanlagen in Tunnelanlagen.* GRIN Verlag, Magdeburg.

- Kohlböck B., Moser H. (2010): *Investigation and planning für the refurbishment of the original Tauern Tunnel. Geomechanics and Tunneling 3/2010. Ernst und Sohn Verlag, Berlin.*
- Kusterle W., Lindlbauer W., Hampejs G., et al. (2004): *Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton. Republik Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie(Hrsg.), Straßenforschung, Heft 544. Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, Wien.*
- Lemmerer J., Kusterle W. (2007): *Baulicher Brandschutz in Eisenbahntunnels. Internationales Symposium Brenner Basis Tunnel und Zulaufstrecken, Innsbruck.*
- Mägerle R. (2000): *Branddetektion und Löschung von Tunnelbränden im Test. S+S-Report, VdS Fachmagazin, Heft 2/2000, Köln.*
- Marx L., Bugenhagen D., Moßmann D. (2001): *Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus. Eisenbahn-Fachverlag, Heidelberg.*
- Müller L., Pacher F. (1965): *Modellversuche zur Klärung der Bruchgefahr geklüfteter Medien. Felsmech. Ing.-Geol. Suppl. II, Wien.*
- Murawski H., Meyer W. (2010): *Geologisches Wörterbuch. 12. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.*
- Neumann C., Wehr H. (2003): *Upgrading of safety measures in the Arlberg Railway Tunnel: Construction of escape routes with cross-passages to the Arlberg Road Tunnel. Safety in Road and Rail Tunnels, Seite 81-90.*
- Neumann C., Sommerlechner C. (2009): *Notfallkonzepte für österreichische Eisenbahntunnel. Bahn-Brandschutz, IV. Internationales Fachsymposium, ifv Bahntechnik, Berlin.*
- Neumann C.: (2010): *Sicherheitstechnische Nachrüstung des Arlberg-Eisenbahntunnels Konzepte, Maßnahmen und Erfahrungen. Bahn-Brandschutz, V. Internationales Fachsymposium, ifv Bahntechnik, Wien.*
- Neumann C., Föbleitner B. (2010): *Safety management for Austrian railway tunnel. Tunnel Safety and Ventilation, 5th International Conference, Graz.*
- Neroth G., Vollenschaar D. (2011): *Wendehorst Baustoffkunde. Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz. 27. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.*

ÖBB (2002a): *Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen. Hochleistungsstrecken. Anlage 3: Tunnel- und Wannenschnitte. Ehemalige Eisenbahn-Hochleistungsstrecken AG (HL-AG); ÖBB-Infrastruktur AG, Wien.*

ÖBB (2002b): *Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen. Hochleistungsstrecken. Anlage 4: Baulicher Brandschutz in unterirdischen Verkehrsbauten von Eisenbahn-Hochleistungsstrecken. Ehemalige Eisenbahn-Hochleistungsstrecken AG (HL-AG); ÖBB-Infrastruktur AG, Wien.*

ÖBB (2004a): *Oberbau – Technische Grundsätze. B 50 – Teil 2: Linienführung von Gleisen. ÖBB-Infrastruktur AG, Wien.*

ÖBB (2004b): *Sicherheitstechnische Nachrüstung Arlberg Tunnel km 99.500 - km 110.474. Ausschreibung – Phase 2. ÖBB Infrastruktur Bau AG, Wien.*

ÖBB (2008): *Flucht- und Rettungswege (FRW) im Arlberg Eisenbahntunnel. Fahrgastinformation. ÖBB Infrastruktur Bau AG, Wien.*

ÖBB (2009a): *Dienstbehelf IS 2, Instandhaltungsplan. Teil 2: konstruktiver Ingenieurbau. ÖBB-Infrastruktur AG, Wien.*

ÖBB (2009b): *Umbau Arlberg Eisenbahntunnel. Projektbroschüre Umbau Arlberg Eisenbahntunnel. ÖBB Infrastruktur Bau AG, Wien.*

ÖBB (2010): *Sicherheitstechnische Nachrüstung Arlberg Tunnel. Dokumentation der Änderungen gegenüber dem genehmigten Bauentwurf. Vorabzug 01.10.2010. ÖBB Infrastruktur Bau AG, Wien.*

ÖBFV & ÖBB (idgF): *Handbuch „Feuerwehreinsatz im Gleisbereich“. Österreichischer Bundesfeuerwehrverband und Österreichische Bundesbahnen ÖBB, Wien.*

ÖGG Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (2008): *Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb. 2. Überarbeitete Auflage. ÖGG, Salzburg.*

Österreichischer Bundesfeuerwehrverband (2000): *Richtlinie „Bau und Betrieb von neuen Eisenbahntunneln bei Haupt- und Nebenbahnen. Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes“. Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, Wien.*

Patentschrift 10 2007 014 104 (2007): *Verfahren zum Aufweiten eines Tunnels und Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens. Erfinder für die DB ProjektBau GmbH: Matthias Breidenstein.*

Prinz H., Strauss R. (2012): *Ingenieurgeologie*. 5. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Porr (2009): *Feste Fahrbahn. System ÖBB-Porr – elastisch gelagerte Gleistragplatte*. Porr Technobau und Umwelt AG, Wien.

Pucher K. (2000): *Die Belüftung eines Tunnels im Brandfall*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Heft 500, Wien.

Riedel E., Janiak (2011): *Anorganische Chemie*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin.

Rinder T., Niedermayr A., Mittermayr F., Klammer D., Dietzel M. (2008): *Sinter Formation in Drainage Systems*. Institute of Applied Geosciences, TU Graz.

Rubin (2007): *TUNCONSTRUCT – das größte Tunnelbau-Projekt, das es je gab*. Rubin Wissenschaftsmagazin, Ruhr-Universität Bochum.

Schlüter A. (2004): *Baulicher Brandschutz für Tunnelbauwerke: Richtlinien, Vorgaben, die Realität und geeignete Maßnahmen*. Tunnel 7/2004. Bauverlag, Gütersloh.

Schlüter A. (2005): *Silikat-Brandschutzbekleidung für Tunnel*. Tunnel 8/2005. Bauverlag, Gütersloh.

Schneider U., Horvath J. (2006): *Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten. Brandverhalten, Schutzmaßnahmen, Sanierung*. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin.

Schwab A. (2006): *Elektroenergiesysteme - Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. Springer Verlag, Heidelberg.

Schwab P., Neumayer J. (2010): *Tunnelsanierung – eine Arbeit mit Überraschungen*. Geomechanics and Tunneling 3, Nr. 6. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Simon S. (2008): *Erneuerung alter Eisenbahntunnel am Beispiel des Ennericher Tunnels/D*. Tunnel 3/2008. Bauverlag, Gütersloh.

Simon S. (2012): *Sachstandsbericht zur Sanierung von Eisenbahntunneln*. Tunnel 4/2012. Bauverlag, Gütersloh.

Steiner M, Strommer W. (2009): *Helle Innenschale ohne Beschichtung*. Zement + Beton Nr. 5/09. VÖZ Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Wien.

Stur M. (2011): *Versinterungsproblematik in Tunnel drainagen*. Diplomarbeit am Institut für angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur Wien.

STUVA (2011): Sanierung von Eisenbahntunneln – Sachstandsbericht 2011. Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen STUVA, STUVA-Arbeitskreis „Tunnelsanierung“, Köln.

Tamparopoulos A. (2013): Cost estimation of large construction projects with dependent risks. Dissertation an der Universität für Bodenkultur Wien.

Tipler P., Mosca G. (2004): Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure. 2. Auflage. Verlag Elsevier, München.

TSI (2008): Technische Spezifikationen für die Interoperabilität bezüglich „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystem und im transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystem. Entscheidung der Kommission 2008/163/EG, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L 64/1 vom 07.03.2008.

Voit K. (2013): Einsatz und Optimierung von Tunnelausbruchmaterial des Brenner Basistunnels. Dissertation am Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur Wien.

Zierl D. (2012): Eisenbahnwesen und Bahnbau. LVA 856.309. Lehrveranstaltung an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Verkehrswesen, Wien.

Richtlinien und Normen

DIN EN 15273-3 (2012-07): Bahnanwendungen - Begrenzungslinien - Teil 3: Lichtraumprofile. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin.

ISO 834-1 (1999-09): Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements. International Organization for Standardization, Geneva.

ÖBV (2008-07): Richtlinie „Faserbeton“. Österreichische Bautechnik Vereinigung ÖBV, Wien.

ÖBV (2013-08): Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“. Österreichische Bautechnik Vereinigung ÖBV, Wien.

ÖNORM EN 206-1 (2005-11): Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Österreichisches Normungsinstitut (ON), Wien.

ÖNORM EN 1996-1-2 (2006-01): Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten. Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM EN 15273-3 (2013-06): Bahnanwendungen - Begrenzungslinien - Teil 3: Lichtraumprofile. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

RVS 09.01.43 (2004-05): Innenschalenbeton. Forschungsgesellschaft Straße - Schiene – Verkehr, Wien.

RVS 09.01.45 (2006-09): Baulicher Brandschutz in Straßenverkehrsbauten. Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien.

ZSB 24 (idgF): Zusatzbestimmungen zur Signal- und Betriebsvorschrift: Dienstvorschrift Selbstrettung. Österreichische Bundesbahnen ÖBB, Wien.

ZSB 26 (idgF): Zusatzbestimmungen zur Signal- und Betriebsvorschrift: Handbuch Notfallmanagement. Österreichische Bundesbahnen ÖBB, Wien.

Internetquellen:

Asfinag.at: Seite „Generalsanierung Arlbergtunnel“. Asfinag Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft, Wien. Bearbeitungsstand: März 2013.
URL: <http://www.asfinag.at/documents/10180/15111/S+16+Generalsanierung+und+Fluchtwege+Arlbergtunnel+vertiefte+Proejktinformation+M%C3%A4rz+2013/9d01dd3d-27c1-4087-8209-aae152b9b6d8> (Abgerufen: 21.06.2013, 11:15 UTC)

bbw.at: Seite „Gleiserhaltung“. URL: http://www.bbw.at/html/produkte_gleiserhaltung.html (Abgerufen: 20. August 2013, 13:13 UTC)

eisenbahntunnel.at: Seite „Gumpoldskirchner Tunnel“. URL: <http://www.eisenbahntunnel.at/inhalt/tunnelportale/10501-gumpoldskirchen.html> (Abgerufen: 21. Juni 2013, 10:14 UTC)

europa.eu: Seite „Europäisches Hochgeschwindigkeitsbahnnetz“. Europa-Portal der EU.
URL: http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/technical_harmonisation/l24095_de.htm. (Abgerufen: 6.8.2013, 08:14 UTC)

ifb.tugraz.at: Seite „TUNCONSTRUCT Project Evaluation“. Technische Universität Graz.
Bearbeitungsstand: August 2013. URL: <http://www.ifb.tugraz.at/tunconstruct/overview.htm> (Abgerufen: 5.8.2013, 11:10 UTC)

oebb.at: Seite „Nachrüstung Arlbergtunnel“. ÖBB-Infrastruktur AG, Wien. Bearbeitungsstand: Juni 2012. URL: http://www.oebb.at/infrastruktur/de/5_0_fuer_Generationen/5_4_Wir_bauen_fuer_Generationen/5_4_5_Schieneninfrastruktur_abgeschlossene_Projekte/Arlbergachse/Nachruestung_Arlbergtunnel/index.jsp (Abgerufen: 21.06.2013, 10:45 UTC)

rhomberg rail.com: Seite „Maschinen“. URL: http://www.rhomberg rail.com/de/home/allgemeine_informationen/leistungen/maschinen.html (Abgerufen: 20.8.2013, 14:23 UTC)

stuva.de: Seite „Kurzprofil“. STUVA, Köln. Bearbeitungsstand: August 2013. URL: <http://www.stuva.de/ueber-stuva.html> (Abgerufen: 5.8.2013, 09:13 UTC)

vanoli-ag.ch: Seite „Vanoliner“. URL: http://www.vanoli-ag.ch/grosssmaschinen.php?DOC_INST=1. (Abgerufen: 20.8.2013, 20:11 UTC)

vbgv1.orf.at: Seite „Umbau Arlbergtunnel“. URL: <http://vbgv1.orf.at/stories/216992> (Abgerufen: 22.8.2013, 12:46 UTC)

vorarlbergernachrichten.at: Seite „Tunnelsperre Arlbergtunnel. URL: <http://www.vorarlbergernachrichten.at/markt/2013/02/22/tunnelsperre-lassst-frachter-nicht-kalt.vn> (Abgerufen: 05.09.2013, 14:46 UTC)

Wikipedia: Seite „Brandschutz“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 15. Juli 2013, 09:28 UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Brandschutz&oldid=120561013> (Abgerufen: 5. August 2013, 13:11 UTC)

Wikipedia: Seite „Feste Fahrbahn“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 12. Mai 2013, 23:17 UTC. URL: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Feste_Fahrbahn&oldid=118449182 (Abgerufen: 20. August 2013, 14:36 UTC)

Wikipedia: Seite „Österreichische Bundesbahnen“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 24. Juli 2013, 19:00 UTC. URL: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%96sterreichische_Bundesbahnen&oldid=120857585 (Abgerufen: 16. August 2013, 15:05 UTC)

Wikipedia: Seite „Gleisbaumaschine“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 25. Juli 2013, 19:00 UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Gleisbaumaschine&oldid=120895196> (Abgerufen: 20. August 2013, 11:01 UTC)

Wikipedia: Seite „Stahlbau“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 17. Mai 2013, 21:58 UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Stahlbau&oldid=118610011> (Abgerufen: 19. August 2013, 07:35 UTC)

ziegel.at: Seite „Brandschutz“. URL: <http://www.ziegel.at/de/brandschutz> (Abgerufen: 19. August 2013, 11:44 UTC)

Curriculum Vitae

Persönliche Angaben	<p>Vor-, Familienname: Klaus Voit</p> <p>Hauptwohnsitz: Pergerstraße 9/1/7 2500 Baden bei Wien</p> <p>Nebenwohnsitz: Losergasse 11 6900 Bregenz</p> <p>Telefonnummer: 0043 (0)650 7017013</p> <p>e-mail: klaus.voit@boku.ac.at; klaus.voit@gmx.at</p> <p>Geburtstag, -ort: 12.2.1982, Bregenz</p> <p>Staatsbürgerschaft: Österreich</p> <p>Führerscheinklassen: A, B</p> <p>Eltern:</p> <p>Walter Voit Pensionist ehemaliger Feinmechanikermeister Firma Nutzfahrzeuge Haubner, Lustenau</p> <p>Irmgard Voit, geb. Kreinz Pensionistin ehemalige Friseurin, Hausfrau</p> <p>Geschwister:</p> <p>Eva Voit Geboren am 1.3.1984; studierte Publizistik- und Kommunikationswissenschaften an der Universität Wien; Beruf: Marketingleitung Einkaufszentrum Messepark Dornbirn</p>
Ausbildung	<p>1988 – 1992 Volksschule Riedenburg, Bregenz</p> <p>1992 – 2000 Gymnasium Blumenstraße, Bregenz</p> <p>Juni 2000 Mit Gutem Erfolg maturiert</p> <p>2001 Beginn des Studiums der Geographie (Universität Wien)</p> <p>2002 Beginn des Studiums der Erdwissenschaften, Studienfach Geologie (Universität Wien)</p> <p>2005 Beginn des Studiums Technische Geologie (Universität Wien, Technische Universität Wien)</p> <p>März 2008 Beendigung Studium Geologie (mit Auszeichnung bestanden); Mag.rer.nat. #1</p> <p>Diplomarbeit: „Structural and geomorphological investigations on Kea, Western Cyclades, Greece“ (Betreuer: o.Univ.Prof. Bernhard Grasemann)</p> <p>März 2008 Beendigung Studium Technische Geologie (mit Auszeichnung bestanden); Mag.rer.nat. #2</p> <p>Diplomarbeit: “Machbarkeit eines Druckstollens in der Molassezone Vorarlbergs – Kraftwerk Bregenz”</p>

		(Betreuer: o.Univ.Prof. Ewald Tentschert) in Zusammenarbeit mit der VKW-Illwerke AG
	Mai 2008	Beendigung Studium Geographie (mit Auszeichnung bestanden); Mag.rer.nat. #3
	August 2010	Beginn Doktoratsstudium an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für konstruktiven Ingenieurbau Dissertation: „Einsatz und Optimierung von Tunnelausbruchmaterial des Brenner Basistunnels“ (Betreuer: o.Univ.Prof. Konrad Bergmeister)
	Oktober 2011	Beginn Individuelles Bachelor- und Masterstudium an der Technischen Universität Wien
	März 2013	Beendigung Bachelorstudium an der Technischen Universität Wien (Bachelorarbeit: „Baugrund der Molassezone im Bereich nördliches Vorarlberg“); BA
	August 2013	Beendigung Doktoratsstudium an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für konstruktiven Ingenieurbau (mit Auszeichnung bestanden); Dr. nat. tech.
Praktika	18.07. – 14.08.05	Ferialpraktikum Land Vorarlberg, Abteilung VIIIb – Straßenbau, Vermessung
	10.07. – 15.07.06	Praktikum bei Dr. Walter Bauer, Landesgeologe Vorarlberg
	13.09. – 07.10.07	Ferialpraktikum Land Vorarlberg, Abteilung VIIIb – Straßenbau, Vermessung
	09.07. – 10.09.07 & 10.10. – 28.10.07	Arbeit im Rahmen der Diplomarbeit bei den Vorarlberger Illwerken (www.illwerkekvw.at)
	01.07. – 15.08.08	Ferialpraktikum bei Plankel Bohrungen, Wolfurt: Erdwärmebohrungen, Grundwassererschließung und geologische Bohrungen (www.plankel.at)
Berufserfahrung	Sep. – Dez. 2008	Schlumberger (www.slb.com): Ölserviceunternehmen; Ausbildung und Arbeit in USA (Houston, Denver)
	Feb. 2009 – Mai 2010	Ingenieurbüro BGG Consult ZT-GmbH (www.bgg.at), Zivilingenieurbüro, Wien; Untergrunderkundung, Mitarbeit bei Ausschreibungen und geotechnischen Gutachten
	Aug. 2010 – Aug. 2013	Universität für Bodenkultur Wien, Institut für konstruktiven Ingenieurbau: Universitätsassistent
Präsenzdienst	September 2000 – Mai 2001, Gefreiter	
Sprachkenntnisse	Deutsch, Englisch	