

Masterarbeit

zum Erwerb des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)
der Studienrichtung Mining and Tunnelling



ausgeführt am
Lehrstuhl für Subsurface Engineering
an der Montanuniversität Leoben,
in Zusammenarbeit mit der
ÖBB-Infrastruktur AG

von Simon Klausecker, BSc.
Bad Ischl

Leoben, im Mai 2017



Thema

**Historische Einflüsse auf das
Systemverhalten bei der
Instandsetzung von
Mauerwerkstunnel**



Eidesstattliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angeführten Quellen verwendet und die wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Leoben, im Mai 2017



Simon Klausecker

Danksagung

Bedanken möchte ich mich zu allererst bei meiner Familie und ganz besonders bei meinen Eltern. Sie haben mich zu einer Ausbildung ermutigt, welche nicht nur hervorragende Chancen am Arbeitsmarkt sichert, sondern mir auch viel Freude bereitet. Ihre finanzielle und persönliche Unterstützung ermöglichte mir den Weg bis zu dieser Masterarbeit.

Außerdem möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler für die hervorragende Ausbildung im Rahmen des Studiums und auch für die Betreuung und die Begutachtung meiner Masterarbeit bedanken. Seine vielen hilfreichen Anregungen trugen wesentlich zur Vollendung der Arbeit bei.

Seitens des Kooperationspartners möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Roman Heissenberger, Dipl.-Ing. Rudolf Scheutz und allen anderen Kollegen für ihre nützlichen Inputs und die Zusammenarbeit bedanken.

Ein ganz besonderes Dankeschön möchte ich an meinem direkten Betreuer Dipl.-Ing. Robert Matt richten. Du hast mich bei der Erstellung dieser Arbeit in vielerlei Hinsicht unterstützt. Durch dein enormes Wissen und deine Erfahrung konnte ich in den vielen konstruktiven Gesprächen mit dir sehr viel lernen. Danke auch für die unzähligen Stunden welche du in die gemeinsame fachliche Erarbeitung des Themas und in das Korrekturlesen investiert hast. Außerdem hast du mir durch deine persönliche Unterstützung immer wieder Motivation gegeben weiter an diesem sehr komplexen Thema zu arbeiten.

Kurzfassung

Die Abschätzung eines Eingriffs in das Gewölbe eines Bestandstunnels aus Natursteinmauerwerk hinsichtlich der Auswirkungen auf dessen Tragfähigkeit stellt eine große Herausforderung dar. Statische Berechnungen scheitern meist an fehlenden Eingangsgrößen und an der Komplexität, ein Tunnelbauwerk, welches während seiner Bestandszeit zahlreichen Einflüssen ausgesetzt ist, in einem statischen Modell abzubilden. In dieser Arbeit werden einerseits die relevanten Einflüsse und deren Abhängigkeit von Randbedingungen aufgezeigt. Andererseits wird eine Herangehensweise zur Ermittlung von Eingangsgrößen für statische Modelle am Beispiel der einaxialen Druckfestigkeit eines Mauersteins erläutert.

Abstract

The estimation of an interference with the vault of an existing tunnel built of stone masonry regarding the effect on its load capacity poses a great challenge. Doing structural calculations mostly fail due to missing input parameters and on the complexity of representing a tunnel, which is subject to diverse influences over the years, in a structural model. In this thesis, the relevant influences and their dependency on the boundary conditions are illustrated. Further, an approach for the determination of the input parameters of a structural model are explained, using the example of the uniaxial compressive strength of a brick.

Inhaltsverzeichnis

1	AUFGABENSTELLUNG.....	1
2	EINLEITUNG	2
3	GESCHICHTE.....	3
3.1	ALLGEMEINE GESCHICHTE DES TUNNELBAUS	3
3.2	LÖSEMETHODEN.....	4
3.3	BAUVERFAHREN	6
3.3.1	<i>Deutsche Bauweise,.....</i>	7
3.3.2	<i>Belgische Bauweise,,</i>	9
3.3.3	<i>Englische Bauweise,,</i>	11
3.3.4	<i>Österreichische Bauweise,,</i>	12
3.3.5	<i>Weitere Bauweisen</i>	13
3.4	BAUELEMENTE DES TUNNELS	14
3.4.1	<i>Die Mauerung²⁵</i>	14
3.4.2	<i>Die Hintermauerung</i>	20
3.4.3	<i>Das Ausbruchprofil³⁰</i>	21
3.4.4	<i>Die Entwässerung.....</i>	23
4	EINFLÜSSE AUF DAS SYSTEMVERHALTEN	25
4.1	CHRONOLOGISCHE AUFGLIEDERUNG VON EINFLÜSSEN AUF DAS SYSTEMVERHALTEN VON BESTANDSTUNNEL	25
4.2	ELEMENTE DES SYSTEMVERHALTENS	27
4.3	BESCHREIBUNG DER EINFLÜSSE	27
4.3.1	<i>Ausgangszustand</i>	29
4.3.2	<i>Bau</i>	29
4.3.3	<i>Alterung.....</i>	35
4.3.4	<i>Vorangegangene Instandsetzungen und andere Arbeiten am Gewölbe 48</i>	
4.3.5	<i>Betrachtete, umfangreiche Instandsetzung oder Erneuerung</i>	58
5	BESCHREIBUNG DER DEGRADATION	59
5.1	GRUNDLAGEN	59
5.2	ERMITTLUNG DER DEGRADATION AM BEISPIEL „MAUERSTEIN AUS QUARZSANDSTEIN“ .62	
5.2.1	<i>Ermittlung Ausgangszustand.....</i>	62
5.2.2	<i>Ermittlung Degradationsbereich und Kurvenverlauf.....</i>	63
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	66
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	67
8	TABELLENVERZEICHNIS	69

1 Aufgabenstellung

Beim Vortrieb eines neuen Tunnels sind Spannungsumlagerungsprozesse und andere Einflüsse auf das Systemverhalten, wie zum Beispiel Bergwasserverhältnisse oder die Verformungs- und Festigkeitseigenschaften der Stützmittel, bereits in einer Detailtiefe erforscht, welche eine hinreichend genaue Prognose des Systemverhaltens beim Neubau erlaubt. Langfristige Spannungsumlagerungen und Einflüsse auf das Systemverhalten eines gemauerten Bestandstunnels wurden im Gegensatz noch nicht erforscht. Daher sind auch keine normativen Vorgaben für die Bemessung der Bauzustände bei umfangreichen Tunnelinstandsetzungen bekannt.

Folgende Gründe können eine Instandsetzung erforderlich machen:

- Drohender Verlust der Tragfähigkeit
- Drohender Verlust der Gebrauchstauglichkeit
- Erforderliche Sicherheitstechnische Nachrüstung
- Lichtraumeinschränkungen beziehungsweise geänderte Erfordernisse
- Erhaltung schränkt die Anlagenverfügbarkeit deutlich ein

Ziel dieser Arbeit ist es die technischen und historischen Grundlagen für die Veränderung eines Tunnelbauwerks vom Bau bis zu einer umfangreichen Instandsetzungsmaßnahme auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche zu erheben. Zu den historischen Grundlagen zählen beispielsweise Aufzeichnungen über die alten Tunnelbauweisen und vorangegangene Instandsetzungsmaßnahmen. Technische Grundlagen für die Veränderung eines Tunnelbauwerks sind beispielsweise Verwitterungsprozesse sowie das Langzeitverhalten des Bauwerks und des anstehenden Gebirges.

Diese Grundlagen sollen ein Verständnis für die Einflüsse durch die gewählte Bauweise und Bauelemente, die Alterung und vorangegangene Instandsetzungen schaffen. Weiters ist es ein Ziel dieser Arbeit Forschungsbedarf darzulegen um in Zukunft die Veränderung des Bauwerks im Laufe der Zeit und eine, eventuell resultierende, Reduktion der Tragfähigkeit quantifizieren zu können.

2 Einleitung

Im Netz der ÖBB befinden sich derzeit 246 Tunnel und tunnelähnliche Bauwerke (Schutzbauwerke, Galerien und offene Bauweisen). Ein Großteil dieser Bauwerke wurde in der Bahngründerzeit, zwischen Beginn des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts gebaut. Mehr als 150 dieser Bauwerke sind über 100 Jahre alt, einige Bauwerke über 150 Jahre. Eine ähnliche Altersstruktur der Eisenbahntunnel lässt sich in vielen Ländern Europas und Nordamerikas wiederfinden.

Aufgrund dieses Umstands wird der Erneuerung beziehungsweise der umfangreichen Instandsetzung von Eisenbahntunnel in naher Zukunft hohe Bedeutung zukommen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf alten, gemauerten Eisenbahntunnel, welche mit Natursteinmauerwerk ausgekleidet wurden. Von diesen Bauwerken liegen oft keine ausreichenden Planunterlagen vor. Weiters sind Erkundungstätigkeiten wie zum Beispiel Erkundungsbohrungen aufgrund der Notwendigkeit einer möglichst durchgehenden Nutzung meist nur sehr eingeschränkt möglich.

Für den Bauwerkszustand sind, neben der ursprünglichen Bauwerksherstellung, auch die im Laufe der Zeit mehr oder weniger umfangreich durchgeführten Instandsetzungen, sowie die Alterungserscheinungen relevant.

Eine Betrachtung dieser Einflussfaktoren ist für

- die optimale Planung der projektspezifischen Instandsetzungstätigkeit,
- statische Berechnungen bzw. Betrachtungen,
- die optimale Wahl der Instandsetzungsmethode und
- die sichere Durchführung der Baumaßnahme

erforderlich.

3 Geschichte

„Der Tunnelbau ist eine der interessantesten, aber auch schwierigsten Ingenieurdisziplinen. Er vereinigt Theorie und Praxis zu einer eigenen Ingenieurbaukunst. Bei Wichtung der vielen Einflüsse steht je nach dem Stand der eigenen Kenntnisse einmal Praxis, das andere Mal Theorie mehr im Vordergrund. Der Ingenieurtunnelbau wird heute weitgehend von Bauingenieuren betrieben, doch sollte sich jeder bewußt sein, daß Statik- und Massivbaukenntnisse allein nicht ausreichen. Geologie, Geomechanik, Maschinentechnik und insbesondere Bauverfahrenstechnik gehören gleichwertig dazu.“¹

3.1 Allgemeine Geschichte des Tunnelbaus²

Trotz dieser hohen, von Bernhard Maidl festgestellten Anforderungen an den Tunnelbauingenieur, wurde der erste bekannte Tunnel für Verkehrszwecke bereits etwa 2000 Jahre vor Christus gebaut. Unter Königin Semiramis wurde im alten Babylon ein 1 Kilometer langer Tunnel unter dem Flussbett des Euphrat errichtet. Zu diesem Zweck wurde der Fluss umgeleitet und der Tunnel vermutlich in offener Bauweise ausgeführt.

Sehr oft wurden Tunnel und Stollen für kriegerische Zwecke und für die Wasserversorgung gebaut. Ab dem 17. Jahrhundert nach Christus wurden Binnenschiffahrtstunnel errichtet. Bei einem dieser Tunnel, dem Tunnel am Languedoc Kanal in Frankreich, wurde erstmals auch Schießpulver im Tunnelbau angewandt. Vorher kam dieses nur im Bergbau zur Anwendung.

Eine wichtige Ära im Tunnelbau wurde mit der Erfindung der Eisenbahn zu Beginn des 19. Jahrhunderts eingeläutet. Es konnten nur geringe Steigungen überwunden werden. Da die Eisenbahn im Fernverkehr eine immer wichtigere Rolle spielte, mussten bald die gewaltigen Gebirgszüge der Alpen durchörtert werden. Dies trieb die Entwicklung neuer Ausbruchs- und Baumethoden voran. Ab Mitte des 19. Jahrhunderts wurden mechanisierte Bohrmaschinen eingesetzt. Die Erfindung des Dynamits von Alfred Nobel im Jahre 1864 war ein wichtiger Meilenstein in der Tunnelbaugeschichte. Darauffolgend wurden viele berühmte Alpentunnel gebaut, darunter der Gotthard-, Simplon-, Semmering-, Tauern-, Karawanken- und der Arlberg-tunnel. Diese Tunnel trieben die technologische Entwicklung im Tunnelbau wiederum sehr stark voran.

¹ Maidl B.: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 1, Verlag Glück Auf, Essen, 1994

² Széchy K.: Tunnelbau, Springer-Verlag, Wien, 1969

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts wurde der Bau von Trinkwasser- und Druckwasserstollen immer wichtiger. Eine besondere Herausforderung stellen dabei die wasserdicht auszuführenden Innenschalen dar.

Nach dem anfänglich raschen Ausbau des Eisenbahnnetzes, hatte der Tunnelbau nach der Bahngründerzeit etwas nachgelassen. Mit dem Beginn des Ausbaues des internationalen Autobahnnetzes zu Ende des 20. Jahrhunderts, der Untertunnelung vieler Großstädte aufgrund des wachsenden Mobilitätsbedürfnisses und dem Bau von Hochleistungseisenbahnstrecken, wurde die Entwicklung von Tunnelbauten in jüngster Zeit wieder enorm vorangetrieben.

3.2 Lösemethoden³

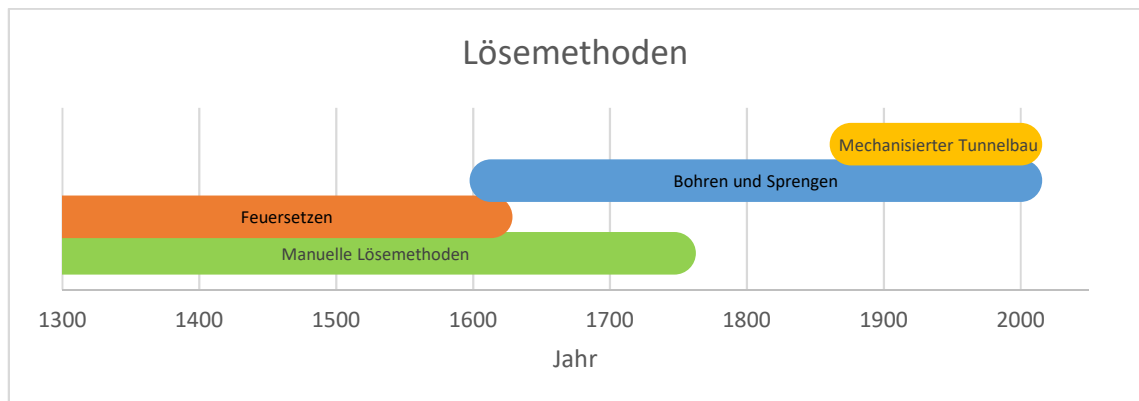


Abbildung 1 - Lösemethoden Hohlraumbau

Die Art der Lösemethoden im Tunnel- und Stollenbau orientiert sich an den technologischen Möglichkeiten der Epochen. Oft wurden im Bergbau angewandte Methoden direkt für den Tunnelbau übernommen. Die manuellen Lösemethoden wie zum Beispiel die Keilhauenarbeit, die Schlägel- und Eisenarbeit oder die Hereintreibarbeit sind so alt wie der Bergbau selbst.

Bei der Keilhauenarbeit wurde das Gebirge mithilfe von sogenannten Keilhauen losgehackt. In Abbildung 2 sind vier verschiedene Arten von Keilhauen dargestellt.

³ Ržih, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 1, Verlag von Ernst & Korn, 1867

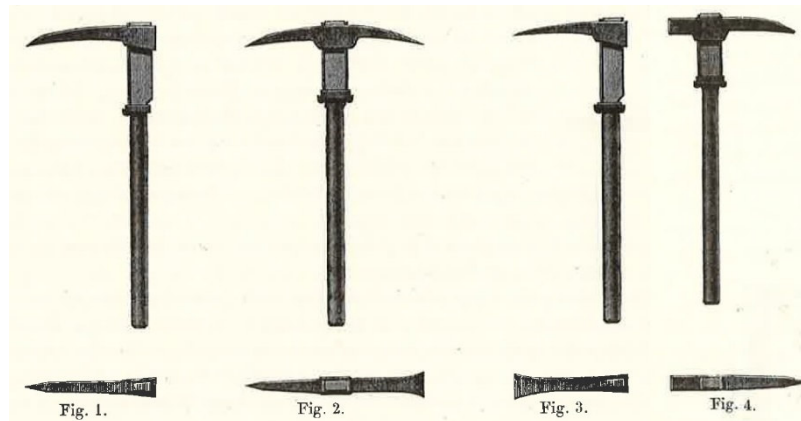


Abbildung 2 – Keilhauen⁴

Die Schlägel- und Eisenarbeit wurde zum Vortrieb in festem Gestein verwendet und spielte namentlich hauptsächlich in der Zeit vor der Einführung des Schießpulvers eine wichtige Rolle. Der Vortrieb basierte hauptsächlich auf der Abmeißelung des Gebirges. Dementsprechend gering waren die Vortriebsleistungen. Angesichts der Mühen, welche beim Vortrieb mit diesen Werkzeugen entstanden, bilden diese Werkzeuge zurecht das Wahrzeichen des Bergmannsstandes.



Abbildung 3 - Schlägel und Eisen⁴

Bei der Hereintreibearbeit wurde das Gebirge entzweigebrochen. Dies konnte durch Wuchten mit einer Brechstange, durch Eintreiben von Keilen oder Aufhieb mit schweren Hämmern geschehen. Angewendet wurde die Hereintreibearbeit hauptsächlich in gebrächem Gebirge. Als gebräches Gebirge wurde im Allgemeinen Gebirge bezeichnet in welchem Gestein vorherrscht, welches dem Zermalmern mit stumpfen Geräten widersteht, jedoch das Eindringen von spitzen Geräten erlaubt. Beispiele dafür sind verwitterter Granit, Gneis oder Glimmerschiefer.

Noch vor dem Einsatz dieser Eisenwerkzeuge wurde das anstehende Gebirge mithilfe von Feuer gespalten. Das Feuersetzen wurde oft auch zusammen mit den manuellen Lösemethoden eingesetzt, um sehr hartes Gestein zu schwächen. Mit der Einführung des Schießpulvers im Bergbau im Jahre 1613, wurde das Feuersetzen verdrängt.

Bereits kurz nach Christus, im Jahre 80, sollen Chinesen die Kenntnis über ein solches Pulver von den Indern erhalten haben. Offiziell erfunden wurde das Pulver im Jahre

⁴ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 1, Verlag von Ernst & Korn, 1867

1330 von Berthold Schwartz, einem Mönch. Im Jahre 1613 wurde das Bohren und Schießen in der Grube erstmals von Martin Weigel, Oberbergmeister zu Freiberg, beantragt. Im Jahre 1747 wurde in Freiberg eine Oberbergamts-Verordnung erlassen, wonach die Schlägel- und Eisenarbeit möglichst einzustellen sei und statt ihrer das *Bohren und Schießen* eingeführt werden soll.

Zwei wichtige Erfindungen, Mitte des 19. Jahrhunderts, erleichterten die Vortriebsarbeit enorm. Im Jahre 1844 wurde erstmals eine maschinelle Bohrmaschine zum Herstellen der Bohrlöcher eingesetzt. 20 Jahre später, im Jahre 1864, erfand Alfred Nobel das Dynamit.⁵

Im Jahre 1876 wurde erstmals von John Dickinson Brunton und George Brunton ein Patent für eine mechanisierte Schildmaschine angemeldet. Dieses Patent bildete die Grundlage für den kontinuierlichen Vortrieb.⁶

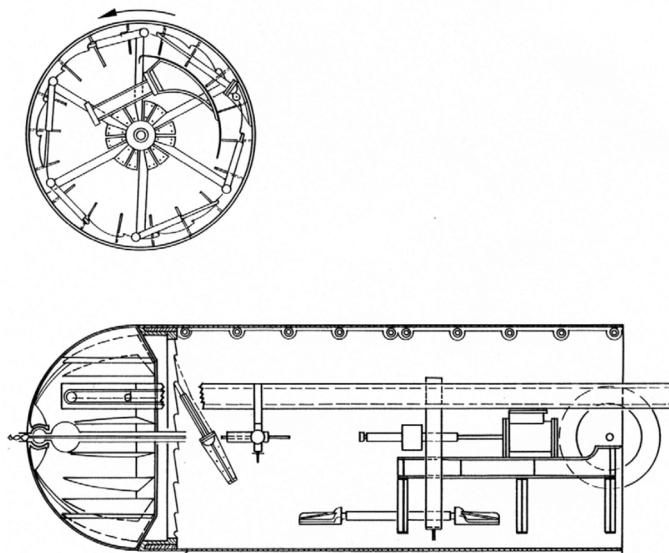


Abbildung 4 - Mechanisierter Schild nach J.D.Brunton und G.Brunton, U.K. Patent, 1876⁷

3.3 Bauverfahren

Mit der Erfindung der Eisenbahn am Beginn des 19. Jahrhunderts wurde eine Zeit mit enormen technologischen Fortschritten im Tunnelbau eingeläutet. Schienengeführte Wagen wurden zwar bereits im 17. Jahrhundert in Steinkohlebergwerken verwendet, doch als öffentliches Verkehrsmittel wurde die Eisenbahn erstmals im Jahre 1801 erwähnt.⁸

⁵ Széchy K.: Tunnelbau, Springer-Verlag, Wien, 1969

⁶ Maild, B.: Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, 2. Auflage, Ernst & Sohn, 2011

⁷ Stack, B.: Handbook of Mining and Tunnelling Machinery, Wiley, 1982

⁸ Rossberg, R.: Geschichte der Eisenbahn, Sigloch Service Ed., 1977

Der darauffolgende Ausbau des Eisenbahnnetzes und die Verwendung dieser als Fernverkehrsmittel machten die Untertunnelung der großen Gebirgszüge der Alpen notwendig. Der Bau dieser Tunnel führte zu neuen Ausbruchs- und Baumethoden. Abbildung 5 zeigt Erfindungen oberhalb der Zeitlinie und erstmalige Anwendungen der wichtigsten klassischen Tunnelbauweisen unterhalb der Zeitlinie.

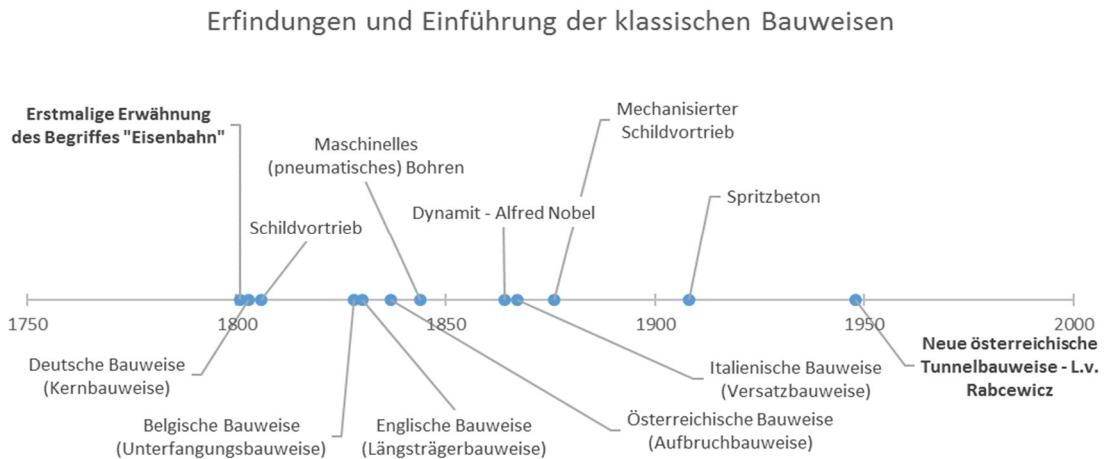


Abbildung 5 - Erfindungen und klassische Tunnelbauweisen

3.3.1 Deutsche Bauweise^{9, 10}

Die älteste, in die Literatur eingegangene, klassische Bauweise ist die deutsche Bauweise. Sie wird auch Kernbauweise genannt. Charakterisiert wird die deutsche Bauweise durch die Auffahrung kleiner, beherrschbarer Querschnitte um den Ausbruchsrund und das Stehenlassen eines Kerns. Dieser Kern wurde erst ausgebrochen, wenn die endgültige Sicherung aus Mauersteinen eingebaut war.

In der Regel wurden zuerst zwei Sohlstollen vorgetrieben und die Sohlwiderlager hergestellt. Dies ist in Abbildung 6 (Ziffer 1) dargestellt. Die Länge dieser Stollen, auch Arbeitsstrecke genannt, war von Projekt zu Projekt unterschiedlich. Als Beispiel kann der Tunnel unterhalb des Schlosses Rosenstein in der Nähe von Stuttgart angeführt werden. Dort wurde die Länge einer solchen Arbeitsstrecke mit 50 Fuß, was etwa 16 Metern entsprach, festgelegt. Anschließend wurden die Kämpferstollen, der Firststollen und danach das restliche Oberprofil, welches heutzutage als Kalotte bezeichnet wird, vorgetrieben. Die Reihenfolge des Ausbruchs ist in Abbildung 6 ersichtlich. Je nach Standfestigkeit des Gebirges wurde zuerst der gesamte

⁹ Maidl B.: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 1, Verlag Glück Auf, Essen, 1994

¹⁰ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 2, Verlag von Ernst & Korn, 1867

Ausbruchrand mit einer Zimmerung versehen, welche am Kern abgestützt wurde oder, bei gering standfestem Gebirge, in jedem der Stollen sofort eine Mauerung eingebracht, wie in Abbildung 7 dargestellt. Auch diese Mauerung wurde bis zum Gewölbeschluss am Kern abgestützt.

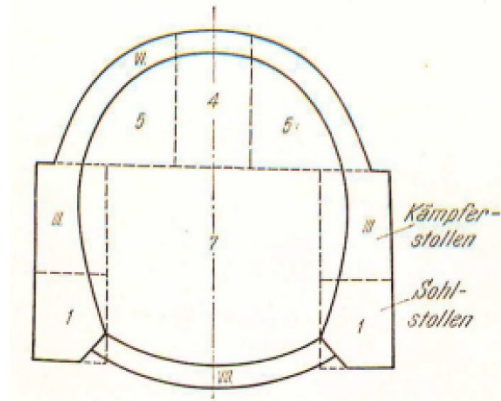


Abbildung 6 - Ausbruchsreihenfolge Deutsche Bauweise (Kernbauweise)¹¹

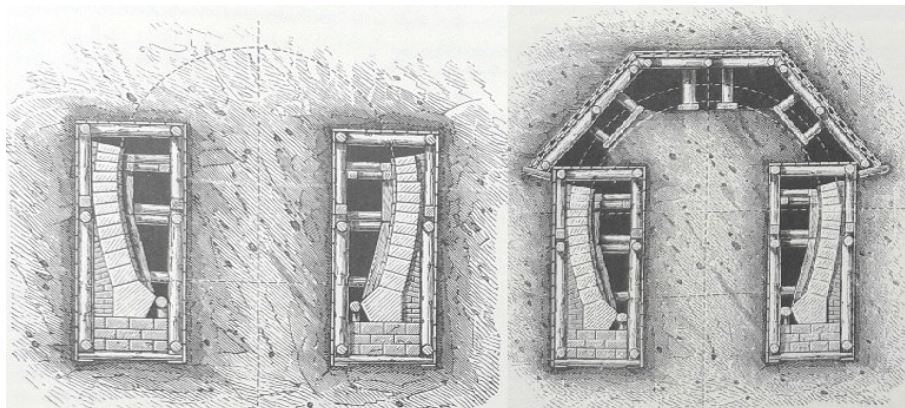


Abbildung 7 - Deutsche Bauweise (Kernbauweise) Beispiel Triebitzertunnel¹¹

Die deutsche Bauweise wurde auch erfolgreich in den sechziger und siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts angewandt. Allerdings wurde zum Beispiel beim Stadtbahntunnel in Mülheim anstatt Zimmerung und Mauerung eine Schalung und Spritzbeton eingesetzt. Der Boden bestand hauptsächlich aus Kies. Das Bauverfahren ist als Skizze in Abbildung 8 ersichtlich.

¹¹ Széchy K.: Tunnelbau, Springer-Verlag, Wien, 1969

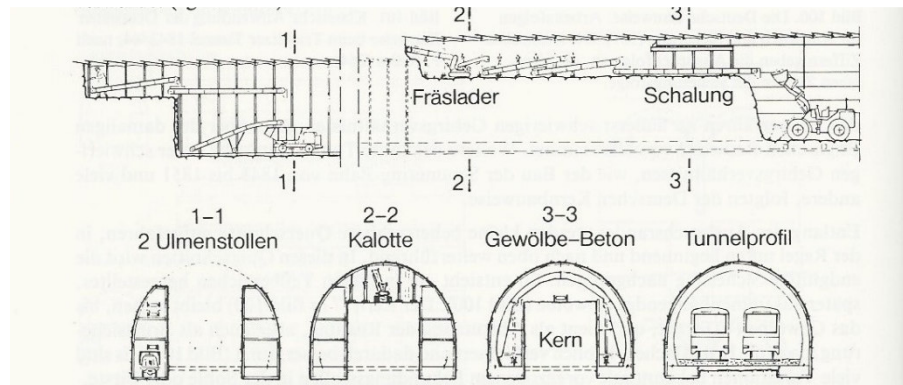


Abbildung 8 - Deutsche Bauweise, Stadtbahntunnel Mülheim, Baulos 7¹²

Beispiele für die deutsche Bauweise sind der Wolfsberg- und Weberkogeltunnel. Beide sind Tunnel der Semmeringbahn.¹⁴

3.3.2 Belgische Bauweise^{13,14,15}

Die belgische Bauweise, auch Unterfangungsbauweise genannt, wurde erstmals im Jahre 1828 und danach bei vielen wichtigen Alpentunnel angewandt. Unter anderem wurden der 12 Kilometer lange Monte Cenis Tunnel und der alte, 15 Kilometer lange, St. Gotthard Tunnel damit aufgeföhren.

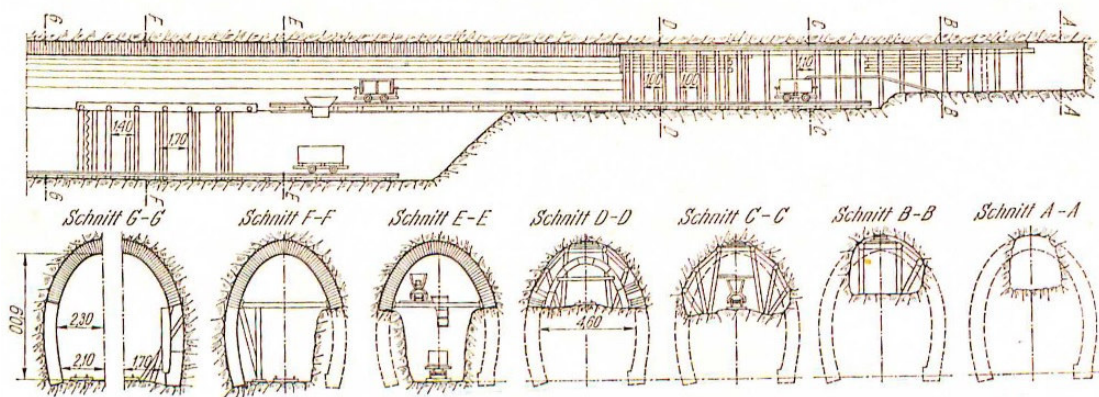


Abbildung 9 - Ausbruchfolgen belgische Bauweise¹⁵

¹² Elmer, H.: Zusammenhang zwischen Bauverfahren und geringstmöglichen Setzungen beim Bau eines doppelgleisigen Stadtbahntunnels in Mülheim a. d. Ruhr, Stuva, Forschung und Praxis 23, 1980

¹³ Maidl B.: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 1, Verlag Glück Auf, Essen, 1994

¹⁴ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 2, Verlag von Ernst & Korn, 1867

¹⁵ Széchy K.: Tunnelbau, Springer-Verlag, Wien, 1969

In der Regel wurde zuerst ein Firststollen ausgebrochen, welcher zu einer Kalotte vergrößert wurde. Dies ist in Abbildung 9, Schnitt A-A bis D-D dargestellt. Ausgehend von den Kämpfern wurde, gemäß Abbildung 8, Schnitt E-E, die Mauerung eingebracht. Die Länge eines solchen Bauabschnittes betrug meist 4 bis 9 Meter. Für die Unterfangung gab es verschiedene Varianten. Zum einen wurde die Strosse als Ganzes oder geteilt in linken und rechten Teil vorgetrieben. Zum anderen wurde bei großen Querschnitten der Aushub in mehr als zwei Stufen eingeteilt. Der Abstand zwischen den Stufen betrug zwischen 90 und 120 Fuß. Dies entsprach etwa 30 bis 40 Metern.¹⁶ Eine andere Möglichkeit bestand im Auffahren eines Sohlstollens und dessen Aufweitung bis zu den Widerlagern wie in Schnitt E-E und F-F dargestellt. Der Vorteil dieser Methode bestand darin, dass an mehreren Angriffspunkten an der Unterfangung gearbeitet werden konnte. Bei der Unterfangung wurde das Kalottengewölbe mithilfe einer sogenannten überstehenden Bogenschwelle, ein horizontal liegendes Auflager, und einer Stempelung, das sind vertikal und schräg ausgerichtete Rundhölzer, gestützt. In Abbildung 10 ist eine solche Unterfangung skizziert. Je nach Bedarf wurde nach der Herstellung der Unterfangung noch ein Sohlgewölbe eingebracht.

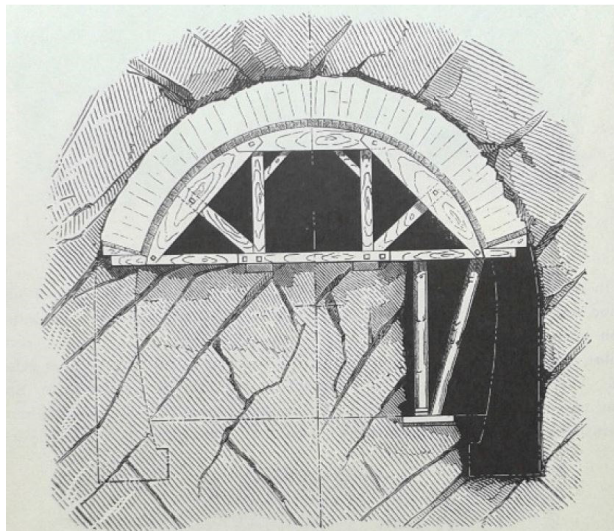


Abbildung 10 - Unterfangung mithilfe überstehender Bogenschwelle

Als Beispiele für die belgische Bauweise können der Alte Sankt Gotthard und der Monte Cenis Tunnel angeführt werden.¹⁷

¹⁶ Preußische Maß- und Gewichtsordnung vom 16. Mai 1816

¹⁷ Maidl B.: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 1, Verlag Glück Auf, Essen, 1994

3.3.3 Englische Bauweise^{18,19,20}

Die englische Bauweise ist auch als Längsträgerbauweise bekannt. Längsträger sind massive Holzpfähle welche in Längsrichtung eingebracht wurden um die Firste zu stützen.

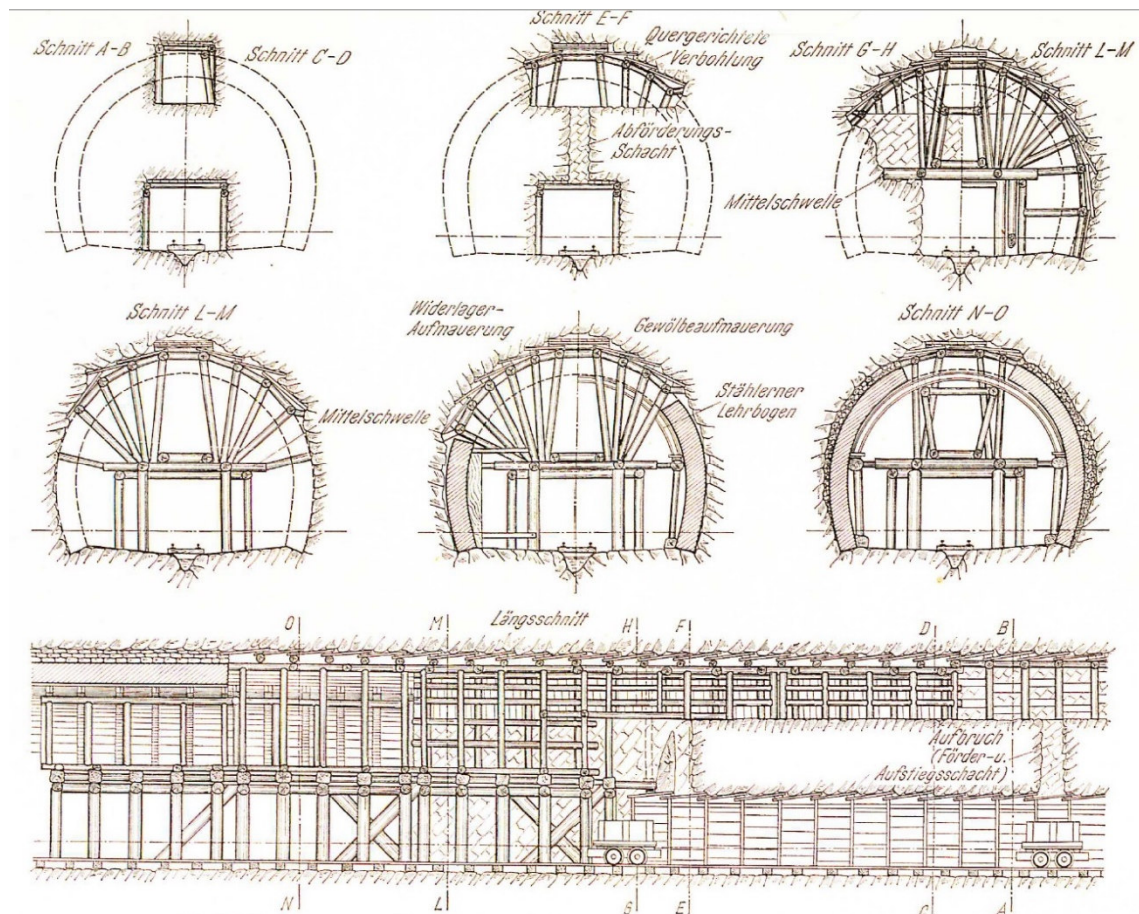


Abbildung 11 - Arbeitsschritte englische Bauweise²⁰

Zuerst wurde ein Sohlstollen als Förderstollen vorgetrieben. In Abständen von 50 bis 60 Metern wurden Schächte zu einem Firststollen gegraben. Dies ist ersichtlich in den Schnitten A-B bis E-F in Abbildung 11. Während der Sohlstollen mehrere hundert Meter vorgetrieben wurde, wurden die Firststollen nur etwa 20 bis 25 Meter vorgetrieben. Der Firststollen wurde, wie bei der belgischen Bauweise, erweitert zu einer Kalotte. (Schnitt E-F; Abbildung 11) Gestützt werden diese drei bis sechs Meter langen Bereiche durch die Längsträger welche wiederum zuerst am Kalottenfuß, dann auf sogenannten Mittelschwellen abgestützt werden (Schnitt G-H und L-M; Abbildung

¹⁸ Maidl B.: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 1, Verlag Glück Auf, Essen, 1994

¹⁹ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 2, Verlag von Ernst & Korn, 1867

²⁰ Széchy K.: Tunnelbau, Springer-Verlag, Wien, 1969

11). Von diesen Längsträgern stammt auch die Benennung der Bauweise. Auf diese Art wurde ein drei bis sechs Meter langes Vollprofil hergestellt, in welches von unten nach oben die Mauerung ohne Unterbrechung eingebracht wurde (Schnitt N-O; Abbildung 11).

Die Tunnel der Brennerbahn, nördlich des Brenners, wurden unter Anwendung der englischen Bauweise gebaut.²¹

3.3.4 Österreichische Bauweise^{22,23,24}

Die alte österreichische Bauweise ist auch bekannt als Aufbruchbauweise. Angewandt wurde diese Bauweise erstmals im Jahre 1837. In den Grundzügen ähnelt sie der vorher entwickelten englischen Bauweise. Zuerst wird ein Sohlstollen vorgetrieben, welcher zugleich als Förderstollen diente. Von diesem Sohlstollen wurden Aufbrüche zur Firste hergestellt von welchem aus der ganze Querschnitt Scheibenförmig abgebaut wurde. Abhängig von den geologischen Verhältnissen wurden zwischen 1,5 Meter und 12 Meter in wenigen oder vielen Teilquerschnitten ausgebrochen. Eine mögliche Ausbruchreihenfolge ist in Abbildung 13 dargestellt. Im Gegensatz zur englischen Bauweise wurden jedoch keine achsparallelen Längsträger eingebaut, sondern eine sogenannte Sparrenzimmerung quer zur Tunnelachse, ähnlich den Stahlbögen welche nach der neuen österreichischen Tunnelbauweise eingebaut werden. Diese Sparrenzimmerung wurde, wie in Abbildung 12 dargestellt, an Kalottenfußverbreiterungen abgestützt. Der Abstand der "Sparren" betrug je nach Standfestigkeit des Gebirges zwischen 1,2 Meter und 2,0 Meter in Tunnellängsrichtung. Anschließend wurde die Mauerung von der Sohle beginnend, bis zur Firste ohne Unterbrechung eingebracht.

²¹ Zeitschrift für Bauwesen, Ausgabe XVII., Heft 3-6, 1867

²² Maidl B.: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 1, Verlag Glück Auf, Essen, 1994

²³ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 2, Verlag von Ernst & Korn, 1867

²⁴ Széchy K.: Tunnelbau, Springer-Verlag, Wien, 1969

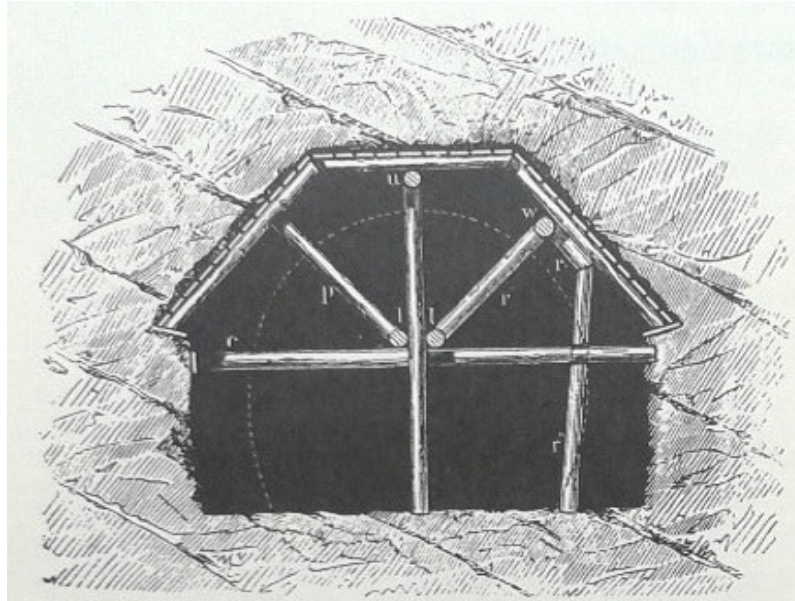


Abbildung 12 - Österreichische Bauweise – Abstützung der „Sparren“²³

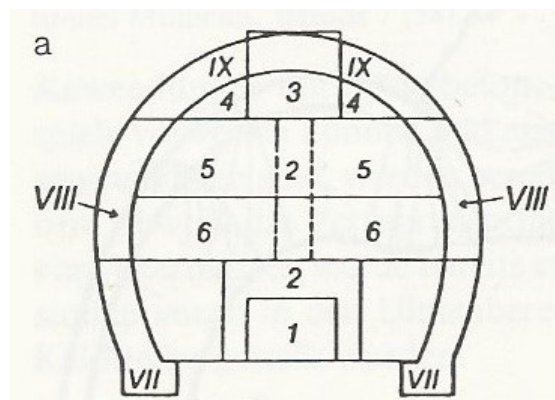


Abbildung 13 - Arbeitsfolge der österreichischen Bauweise²²

Als Beispiele für die alte österreichische Bauweise können der alte Semmeringtunnel, der Gumpoldskirchnertunnel oder der Czernitzer Tunnel in der Schweiz genannt werden.²⁵

3.3.5 Weitere Bauweisen

Weitere Bauweisen sind beispielsweise die italienische Versatzbauweise, die Mittelschlitzbauweise oder kombinierte Bauweisen. Aufgrund der seltenen Anwendung dieser Bauweisen werden diese hier nicht näher erläutert.

²⁵ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 2, Verlag von Ernst & Korn, 1867

3.4 Bauelemente des Tunnels

3.4.1 Die Mauerung²⁵

3.4.1.1 Allgemein

„Mögen nun die Ursachen des Auftretens und der Begünstigung eines Gebirgsdruckes welch' immer einen Namen haben, so wird das Wachsen des Druckes damit zusammenhängen, dass sich immer mehr und immer größere Gebirgsschalen loslösen, dass mit einem Worte die Lockerung immer mehr vorwärts schreitet. Das ganze Bestreben muss sich also dahin schließlich konzentrieren, dieses Wachsen der Auflockerung zu verhindern.“²⁵

Beim Einbau der endgültigen Sicherung wurde darauf geachtet, den Austausch der Zimmerung durch die Mauerung möglichst schnell und gebirgsschonend zu gestalten. Dies bedeutete, nur kleine Bereiche der Zimmerung zu entfernen und diese durch eine Mauerung zu ersetzen. Es war bekannt, dass sich die Öffnung großer Druckflächen ungünstig auf das System auswirkt. Um eine Erhöhung des Gebirgsdrucks auf die Zimmerung und die Ausmauerung durch zu große Gebirgsdeformationen zu verhindern, wurde bereits bei den klassischen Tunnelbauweisen Wert auf eine am Gebirge anliegende Hohlraumsicherung gelegt. Zusätzlich wurden die Bölzung und die Mauerung sehr steif gestaltet um möglichst wenig Verschiebung zuzulassen.

Um die Lage des Widerlags-Mauerwerks zu fixieren, wurden einfache, aus Brettern geschnittene Schablonen verwendet. Als Widerlags-Mauerwerk wurde das Mauerwerk vom Fundament bis einschließlich der Ulmen bezeichnet. Befestigt wurde diese Schablone mit einem Pflock oder einer Eisenstange im Ulmenbereich. Der Abstand in Tunnellängsrichtung betrug auf geraden Abschnitten bis zu 10 Meter. Dazwischen wurden Schnüre gespannt um die Lage der Mauersteine zu fixieren. Abbildung 14 stellt eine solche Schablone exemplarisch dar.

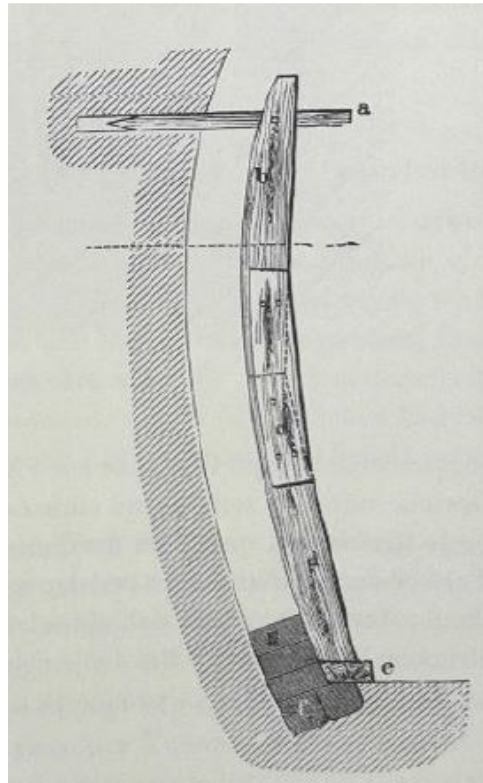


Abbildung 14 - Schablone für Widerlags-Mauerwerk²⁵

Der Rest des Gewölbes wurde mithilfe sogenannter Lehrbögen gemauert. Diese Lehrbögen trugen die Gewölbemauerung bis zur Fertigstellung einer sogenannten Wölbezone. Als Wölbezone wurde ein Bereich benannt in welchem in jeweils einem Zug die Böschung entfernt, die Lehrbögen gestellt und die Mauerung und Hintermauerung eingebracht wurden. Der Abstand der Lehrbögen betrug, je nach Gebirgsbeschaffenheit, zwischen 0,3 und 1,25 Meter. Gewöhnlich betrug der Abstand etwa einen Meter. Um die Mauerung zwischen den Lehrbögen zu unterstützen, wurden mit dem Fortschritt der Mauerung von unten nach oben Schallatten eingebaut. Die Länge der Wölbezonen betrug zwischen 2 und 10 Meter. Bis zur Fertigstellung der Mauerung in einer solchen Zone, musste auch ein sich möglicherweise aufbauender Gebirgsdruck auf die Schale von den Lehrbögen getragen werden. Aus diesem Grund wurden diese Lehrbögen sehr massiv ausgeführt. Abbildung 15 zeigt im oberen Teil einen österreichischen Lehrbogen, welcher durch eine Böschung gestützt wurde. In diesem Fall wurde auch die Widerlags-Mauerung im Ulmenbereich gestützt um horizontalem Druck entgegen zu wirken.

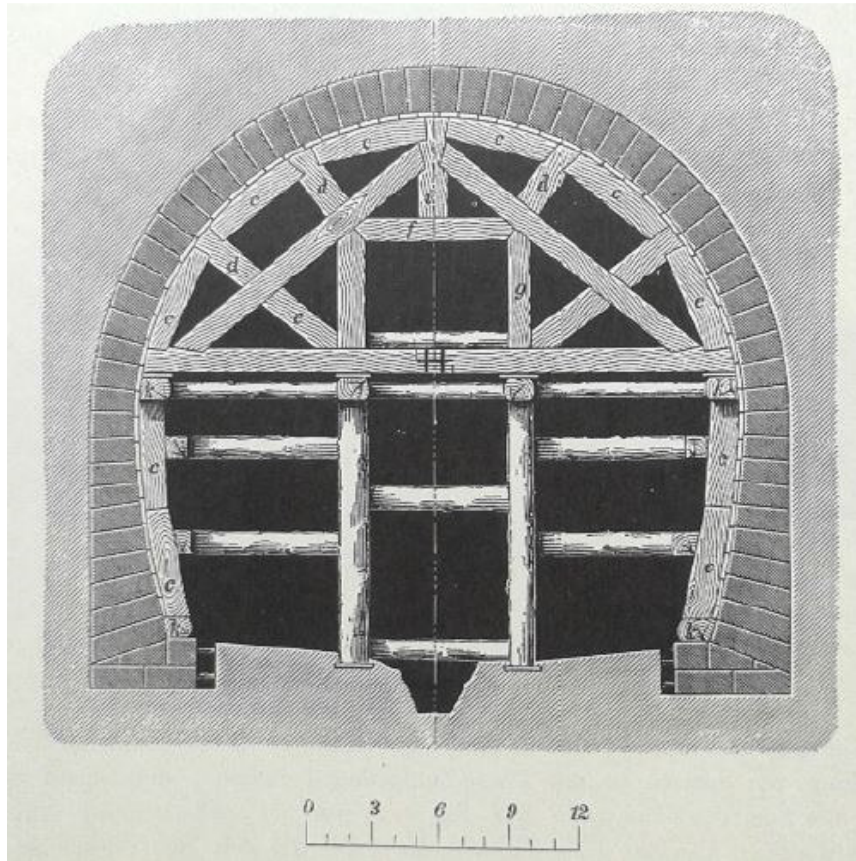


Abbildung 15 - Österr. Lehrbogen; Maßstab in Fuß (1 Fuß = 0,3139 Meter²⁶)²⁵

Die Mauersteine wurden meist aus lokalen Steinbrüchen oder auch aus dem Vortrieb des Tunnels selbst gewonnen. Im Falle der Verwendung des Tunnelausbruchs wurden die Steine aus dem Tunnel ausgefahren um an der freien Luft zu trocknen. Wiesen die verfügbaren Steine nicht die erforderlichen Festigkeitseigenschaften auf, wurden auch Steine aus entlegeneren Regionen verwendet. Im Bosruck Eisenbahntunnel wurden kurz nach der Errichtung, in Abschnitten mit schwellendem Gebirge, die ursprünglich verwendeten Kalksteine durch Granitsteine aus dem Mühlviertel ersetzt. Grund dafür war die Zerstörung der ursprünglich eingebauten Wölbung durch den Schwelldruck bei der Hydratation des Anhydrits.²⁷

3.4.1.2 Die Mauersteine

Auf die Qualität der Mauersteine wurde besonders Wert gelegt. Die Mauersteine wurden zwar, wenn möglich, aus der näheren Umgebung des Bauwerks gewonnen, mussten jedoch trotzdem strenge Qualitätskriterien erfüllen. Zum einen wurden Bausachverständige vor Ort zur Qualität potentieller Mauersteine befragt, zum anderen wurde auch die Frostbeständigkeit mithilfe von künstlichen Frost oder

²⁶ Preußische Maß- und Gewichtsordnung vom 16. Mai 1816

²⁷ Rudolf Scheutz; ÖBB Infrastruktur AG; Anlagentechnik; 2017

Überwinterung überprüft. Künstlicher Frost konnte ab Mitte des 19. Jahrhunderts mithilfe von Kompressionskältemaschinen hergestellt werden.

Es wurden keine frisch gebrochenen Steine verwendet. Diese wurden zuerst, wenn möglich, einige Monate und bevorzugt über den Winter, gelagert damit die Steine die "Bruchfeuchtigkeit" verlieren. Dasselbe galt für Steine welche direkt im Tunnel beim Vortrieb gewonnen wurden. Steine, welche im Winter verbaut wurden, mussten im Tunnel lagern bis diese durchgehend auf Tunneltemperatur erwärmt waren.

Es gab verschiedene Arten von Mauersteinen. Je nach Art musste das Ausbruchsprofil größer gestaltet werden als bei der Verwendung von regelmäßigen Quadern. Grund dafür waren die großen Verdrückungen aufgrund des erhöhten Mörtelbedarfs bei unregelmäßig behauenen Steinen. Die Faktoren mit welchen die Mauerstärken, ausgehend von einem Quadermauerwerk, multipliziert werden mussten, sind in Tabelle 1 ersichtlich. Im Folgenden werden die verschiedenen Arten von Mauersteinen beschrieben:

- Gewöhnliches oder raues Bruchsteinmauerwerk: Diese Art von Mauersteinen ist die billigst Herzustellende. Gewöhnliche Bruchsteine werden ohne Formgebung, unter Verwendung einer beträchtlichen Menge an Mörtel, in der Schale verbaut.
- Gespitztes Bruchsteinmauerwerk: Besonders die dem Hohlraum zugewandte Seite der Steine wird abgehauen um die Oberfläche zu verschönern. Die Eigenschaften sind vergleichbar mit jenen des gewöhnlichen oder rauen Bruchsteinmauerwerk.
- Haustein Mauerwerk: Bei einem Haustein Mauerwerk werden sämtliche Kontaktflächen so behauen, dass diese möglichst parallel ausgerichtet sind. Die Stärke der Steine entspricht nicht überall der Stärke des Gewölbes. Es konnte also auch bei dieser Art von Mauerwerk vorkommen, dass in radialer Richtung zwei oder mehr Steine hintereinander angeordnet wurden.
- Ziegelmauerwerk: Bei den Ziegeln wurde angegeben, dass nur doppelt gebrannte verwendet werden dürfen. Beim Aneinanderschlagen sollten diese hell klingen und selbst bei kräftigem Zusammenschlagen nicht zerbrechen. Es wurde das kleine belgische oder englische Format verwendet. Dies bedeutet, dass in eine preußische Schachtruthe etwa 2.200 Ziegel passten. Die Größe einer Schachtruthe beträgt etwa $4,45 \text{ m}^3$ ²⁸. Dies führt zu einem Ziegelvolumen von etwa 2.000 cm^3 .
- Quadermauerwerk: Das Quadermauerwerk wird mithilfe von Schablonen gefertigt. Die Stärke der Quader entspricht der Gewölbstärke und Höhe und Breite betragen nicht unter 9 Zoll. Dies entsprach etwa 24cm. Auf diese Weise konnten Gewölbestärken von bis zu 3,5 Fuß oder etwa 1,1 m gebaut werden.

²⁸ Preußische Maß- und Gewichtsordnung vom 16. Mai 1816

Quader	Hausteine	Gespitzte Bruchsteine	Gewöhnliche oder raue Bruchsteine	Unregelmäßige Bruchsteine
1,0	1,2	1,5	2,0	3,2

Tabelle 1 - Dimension Mauersteine ^{28, 29}

Bei der Dimensionierung der Mauerung wurden die lokalen Verhältnisse beachtet. Im Allgemeinen wurden Mauerstärken gemäß Tabelle 2 angewandt.

Art der Wölbung	Art des Mauerwerks	Festes und sehr festes Gestein	Gebräches Gebirge		Mildes Gebirge	Rolliges und schwimmendes Gebirge
			von	bis		
Mauerstärke in Meter						
Gewölbe und gekrümmtes Widerlager	Quader	0,3	0,5	0,6	0,8	0,9
	Haustein	0,4	0,6	0,8	0,9	1,1
	Ausgezeichnete Bruchsteine	0,5	0,8	1,0	-	-
	Gewöhnliche Bruchsteine	0,6	0,9	1,3	-	-
Sohlgewölbe	Quader	-	0,3	0,5	0,6	0,8
	Haustein	-	0,4	0,6	0,8	-
	Ausgezeichnete Bruchsteine	-	0,5	0,8	1,0	-
	Gewöhnliche Bruchsteine	-	0,6	0,9	-	-

Tabelle 2 - Mauerstärke [m] ^{28, 29}

3.4.1.3 Der Mörtel

Bei der Auswahl des Mörtels wurde zwischen trockenen, feuchten und nassen Tunnel unterschieden. Ein Tunnel wurde wie eine große Drainröhre betrachtet. Es war bekannt, dass die Schale selbst bei besten Verhältnissen einer gewissen Feuchtigkeit, der Bergfeuchte, ausgesetzt war. Diese Tunnel zählten zu den trockenen Tunnel. Als feuchte Tunnel wurden jene bezeichnet, bei welchen das Wasser in einzelnen Tropfen durch das Gewölbe dringt und als nass jene, bei welchen das Wasser aus den Gesteinswänden rieselt oder als Regen zu Boden fällt. Je nach Verfügbarkeit

²⁹ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 2, Verlag von Ernst & Korn, 1867

beziehungsweise Preis wurden die Mörtel aus Tabelle 3 bis Tabelle 5 jeweils in trockenen, feuchten oder nassen Tunnel verwendet.

	Ordinärer Trassenmörtel	Sogenannter Loriotischer Mörtel	Kohlenlösche- Mörtel
Kalk gelöscht	1 Teil	1 Teil	2 Teile
Sand	1,5 Teile	2 Teile	3 Teile
Trass	0,5 Teile	-	-
Kohlenlösche	-	-	1 Teil
Ziegelmehl	-	1 Teil	-
Kalk ungelöscht	-	0,5 Teile	-

Tabelle 3 - Mörtel für trockene Tunnel²⁹

	Verläng. Trassenmörtel	Loriotischer Mörtel	Zement Mörtel	Puzzolan-Mörtel	Kohlenlösche-Mörtel	Mörtel aus hydr. Kalk
Luftkalk, gelöscht	1 Teil	-	2 Teile	1,5 Teile	3 Teile	-
Luftkalk ungelöscht	-	1 Teil	-	-	-	-
Hydr. Kalk, gelöscht	-	1 Teil	-	-	-	1 Teil
Trass	1 Teil	-	-	-	2 Teile	-
Zement	-	-	1 Teil	-	-	-
Sand	1 Teil	2 Teile	6 Teile	2 Teile	-	2,5 Teile
Ziegelmehl	-	1 Teil	-	-	-	-
Künstl. Puzzolanerde	-	-	-	-	1 Teil	-
Kohlenlösche	-	-	-	-	1 Teil	-

Tabelle 4 - Mörtel für feuchte Tunnel²⁹

	Voller Trass- Mörtel	Zement- Mörtel	Voller Zement- Mörtel	Schlacken- Mörtel
Luftkalk, gelöscht	1 Teil	1 Teil	-	1 Teil

Hydr. Kalk, gelöscht	-	-	-	-
Zement	-	1 Teil	1 Teil	-
Trass	2 Teile	-	-	-
Sand	-	4 Teile	3 Teile	-
Gestampfte Schlacke	-	-	-	5 Teile

Tabelle 5 - Mörtel für nasse Tunnel²⁹

3.4.2 Die Hintermauerung³⁰

„Es ist einleuchtend, wie ungemein wichtig die solide Ausführung der Hintermauerung eines Tunnelgewölbes ist und wie auf gänzliche Ausfüllung aller Hohlräume hinter dem Gewölbe geachtet werden muss.“³⁰

Um weitere Auflockerungen nach dem Einbau der Mauerung zu vermeiden, wurde auf eine vollständige Ausfüllung der Hohlräume hinter den Mauersteinen geachtet. Unterschieden wird zwischen trockener Hintermauerung, welche auch als Hinterpackung, Versetzung oder Hinterfüllung bezeichnet werden kann, und nasser Hintermauerung. Bei beiden Verfahren wurde stets darauf geachtet, dass sämtliches Holzwerk vor der Hintermauerung entfernt wird. War dies in rolligem oder fließendem Gebirge nicht möglich, so wurde durch Anklopfen mit dem Hammer geprüft, ob die Pfähle direkt am Gebirge auflagen. War dies nicht der Fall musste der Pfahl entfernt werden und die entsprechende Stelle trocken hinterfüllt oder nass ausgemauert werden.

Trocken hinterfüllt wird die Mauerung meist mit Ausbruchsmaterial. Obwohl bekannt war, dass die trockene Hintermauerung selbst bei bester Ausführung noch immer komprimierbar ist, wurde diese aus Kostengründen trotzdem immer wieder angewandt. Aufgrund des geringeren Arbeitsaufwands, wurden von den Maurern oft mehrere Gewölbeschichten auf einmal versetzt. Dabei wurde oft nur der vorderste Teil des Gewölbes verfüllt und auf die hinteren Teile verzichtet. Dadurch verblieben oft große Hohlräume hinter der Mauerung.

Die nasse Hintermauerung erfolgte mithilfe von Beton oder mithilfe einer Mauerung variabler Stärke, welche direkt an den Hohlraum anschloss. Der Mörtelanteil im Beton variierte zwischen 0,5 und 0,9 Volumsanteilen, wobei Mörtelsorten nach Kapitel 3.4.1.3 verwendet wurden.

³⁰ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 2, Verlag von Ernst & Korn, 1867

3.4.3 Das Ausbruchprofil³⁰

Bei der Planung des Ausbruchprofils wurde bereits versucht auf die Druckverhältnisse im Gebirge zu achten. Beispielsweise wurde das Profil einer Kreisform angenähert, wenn starker Seiten- oder Sohldruck vorhanden war. Da man sich jedoch der Heterogenität des Gebirges, und somit der divergierenden Druckverhältnisse bewusst war, wurde meist die überhöhte Hufeisenform für Tunnelbauwerke ohne Sohlgewölbe und die gestreckte Eiform für Tunnelbauwerke mit Sohlgewölbe gewählt. Mit diesen Formen konnte man einen Großteil der vorherrschenden Verhältnisse abdecken.

Das Endgültige Ausbruchprofil setzte sich aus mehreren Abmessungen zusammen. Abbildung 16 zeigt den Radius des lichten Querschnitts der wichtigsten gebauten Profile bei zweigleisigen Tunnel. Grundlage für diese Profile war das Lichtraumprofil „*Triester Normalprofil*“. Auffällig ist, dass alle Profile ausgenommen jenem der Semmering- und Karstbahn sehr ähnlich sind. Die große Überhöhung der Tunnel dieser beiden Bahnen wurde gebaut, um eine bessere natürliche Belüftung zu testen. Es wurde erwartet, dass der Rauch bei einer solchen Überhöhung besser abzieht. Aufgrund des ungünstigen Verhältnisses der Mehrkosten dieser Überhöhung zu den Erleichterungen, wurden alle folgenden Tunnel wieder mit den bereits bewährten, niedrigeren Profilen gebaut.

Zum Radius des lichten Querschnitts wurde die Mauerstärke hinzuaddiert. Größen für diese Abmessung sind in Kapitel 3.4.1.2 angegeben.

Vergleichung verschiedener Tunnel Profile.

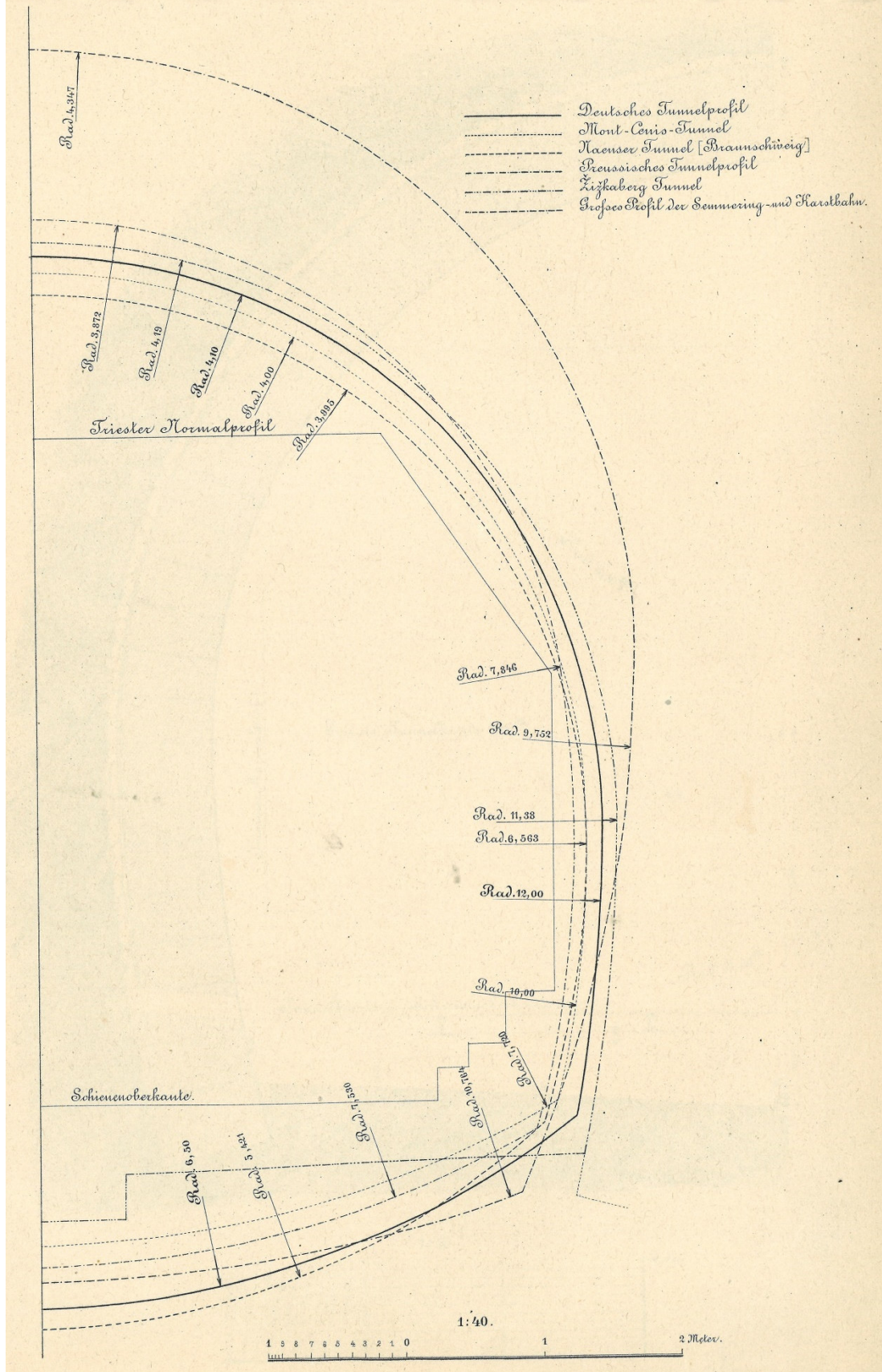


Abbildung 16 - Historische Tunnelprofile - Radien in [m]³¹

Obwohl der Ausbau für damalige Verhältnisse sehr steif gestaltet wurde, wurden gewisse Verschiebungen des Hohlraumrandes angenommen. Dieses Übermaß wurde „Überhöhungsmaß“ genannt und sollte die zu erwartenden Verformungen aufnehmen. Unter Berücksichtigung der preußischen Maß- und Gewichtsordnung aus dem Jahr 1816, welche den Umrechnungsfaktor von Zoll zu Zentimeter mit 2,615 festlegt, ergeben sich die Überhöhungen gemäß Tabelle 6.

I	Überhöhung in höchst festem Gesteine	0 cm
II	Überhöhung in sehr festem Gesteine	0 cm
III	Überhöhung in festem Gestein	7,8 cm
IV	Überhöhung in gebrächem Gestein	23,5 cm
V	Überhöhung in mildem Gebirge	39,2 cm
VI	Überhöhung in rolligem Gebirge	47,1 cm
VII	Überhöhung in schwimmendem Gebirge	62,8 cm

Tabelle 6 – Überhöhungsmaß in Klassen I bis VII³⁰

Die Überhöhung wurde bei Klasse III bis VII nur in der Firste in voller Größe angenommen. Bei Klasse III und IV wurde ein linearer Verlauf bis zu einem Überhöhungsmaß von 0 Zentimeter am Kämpfer angenommen. Bei Klasse V bis VII wurde ein linearer Verlauf von 100% der Überhöhung in der Firste, bis ein Drittel der Überhöhung an den Ulmen angenommen. Zusätzlich zur Überhöhung wurde noch ein Überprofil von etwa 8 bis 16 Zentimeter eingeplant um bei der Manipulation der Mauerung einen Spielraum zu haben. Es war bekannt, dass das Überhöhungsmaß nur ein durchschnittliches Überhöhungsmaß darstellen kann und sich, in Abhängigkeit der Geologie verändern kann.

Der Ausbruchsradius setzte sich somit zusammen aus dem Radius des lichten Querschnitts, der Mauerstärke, des Überhöhungsmaßes und des Manipulationsspielraums.

3.4.4 Die Entwässerung³¹

Um den Aufbau eines Wasserdrucks auf die Schale zu verhindern, wurden bei der Mauerung der Tunnel Löcher in der Schale belassen. Diese Löcher wurden im Widerlagerbereich und, wenn erforderlich, auch im Ulmenbereich angeordnet. Für die Ableitung der Wässer wurde in Tunnelmitte ein Kanal mit seitlichen Schlitzten, wie in Abbildung 17 dargestellt, gemauert oder sogenannte Drainsröhren, wie in Abbildung 18 dargestellt, verlegt.

³¹ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 2, Verlag von Ernst & Korn, 1867

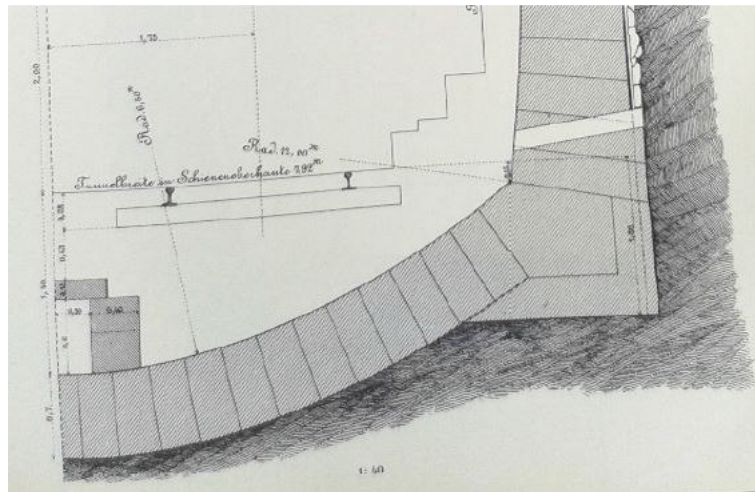


Abbildung 17 - Sohlkanal³¹

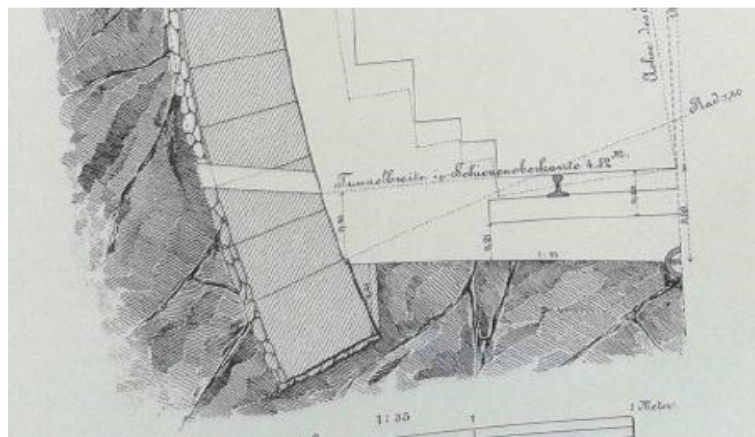


Abbildung 18 - Drainsröhre³¹

Trat dem Tunnel mehr Wasser zu als in solchen Vorrichtungen abgeleitet werden konnte, wurden diese Einbauten direkt neben den Widerlagern an beiden Seiten situiert. In diesem Fall wurde die Sohle giebelmäßig ausgebildet um die Sammlung von Wasser in Tunnelmitte zu verhindern.

4 Einflüsse auf das Systemverhalten

4.1 Chronologische Aufgliederung von Einflüssen auf das Systemverhalten von Bestandstunnel

Das Systemverhalten eines Bestandstunnels, definiert durch das Zusammenwirken von unterschiedlichen Elementen, unterliegt während der gesamten Lebensdauer des Tunnelbauwerks verschiedensten Einflüssen. Gemeinsam mit Experten der ÖBB³² wurde versucht die maßgeblichen Elemente und die darauf wirkenden Einflüsse chronologisch in Phasen von der Errichtung bis zur Erneuerung oder umfangreichen Instandsetzung, mit vollständigem oder teilweise Abtrag der Ausmauerung, aufzuzeigen. Diese Einteilung ist in Tabelle 7 ersichtlich, die maßgeblichen Elemente und Einflüsse werden in Kapitel 4.3 erläutert.

Phasen	Wesentliche Einflüsse
Ausgangszustand	Geologie
	Hydrogeologie
Bau	Geometrie des Bauwerks
	Teilflächen,-abschnitte
	Öffnungsweite / Ringschlussdistanz
	Bauelemente
	Bauentwässerung
Alterung	Physikalische und chemische Verwitterung
	Biologische Verwitterung
	Langzeitverhalten Gebirge
	Versinterung Drainagen
Vorangegangene Instandsetzungen	Ankerungen
	Injektionen
	Profilaufweitung mit Beeinflussung anstehendes Gebirge
	Profilaufweitung ohne Beeinflussung anstehendes Gebirge
	Dichtputzauftrag
	Spritzbetonauftrag
	Fugenerneuerung
	Nachträgliche Entwässerungsmaßnahmen

³² Robert Matt, Instandhaltungskordinator und Fachreferent Tunnelbau, ÖBB Infrastruktur AG

	Sohlerneuerung/Ringschluss
Betrachtete, umfangreiche Instandsetzung oder Erneuerung	Verhältnis Abtragstiefe zu Schalendicke
	Geometrie der Schalenschwächung (Größe, Lage)
	Vorab eingebrachte Sicherungsmaßnahmen
	Zeitraum von Schalenschwächung bis Stützung
	Geänderte Geometrie

Tabelle 7 - Einflüsse auf das Systemverhalten

Im Ausgangszustand ist nur der Baugrund vorhanden. Zwei wesentliche Einflüsse auf das Systemverhalten in allen anderen Phasen, die Geologie und die Hydrogeologie, stehen in dieser Phase bereits fest.

In der Bauphase eines Mauerwerkstunnels wird der Hohlraum ausgebrochen und gesichert. Die bei einem Mauerwerkstunnel angewandten Methoden werden in Kapitel 3 erläutert.

Die Alterungsphase eines Tunnels ist die längste der genannten Phasen. Dieser Abschnitt ist geprägt von langanhaltenden und, oder häufig wiederkehrenden Einflüssen, wie zum Beispiel Frost-Tauwechsel. Diese Einflüsse rufen eine langfristige Änderung der Eigenschaften der einzelnen Elemente und des Systemverhaltens selbst, in Abhängigkeit der Randbedingungen hervor. Eigenschaften der Elemente können beispielsweise die Festigkeit der Mauersteine oder des Mörtels sein.

Unter vorangegangene Instandsetzungen sind verschiedene Baumaßnahmen zusammengefasst, die das Bauwerksverhalten mehr oder weniger maßgeblich verändert haben. Zum einen handelt es sich dabei um Maßnahmen zur bereichsweisen oder gesamtheitlichen Verbesserung des Bauwerkszustands, wie zum Beispiel eine Fugenerneuerung oder ein Spritzbetonauftrag. Zum anderen werden Eingriffe am Bauwerk, zur Erhöhung dessen Funktionalität, wie zum Beispiel Nachprofilierungen für den Durchgang der „rollenden Landstraße“, darunter zusammengefasst. Wirkt eine Fugenerneuerung beispielsweise nur der Alterung des Mauerwerkverbundes entgegen, kann eine Nachprofilierung für den Lichtraumdurchgang der „rollenden Landstraße“ im Kämpferbereich deutlichen Einfluss auf das Systemverhalten des Gewölbes haben.

Bei der betrachteten umfangreichen Instandsetzung eines Tunnelbauwerks werden tragende Elemente des Tunnels abgetragen und durch eine neue, bewehrte Schale ersetzt. Je nach Erfordernis wird nur ein Teil oder die gesamte Schale samt Hinterpackung und gegeben falls dahinter befindliches Gebirge entfernt. Für den Abtrag werden je nach Erfordernis Sicherungsmaßnahmen wie zum Beispiel Anker oder Injektionen im Vorfeld gesetzt. Der Bereich des Abtrags wird durch eine bewehrte Betonschale, im Allgemeinen Spritzbeton, nachträglich gesichert. Wird

dabei das Profil des Tunnels im Endzustand vergrößert, so spricht man von einer Tunnelaufweitung.

4.2 Elemente des Systemverhaltens

Für ein Simulationsmodell sind folgende Elemente im Wesentlichen zu betrachten:

- Mauerwerk – Verbund Mauersteine und Mörtel mit dahinterliegender Hinterpackung / Hintermauerung
- Entwässerungselemente
- Anstehendes Gebirge und Grundwasserverhältnisse

Viele dieser Elemente können sich während der Lebensdauer eines Tunnelbauwerks durch Alterung, vorangegangene Instandsetzungen oder sonstige Einflüsse verändern.

Verändernde Einflüsse, wie zum Beispiel Instandsetzungsmaßnahmen, wirken nicht immer nur negativ auf das Systemverhalten, erhöhen aber meist durch mögliche Spannungsumlagerungen die Komplexität des Simulationsmodells. Die Größe des jeweiligen Einflusses ist von der Ausgangslage und den Randbedingungen abhängig.

Exemplarisch wird hierzu die Festigkeit der Mauersteine unter dem Einfluss der physikalischen Verwitterung, wie zum Beispiel Frost-Tauwechsel, angeführt. Die ursprüngliche Festigkeit wird im Wesentlichen durch die Gesteinsart und dem Gefüge bestimmt. Die Größe des Einflusses der Frost- Tauwechsel ist im Wesentlichen von folgenden Randbedingungen abhängig:

- Bergwasserzutritte
- Mikroklima (Lage zum Portal, Höhe über Adria, Luftströmungen,...)
- Gesteinsart
- Gefüge

Die Festigkeit ist eine Funktion in Abhängigkeit der Ausgangssituation, der Einflüsse und deren Randbedingungen über die Zeit. Weiters können parallel dazu auftretende Einflüsse, wie zum Beispiel chemische Verwitterung, die untersuchte Eigenschaft beeinflussen.

Im folgenden Kapitel werden die Einflüsse auf die Elemente erläutert, wesentliche Randbedingungen angeführt und deren Wechselwirkungen beschrieben.

4.3 Beschreibung der Einflüsse

In der folgenden Tabelle werden mögliche Einflüsse und Elemente des Systemverhaltens dargestellt:

Phase	Wesentliche Einflüsse	Mauerwerk	Hinterpackung / Hintermauerung	Entwässerungselemente	Anstehendes Gebirge und Grundwasserverhältnisse
Ausgangszustand	Geologie	X	X	X	X
	Hydrogeologie	X	X	X	X
Bau	Geometrie des Bauwerks	0	0	0	X
	Teilflächen, -abschnitte	0	0	0	X
	Öffnungsweite / Ringschlussdistanz	0	X	0	X
	Art der Bauelemente	X	X	X	0
	Bauentwässerung	X	X	X	X
Alterung	Pysikalische Verwitterung	-	0	-	0
	Chemische Verwitterung	-	0	-	0
	Biologische Verwitterung	-	0	-	0
	Langzeitverhalten Gebirge	-	-	-	-
	Versinterung Entwässerungssystem	-	-	-	-
Vorangegangene Instandsetzungen und Arbeiten am Gewölbe	Ankerungen	+	0	-	+
	Injektionen	X	+	-	(+)
	Profilaufweitung mit Beeinflussung anstehendes Gebirge	X	-	0	-
	Profilaufweitung ohne Beeinflussung anstehendes Gebirge	-	0	0	0
	Dichtputzauftrag / Spritzbetonauftrag	+	0	0	0
	Fugenerneuerung	+	0	0	0
	Nachträgliche Entwässerungsmaßnahmen	X	+	+	+
	Sohlerneuerung/Ringschluss	+	0	0	0
Betrachtete, umfangreiche Instandsetzung oder Erneuerung	Verhältnis Abtragstiefe zu Schalendicke	X	0	0	X
	Geometrie der Schalenschwächung	X	0	0	X
	Vorab eingebrachte Sicherungsmaßnahmen	+	+	(-)	+
	Zeitraum von Schalenschwächung bis Stützung	X	X	0	X

	Geänderte Geometrie	X	0	0	X
--	---------------------	---	---	---	---

Tabelle 8 - Einwirkungen auf Bauelemente und Randbedingungen

Legende

- (+) bei Injektionen → Reibung u. Kohäsion des Gebirges werden unterstützt, Wasserwegigkeiten mitunter verändert
- (-) bei eingebrachte Sicherungsmaßnahmen → „-“ nur wenn verpresst bzw. verfüllt → Verschlechterung des bestehenden Entwässerungssystems
- x Tendenz des Einflusses nicht eindeutig oder abhängig von den Randbedingungen
- + tendenziell positiver Einfluss
- tendenziell negativer Einfluss
- 0 kein direkter Einfluss

4.3.1 Ausgangszustand

Beschreibung

Als Ausgangszustand wird hier der ungestörte Zustand des Gebirges, vor Beginn der Baumaßnahmen, bezeichnet.

Einflüsse

Im Ausgangszustand sind lediglich die Geologie und die Hydrogeologie für die spätere Simulation des Systemverhaltens relevant. Diese beiden Einflüsse wurden im Vorfeld erkundet, beschrieben und während des Vortriebs im Tunnelbereich dokumentiert.

4.3.2 Bau

Beschreibung

Die hier betrachtete Phase „Bau“ reicht vom Beginn der Vortriebsarbeiten bis zum Beginn der Phase „Alterung“. In der Regel beginnen die Prozesse der Alterung bei einem Mauerwerkstunnel unmittelbar nach dem Einbringen der Mauerung.

Einflüsse

In dieser Phase werden, unter anderem, die Einflüsse auf das Systemverhalten im Endzustand des Baus festgelegt. Diese Einflüsse sind, zusammen mit anderen Faktoren welche während des Baus festgelegt werden und das spätere Systemverhalten bei einer Instandsetzung beeinflussen können, folgende:

- Geometrie des Bauwerks
- Teilflächen und Teilabschnitte
- Öffnungsweiten und Ringschlussdistanz
- Bauelemente
- Bauentwässerung

Angaben dazu sind für viele der österreichischen Tunnelbauwerke mit Mauerwerksschale in der Allgemeinen Bauzeitung zu finden. Die Ausgaben von 1836 bis 1918 sind im Onlinearchiv der österreichischen Nationalbibliothek abrufbar.³³

Erkenntnisse des Einflusses des Vortriebskonzepts und der eingebauten Stützmittel auf das Systemverhalten bei modernen Tunnelbauwerken, welche unter Anwendung der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise erbaut wurden, sind nur sehr eingeschränkt auf das Systemverhalten eines Mauerwerkstunnels, welcher vor über 100 Jahren gebaut wurde, anwendbar. Grund dafür ist die Komplexität der Vortriebsabfolgen und fehlende Simulationen der Interaktion zwischen Vortriebskonzept, Stützmittel und deren Einbauzeitpunkt und Einbauort.

Im Folgenden werden die Einflüsse der Bauelemente auf das Systemverhalten eines Mauerwerkstunnels beim Bau des Tunnels beschrieben.

4.3.2.1 Geometrie des Bauwerks

Beschreibung und Randbedingungen

Die Begrenzung der Oberfläche der Tunnellaibung ist bei sämtlichen Tunnel der ÖBB aufgrund von Laservermessungen bekannt. Ein auf diese Weise aufgenommenes Profil ist in Abbildung 19 als schwarze Linie dargestellt. Aufgrund dieses Profils lässt sich, unter Zuhilfenahme von Bauwerksplänen oder allgemeinen Angaben zu üblichen Schalenstärken und Hintermauerung wie in Kapitel 3.4.1 und 3.4.2, das Ausbruchprofil konstruieren. Allgemeine Angaben zum Profil von Mauerwerkstunnel sind in Kapitel 3.4.3 zu finden. Genauer und zuverlässiger ist jedoch eine Bauwerkserkundung mit Kernbohrungen, eventuell in Verbindung mit geophysikalischen Messungen. Solche Erkundungen wurden bereits bei Instandsetzungsprojekten der ÖBB durchgeführt.

Bauwerkspläne können beim Eigentümer und, oder Instandhalter aufliegen. Weiters sind die Pläne vieler Mauerwerkstunnel, wie in Kapitel 4.3.1 erwähnt, in der Allgemeinen Bauzeitung abgebildet.

³³ <http://anno.onb.ac.at>, 31. Jänner 2017

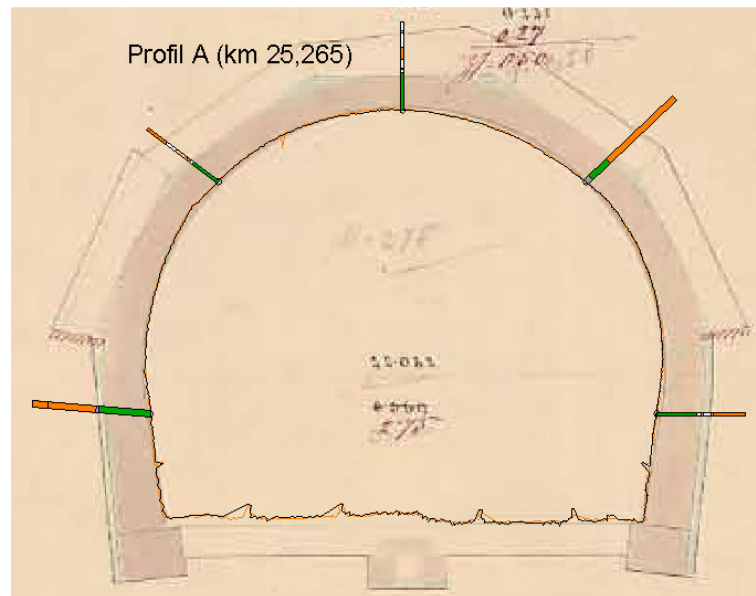


Abbildung 19 - Kernbohrungen Bestandstunnel³⁴

Abbildung 19 zeigt fünf Erkundungsbohrungen (2 Kern- und 3 Tastbohrungen) durch die Schale eines zweigleisigen Bestandstunnels. Die Bohrprofile wurden auf den Maßstab der Bestandspläne skaliert und auf ihre plangemäße Position gelegt. Die Ausmauerung wird in diesem Fall grün dargestellt, die Hinterfüllung bzw. der Auflockerungsbereich des umgebenden Gebirges orange. Teilweise konnte nicht zwischen Hintermauerung und Gebirge unterschieden werden. Hohlräume hinter der Schale sind weiß dargestellt.

Die Plangemäße Dicke der Ausmauerung beträgt beim gegenständlichen Projekt im Kämpfer- und Firstbereich 60cm und im Ulmenbereich 80cm. Im Wesentlichen wurde dies durch die Kernbohrungen bestätigt, es gab jedoch auch signifikant abweichende Kern- und Tastbohrungen.³⁵

Kenntnisse über die Geometrie des Tunnelbauwerks sind unerlässlich für die Erstellung eines Modells im Zuge einer numerischen Simulation. Die Geometrie beeinflusst maßgeblich den Momenten und Kraftverlauf in der Schale aufgrund des Gebirgsdruckes und somit auch das Systemverhalten.

Die Querschnitte des lichten Raums der alten gemauerten Eisenbahntunnel lagen vor etwaigen Profilaufweitungen im Wesentlichen zwischen etwa 27 m² bei eingleisigen und 49 m² bei zweigleisigen Tunnel. Die Tunnel der Semmering- und Karstbahn wurden mit einem lichten Raum von etwa 57 m² gebaut. Grund dafür war die Annahme, dass der Rauch aufgrund dieser Maßnahme besser abziehen würde.

³⁴ Besprechungsgrundlage; ÖBB Infrastruktur AG; 2012

³⁵ Statische Berechnung – Ertüchtigung Ausmauerung; IL – Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GesmbH; 2015

Nachdem die Erfahrungen diese Annahme widerlegten, wurden die folgenden Tunnel wieder mit einem kleineren Profil gebaut.³⁶

Neben der Anzahl der Gleise wirkten sich vor allem die geotechnischen Verhältnisse und damit einhergehend ob ein Sohlgewölbe erforderlich war beziehungsweise die Dicke der Mauerung, auf die Geometrie aus.

4.3.2.2 Teilflächen und Teilabschnitte

Beschreibung und Randbedingungen

Die Unterteilung des Ausbruchsquerschnitts und des Vortriebs in kleine, beherrschbare Flächen und Abschnitte, führt zu Teilflächen und Teilabschnitten. Ein aktuelles Beispiel ist der Ulmenstollenvortrieb, welcher bei großen Querschnitten angewandt wird. Ähnlich wurden auch Vortriebe der klassischen Bauweisen in Teilflächen und Teilabschnitte unterteilt. Diese Faktoren haben wesentlichen Einfluss auf die Umlagerung des Gebirgsdrucks während des Baus, was wiederum das Systemverhalten während einer Instandsetzung beeinflussen kann.

Die numerische Simulation von Umlagerungsprozessen des Gebirgsdrucks bei Ulmenstollenvortrieben während der Bauphase ist bereits Stand der Technik. Auf dieselbe Weise könnten Umlagerungen des Gebirgsdrucks bei Ausbruchreihenfolgen simuliert werden, wie sie in Kapitel 3.3 beschrieben werden.

Wie bei Tunnel welche unter Anwendung der NATM gebaut werden, wurde auch der Vortrieb bei den alten Bauverfahren selten im Vollausbuch ausgeführt. Anders als heutzutage, war früher neben geotechnischen Erfordernissen auch die Baulogistik ein weiterer einschränkender Faktor, aufgrund dessen ein Vollausbuch vermieden wurde.

Die Teilflächen und Teilabschnitte und deren Ausbruchreihenfolge wurden unter anderem auch aufgrund des gewählten Bauverfahrens festgelegt. Das Bauverfahren wiederum, wurde aufgrund geotechnischer Erfordernisse und den Präferenzen der Entscheidungsträger festgelegt. Verschiedene Bauverfahren werden in Kapitel 3.3 genannt. Detaillierte Angaben zu diesen Faktoren müssen Bauwerksspezifisch recherchiert werden.

4.3.2.3 Öffnungsweiten und Ringschlussdistanz

Beschreibung und Randbedingungen

Die Faktoren Öffnungsweite und Ringschlussdistanz haben wesentlichen Einfluss auf die Umlagerung des Gebirgsdrucks während des Baus. Unter Anwendung der NATM

³⁶ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 2, Verlag von Ernst & Korn, 1867

wird als Ringschluss die Sicherung des Hohlraums mittels Spritzbeton oder Tübbing über den vollen Umfang bezeichnet.³⁷ Da unter Anwendung der klassischen Bauweisen ein Zwischensicherungsschritt, das Einbringen der Bölung, notwendig war, sind für die Beschreibung der Abstände zwischen den Ausbauständen andere Begrifflichkeiten notwendig. Im Folgenden wird der Abstand des vollständig eingebauten Gewölbes zur Ortsbrust als Gewölbeschlussdistanz bezeichnet und der Abstand eines vollständig eingebauten Sohlgewölbes als Sohlschlussdistanz. Als Öffnungsweite wird der Abstand der Ortsbrust zur eingebauten Bölung bezeichnet.

Je nach Gebirgsbeschaffenheit und Bauverfahren wurden mehr oder weniger lange Bereiche geöffnet bevor die ersten Stützmittel, in Form eines Holzverbaus, eingebaut wurden. Die Bölung eines Tunnels beeinflusst die Umlagerungen des Gebirgsdrucks während der Bauphase. Je nach verwendeter Holzsorte und Ausführung der Bölung wurde der Ausbaustützdruck direkt nach dem Ausbruch beeinflusst.

Wie die Bölung prinzipiell ausgeführt wurde, wird in Kapitel 3.3 beschrieben. Details wie zum Beispiel die verwendete Holzsorte und Abmessungen sind wichtig für die Berechnung des Ausbauwiderstands und müssen Bauwerksspezifisch recherchiert werden. Ergänzend zur Allgemeinen Bauzeitung eignet sich hierfür das Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst von Franz Rziha.³⁶ Die Festigkeitseigenschaften der verschiedenen Holzsorten können in den relevanten Normen nachgeschlagen werden. Charakteristische Werte der Festigkeit von Vollholz befinden sich in der ÖNORM EN 338.

Die Gewölbeschlussdistanz und bei Einbau eines Sohlgewölbes die Sohlschlussdistanz, sind stark abhängig vom gewählten Bauverfahren und von der Gebirgsbeschaffenheit.

Eine Simulation der Gebirgsdruckumlagerung aufgrund der Teilflächen und Teilabschnitte und Öffnungsweiten und Ringschlussdistanz ist aufgrund der vielen Angriffspunkte und Angriffsflächen bei den alten Bauweisen äußerst komplex.

4.3.2.4 Bauelemente

Beschreibung und Randbedingungen

Die Bauelemente sind die endgültigen Stützmittel eines Mauerwerkstunnels. Dazu gehören die Mauersteine, der Mörtel und die Hinterpackung. Diese Bauelemente bilden das Gewölbe und sind hauptverantwortlich für die Eigenschaften des Bauwerks. Es werden auch die Entwässerungselemente erläutert. Diese sind mitverantwortlich für die Veränderung des Bauwerks im Laufe der Zeit.

Ausführung des Mauerwerks

³⁷ Boley, C.: Handbuch Geotechnik; Vieweg+Teubner; 1. Auflage; 2012

Die Größe der Mauersteine, der verwendete Mörtel und die Art der Mauerung werden in Kapitel 3.4.1 erläutert. Die Art und Einbringung der Hintermauerung wird in Kapitel 3.4.2 erläutert. Weiters finden sich wiederum viele, bauwerksspezifische Informationen in der Allgemeinen Bauzeitung. Wichtig sind vor allem die Festigkeitseigenschaften dieser Bauelemente zum Zeitpunkt der betrachteten Instandsetzung. Diese Eigenschaften können sich während der Alterungsphase des Bauwerks grundlegend ändern. Diese Mechanismen werden in Kapitel 4.3.3 näher erläutert.

Verwendete Materialien der Mauerung

Im Speziellen sind hier die Materialien der Mauersteine, des Mörtels und der Hinterpackung wichtig. Welche Materialien im Allgemeinen verwendet wurden, wird in Kapitel 3.4 beschrieben. Unter anderem war dies abhängig von den geotechnischen Erfordernissen und der Verfügbarkeit der Steine. Bauwerksspezifisch müssen Erkundungen durchgeführt werden. Sehr aufschlussreiche Literatur ist wiederum in der Allgemeinen Bauzeitung zu finden.

Wichtig sind in diesem Zusammenhang vor allem die Festigkeitseigenschaften und das Verhalten der Materialien beim Vorhandensein verschiedener Einflüsse. Diese Eigenschaften können sich während der Alterungsphase des Tunnelbauwerks grundlegend ändern. Aus diesem Grund müssen die Festigkeitseigenschaften der Bauelemente zum Zeitpunkt der betrachteten Instandsetzung als Eingangsparameter in numerische Simulationen herangezogen werden. Die Mechanismen hinter diesen Veränderungen werden in Kapitel 4.3.3 näher erläutert. Als weiterer Faktor ist die Abrasivität der Materialien bedeutend für die Planung des Werkzeugeinsatzes bei der Instandsetzung.

Die verwendeten Materialien der Hintermauerung werden in Kapitel 3.4.2 beschrieben. Allerdings ist diesbezüglich in jedem Fall eine Erkundung durchzuführen, da die Hintermauerung, wie bereits im erwähnten Kapitel beschrieben, oftmals nicht vollständig eingebaut wurde. Hohlräume welche dadurch hinter der Mauerung vorhanden waren und teilweise noch immer sind, beeinflussen das Systemverhalten beim Bau des Tunnels und bei einer Instandsetzung entscheidend. Grund dafür ist zum einen, dass das ungestützte Gebirge immer weiter aufgelockert wird und sich somit der Druck auf das Gewölbe erhöht, zum anderen, dass sich bei einer fehlenden Bettung keine optimale Gewölbetragswirkung ausbilden kann.

Entwässerungselemente

Mauerwerkstunnel wurden druckwasserentlastet gebaut. Aus diesem Grund war der Einbau von Entwässerungssystemen nötig. Entwässerungselemente welche beim Bau eines Tunnels mit Natursteinmauerwerksgewölbe eingebaut wurden sind folgende:

- Sohlkanäle
- Trockene Hintermauerung

- Sonstige Entwässerungselemente (zum Beispiel Entwässerungsöffnungen im Mauerwerk)

Diese Elemente wurden eingebaut um vorhandenes Bergwasser druckfrei abzuleiten. Welche Elemente in welchem Umfang eingebaut wurden war vorwiegend abhängig von den Bergwasserverhältnissen.

4.3.2.5 Bauentwässerung

Beschreibung und Randbedingungen

Die beim Bau anfallenden Wässer wurden im offenen Gerinne oder, bei fallendem Vortrieb, in Rinnen mit zwischengeschalteten Hebevorrichtungen aus dem Tunnel geleitet. Zur Hebung der Wässer wurden verschiedene Verfahren angewandt³⁸:

- Hebung mit der Schaufel
- Hebung mit dem Schöpfeimer
- Hebung mittels Wassertonnen
- Hebung des Wassers mittels Pumpen

Da das Wasser ungehindert und ungefiltert aus der Ortsbrust fließen konnte, ist davon auszugehen, dass, je nach Wasserzufluss, Feinanteile aus eventuell gefüllten Klüften ausgewaschen werden konnten.

Als Randbedingung ist hier der Wasserandrang beim Bau des Tunnels zu betrachten. Hierfür sind Dokumentationen des Baus heranzuziehen.

4.3.3 Alterung

Beschreibung

Die Alterungsphase eines Tunnels schließt im Allgemeinen direkt an die Bauphase an und endet erst mit der kompletten Erneuerung der Schale oder dem Tunnelabtrag. In der Regel werden Auswirkungen der Alterung durch verschiedenste Instandsetzungsmaßnahmen beeinflusst. Diese Instandsetzungen reichen von kleinen Nachbesserungen am Mauerwerk, wie zum Beispiel Fugenerneuerungen, bis hin zu einer umfangreichen Instandsetzungsmaßnahme wie zum Beispiel einer Tunnelaufweitung mit Einbau einer Spritzbetoninnenschale. Die Einflüsse solcher Maßnahmen werden im Rahmen des Abschnitts „Vorangegangene Instandsetzungen“ erläutert.

Einflüsse

³⁸ Ržiha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, Band 2, Verlag von Ernst & Korn, 1867

Die Alterungsphase ist geprägt von vielen Einflüssen, welche sich vorwiegend langfristig auf das Bauwerk und seinen Zustand auswirken. Folgende Einflüsse können den Zustand des Bauwerks und damit das Systemverhalten bei einer Instandsetzung maßgeblich verändern:

- Physikalische und chemische Verwitterung
- Biologische Verwitterung
- Langzeitverhalten Gebirge
- Versinterung Entwässerungssystem

Im Folgenden werden die wichtigsten Schadensursachen und die zugrundeliegenden Mechanismen, welche der Alterungsphase zugrunde liegen, erläutert.

4.3.3.1 Physikalische und chemische Verwitterung

Beschreibung

Physikalische und chemische Verwitterung hat einen negativen Einfluss auf die wichtigsten Elemente des Systemverhaltens. Besonders betroffen ist die dem Hohlraum zugewandte Oberfläche der Mauerung. Auch wenn die Schadensbilder oft ähnlich sind, sind die Ursachen und Einflüsse oft unterschiedlich. Im Folgenden werden die Randbedingungen, Mechanismen und Schadensbilder in Zusammenhang mit der physikalischen und chemischen Verwitterung erläutert.

Die Hauptursache für physikalische und chemische Verwitterung von Mauerwerk ist Wasser. Ein Expertengutachten über die Tragfähigkeit des Karawankentunnels weist beispielsweise auf einen möglichen Zusammenhang zwischen Bergwasserzutritten und schadhafte Stellen im Tunnel hin: „[...] Auffallend ist, dass jene Bereiche, in denen die meisten Schäden dokumentiert sind, gut mit jenen übereinstimmen, bei denen Bergwasserzutritte aufgenommen wurden. [...]“³⁹. Wasser kann durch verschiedene Mechanismen in das Mauerwerk eindringen⁴⁰:

- Wasserandrang in flüssiger Form
 - Sickerung von Bergwasser durch undichtes Mauerwerk
 - Kapillare Wasseraufnahme bergseitig oder von der Sohle
 - Regen- und Spritzwasser im Portalbereich
- Wasserandrang in Form von Wasserdampf
 - Kondensation
 - Kapillarkondensation
 - Hygroskopische Feuchteaufnahme

³⁹ 3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH: Expertengutachten Standsicherheit Karawankentunnel; ÖBB Infrastruktur AG; 2002

⁴⁰ Maier, J.: Handbuch Historisches Mauerwerk, 2. Auflage, Springer Vieweg, 2012

Sickerung von Bergwasser durch undichtes Mauerwerk tritt vor allem im Bereich von Rissen auf wenn die Schale nicht entsprechend entwässert wird.

Die **kapillare Wasseraufnahme bergseitig oder von der Sohle** ist in hohem Maße abhängig von der Porosität der Schale sowie des Benetzungswinkels, welcher ein Wassertropfen mit der Oberfläche des Mauersteins oder des Mörtels bildet. Prinzipiell gilt je grobkapillarer ein Baustoff ist, desto schneller wird Wasser angesaugt und desto geringer ist die kapillare Steighöhe im Baustoff. Umgekehrt gilt je feiner die Kapillare sind, desto geringer ist die Sauggeschwindigkeit und desto größer ist die kapillare Steighöhe.

Regen- und Spritzwasser im Portalbereich kann durch Wind und fahrende Züge etliche Meter in den Tunnel hineinverfrachtet werden.

Kondensation von Wasser tritt vor allem dann auf, wenn warme Luft durch den Tunnel strömt und diese an der Schale abkühlt. Dies ist vor allem bei warmen Wetterverhältnissen in Tunnelbereichen mit geringer Überlagerung relevant.

Kapillarkondensation tritt vor allem bei sehr feinen Poren auf. Durch die Adhäsionskräfte der Kapillarwände wird der Sättigungsdampfdruck verringert und Wasser kondensiert an den Kapillarwänden. Grundsätzlich gilt je feiner die Poren und je höher die relative Luftfeuchtigkeit, desto mehr Wasser kondensiert in den Kapillaren.

Hygroskopische Feuchteaufnahme entsteht durch die Eigenschaft eines Baustoffes Luftfeuchtigkeit zu binden. Diese Eigenschaft ist auf Salze zurück zu führen welche im Baustoff angereichert sind und das Wasser binden.

Mechanismen und Schadensbilder⁴¹

Physikalische Verwitterung durch gefrierendes Wasser tritt vorwiegend im Bereich der Portale auf. Abhängig von der Überlagerung und den meteorologischen Verhältnissen, kann Frost auch weit bis in den Tunnel hinein auftreten. Das Wasser in den Poren im oberflächennahen Bereich der Tunnelschale vergrößert beim Gefrieren das Volumen und überwindet dabei die Kornbindungsfestigkeit. Bereits bei -5°C beträgt der nötige Druck um das Wasser am Gefrieren zu hindern etwa 610 bar. Bei Frostsprengung, die in Klüften und Rissen beginnt, bilden sich Eislinsen, welche für die Zerstörung verantwortlich sind. Typische Schadensbilder sind Abschalungen, Mauerwerksausbrüche und Fugenausbrüche. Beispiele für diese Schadensbilder sind in Abbildung 20 bis Abbildung 22 abgebildet.

⁴¹ Rohabsch, A.: Verwitterung von Naturstein, in: Österreichische Bauzeitung, Ausgabe 19, Seite 33-36, 2004

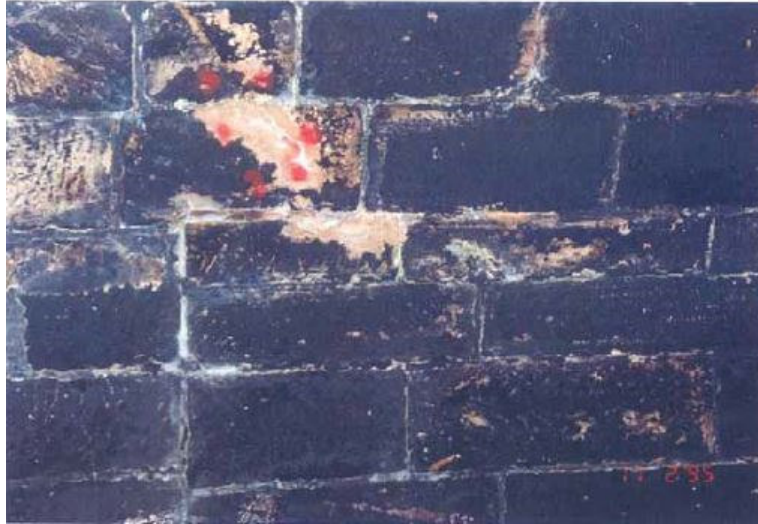


Abbildung 20 - Beispiel für Abschalung⁴²



Abbildung 21 - Beispiel für Mauerwerksausbruch⁴²

⁴² Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH – Baugrundinstitut, UIC Working Group "Tunnel Maintenance", Katalog von Schäden und ihren Ursachen in alten Tunneln, 2003



Abbildung 22 - Beispiel für Fugenausbruch⁴²

Ein weiterer physikalischer Verwitterungsprozess ist die Winderosion. Diese ist zwar unerheblich für das Systemverhalten während der Instandsetzung, wird der Vollständigkeit halber trotzdem angeführt. Ein Beispiel ist in Abbildung 23 dargestellt. Natürliche Luftströmungen und Luftströmungen durch Zugdurchfahrten führen zu solchen Schadensbildern.



Abbildung 23 - Beispiel für Winderosion⁴³

⁴³ Scherzer, K.: Rekawinkler und kleiner Dürrebergtunnel, Untersuchung der Portale – Bericht, April 2015

Das Mauerwerk kann auch durch chemische Verwitterung geschädigt werden. Ein Mechanismus ist die Kalklösung. Dabei werden Kalksteine, Marmore und Ophikalzite durch Wasser mit gelöstem CO₂, welches in Form von Kohlensäure vorliegt, aufgelöst. Die Geschwindigkeit dieses Prozesses ist abhängig von der Menge des gelösten CO₂, des Umgebungsdrucks und von Temperatur des Wassers. Dabei gilt je kälter das Wasser und je höher die CO₂ Konzentration, desto höher ist die Kalklösungsrate.

Ein weiterer Verwitterungsmechanismus ist die Korrosion von Metallen. Sind Erze wie zum Beispiel Pyrit oder Hämatit im Gestein vorhanden, können diese unter Zunahme des Volumens oxidieren. Die Folge können Verfärbungen oder aber auch kleine Absprengungen am Gestein sein. Wurde Eisen im Mauerwerk verbaut, übt auch dieses bei der Korrosion Druck auf das Umgebende Mauerwerk aus und kann Schäden verursachen.

Salzkristallisation tritt auf wenn Wasser im oder an den Mauersteinen verdampft oder die Salze durch Übersättigung aufgrund einer Temperaturänderung oder anderen Vorgängen ausgefällt werden. Die dabei entstehenden Kristalle führen zu Aushöhlungen, Absandungen und Ausblühungen. Eine Absandung ist in Abbildung 24 dargestellt. Ein Beispiel für Ausblühungen ist in Abbildung 25 dargestellt. Salze welche zu solchen Aushöhlungen und Absandungen führen sind Sulfate, Chloride und Nitrate. Nitrate stammen meist aus biogenen Aktivitäten. Sie sind für die Verwitterung der Mauersteine eines Tunnels von geringer Bedeutung. Chloride und Sulfate sind von höherer Bedeutung. Sulfate stammen aus der Verwitterung von Sulfatmineralen wie zum Beispiel Gips. Auch die Rußschicht aus dem früheren Dampflokbetrieb kann als Schwefelquelle für die Bildung von Sulfaten dienen.⁴⁴ Chloridquelle kann das Gebirge selbst oder, bei seichtliegenden Tunnel in der Nähe von Straßen, Tausalz sein.

Sämtliche Schäden am Mauerwerk können zu einer Entfestigung desselben führen. Dadurch kann es zu Instabilitäten im Gewölbe kommen und in weiterer Folge zu einer Gefährdung der Tragfähigkeit. Abhängig sind die Schäden jeweils von den Randbedingungen der Einflüsse selbst, wie zum Beispiel der Chemismus des Wassers, aber auch von den Randbedingungen des Bauwerks, wie zum Beispiel die verwendeten Materialien.

⁴⁴ Bauer, Ch.: Ursache der Sulfatschäden im Eisenbahntunnel Bosruck, 2004



Abbildung 24 - Beispiel für Absandung⁴²



Abbildung 25 - Beispiel für Ausblühungen⁴²

Weitere Schäden

Ein starker Wasserzutritt zum Tunnel kann nicht nur Schäden am Mauerwerk verursachen, sondern auch Schäden am anstehenden Gebirge. Folgen davon können Hohlräume hinter der Schale sein, was zur Instabilität des Gewölbes, aufgrund der fehlenden Auflast führen kann. Abbildung 26 zeigt eine solche, mögliche Hohlstelle.



Abbildung 26 - Beispiel für Hohlstelle hinter dem Ausbau⁴²

Hohlstellen können nicht nur durch das Auswaschen von Bodenbestandteilen, der Hinterpackung oder löslichem Gebirge, wie zum Beispiel salzhaltigem Gebirge, entstehen, sondern auch durch unzureichende Hinterfüllung nach dem Bau des Tunnels. Dieser Sachverhalt wurde bereits in Kapitel 3.4.2 erläutert.

Randbedingungen

Wie stark die Prozesse der Verwitterung die Eigenschaften des Tunnelbauwerks beeinflussen ist von vielen verschiedenen Randbedingungen abhängig, welche sich oft auch gegenseitig beeinflussen. Diese Randbedingungen sind wiederum abhängig von weiteren Randbedingungen. Für eine umfangreiche Beschreibung der Randbedingungen und deren Abhängigkeiten ist eine detaillierte Betrachtung jedes einzelnen Verwitterungsprozesses nötig. Im Folgenden werden nur die wichtigsten Randbedingungen genannt:

- Menge des anfallenden Bergwassers bezogen auf den betrachteten Tunnelabschnitt und dessen Laibungsfläche.
- Chemismus des Bergwassers. Dieser ist wiederum abhängig von der Geologie. Bei seichtliegenden Tunnel ist dieser außerdem abhängig von der Überlagerung und dem Chemismus der Oberflächenwässer.
- Mikroklima im Tunnel. Dies beeinflusst unter anderem Verdunstung und Kondensation von Wasser an der Oberfläche der Mauerung. Das Mikroklima ist wiederum abhängig von folgenden Randbedingungen:
 - Länge des Tunnels
 - Teufenlage

- Lage der Portale (Mikroklima an den Portalen)

4.3.3.2 Biologische Verwitterung⁴⁵

Beschreibung

Als biologische Verwitterung wird die Zerstörung des Mauerwerks durch biologische Organismen bezeichnet. Im Portalbereich von Mauerwerkstunnel können sich Algen, Pilze, Bakterien und andere, höhere Pflanzen ansiedeln.

Mechanismen und Schadensbilder

Biologische Verwitterung durch Wurzelsprengung im Portalbereich und bei sehr geringer Überlagerung kann zu Schäden am Mauerwerk führen. Pflanzenwurzeln können Spannungen bis zu 1 MPa ausüben.⁴⁶

Durch Stoffwechselprodukte von biologischen Organismen, wie zum Beispiel Oxalsäuren, können Mauerwerkssteine zersetzt werden. Dieser Prozess findet jedoch nur an der Oberfläche der Steine statt und ist nicht relevant für das Systemverhalten.

Randbedingungen

Randbedingungen für die biologische Verwitterung sind folgende:

- Portalnähe (Vorhandensein von Tageslicht)
- Überlagerung (Vorhandensein von Wurzeln)
- Mikroklima
- Zusammensetzung der Mauersteine
- Chemismus des vorhandenen Wassers

4.3.3.3 Langzeitverhalten Gebirge

Beschreibung

Das Langzeitverhalten von Gebirge bestimmt in wesentlichem Ausmaß die Veränderungen des Spannungszustands im Bereich der Tunnelschale während der Alterung eines Tunnels. Neben Quellen und Schwellen ist vor allem auch noch die sukzessive Auflockerung des Gebirges zu beachten.

Mechanismen und Schadensbilder

⁴⁵ Rohabsch, A.: Verwitterung von Naturstein, in: Österreichische Bauzeitung, Ausgabe 19, Seite 33-36, 2004

⁴⁶ Suda J., Hübl J.: Schäden und Schadmechanismen an Schutzbauwerken der Wildbachverbauung, in: Wildbach- und Lawinenverbau, 71. Jg., Heft Nr. 155, 2007

Während die Prozesse Quellen und Schwellen bereits weitgehend bekannt sind, wurden über Jahrzehnte fortschreitende Spannungsumlagerungen und Auflockerungen noch unzureichend erforscht.

Quellen⁴⁷

Als Quellen wird die Volumszunahme eines Gesteins infolge einer Spannungsverminderung und einer physikalisch-chemischen Reaktion mit Wasser bezeichnet. Wird diese Volumszunahme durch den Ausbaustützdruck eines Tunnelgewölbes behindert, baut sich ein Quelldruck auf das Gewölbe auf. Grund dafür ist die osmotische Anziehung des Wassers durch die Oberfläche der Tonteile, welche beim Entlastungsvorgang durch Auflockerung des Gebirges entsteht. Folgende Tonminerale führen zu einem erhöhten Quellpotential des anstehenden Gebirges:

- Montmorillonit
- Mixed-Layer Minerale:
 - Illit/Montmorillonit
 - Chlorit/Smektit
 - Chlorit/Vermiculit

Nicht quellfähige Tonminerale sind beispielsweise:

- Illit
- Kaolinit

Das Tonquellen ist ein reversibler Prozess. Das Wasser welches durch das Quellen im Gestein angelagert wurde, kann wieder ausgepresst werden. Dazu ist derselbe Druck nötig, welcher bei der Anlagerung des Wassers entstand. Im Labor kann dieser Druck bis zu 2 MPa erreichen⁴⁸.

Schwellen⁴⁷

Die Volumszunahme aufgrund von Gipswachstum wird meist als Schwellen bezeichnet. Weisen zirkulierende Wässer eine genügend hohe Sulfatkonzentration auf, so kann unter Anwesenheit von Calcium Ionen Gips ausfallen. Besonders anfällig für eine solche Gipsbildung ist anhydrithaltiges Gestein. Durch die Auflösung des Anhydrits durch Wasser werden Sulfationen frei. Ausmaß und Geschwindigkeit dieses Prozesses hängen von Temperatur, Umgebungsdruck und dem Chemismus der zirkulierenden Wässer ab. Der thermodynamisch berechnete, theoretische

⁴⁷ Hauber, Jordan, Madsen, Nüesch, Vögtli: Tonminerale und Sulfate als Ursache für druckhaftes Verhalten von Gesteinen, Forschungsauftrag 55/92 und 52/96 auf Antrag des Bundesamtes für Strassenbau, Geologisch-palaeontologisches Institut Universität Basel, Oktober 2005

⁴⁸ Kolymbas D.: Geotechnik, 2., korrigierte und ergänzte Auflage, Springer, 2007

Schwelldruck beträgt bei diesem Prozess etwa 20 MPa. Im Labor werden Schwelldrücke bis zu 7 MPa erreicht⁴⁸.

Erfahrungen zeigen, dass massive, ungeklüftete und tonarme Anhydritgesteine mittelfristig kaum Schwellerscheinungen aufweisen. Anfällig sind vor allem tonhaltige Sulfatgesteine in denen es zu kombinierten Tonquellen und Schwellen kommt. Diesbezüglich ist auf die weitverbreiteten Wechsellagerungen von Anhydrit und dolomitischem Mergel besonderes Augenmerk zu legen. Aufgrund des Tonquellens kommt es zu einer erhöhten Zerklüftung des meist dichten Anhydritgesteins. Dadurch kommt es oft zu einer erhöhten Wasserwegigkeit.

Langfristige Spannungsänderungen im Gebirge

Für eine grobe Einschätzung des Systemverhaltens beim Bau eines Tunnels wird oft das Kennlinienverfahren angewandt. Dieses Verfahren kombiniert die Gebirgskennlinie nach Pacher⁴⁹ mit einer Ausbaukennlinie. Die Ausbaukennlinie beschreibt das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung der Stützmittel, ausgehend von der Verformung des Hohlraums. Schneiden sich diese beiden Linien, kann von einem Gleichgewicht zwischen Gebirgsdruck und Stützdruck ausgegangen werden.⁵⁰

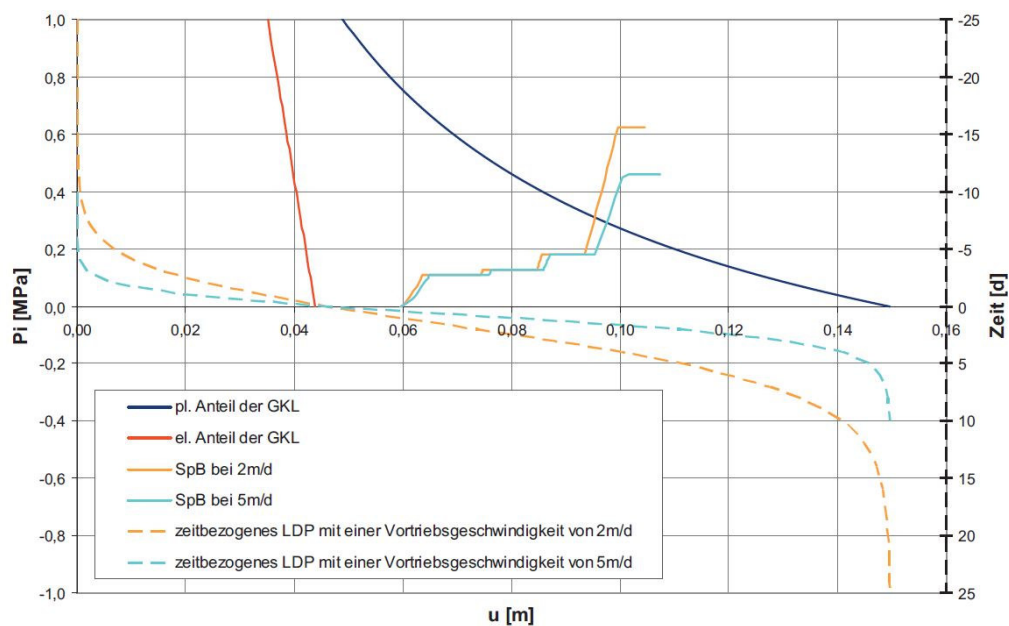


Abbildung 27 - Kennlinienverfahren - stabiler Zustand⁵⁰

⁴⁹ Pacher, F.: Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues, in: Felsmechanik, 1964

⁵⁰ Kainrath-Reumayer S., Gschwandtner G., Galler R.: Das Kennlinienverfahren als Hilfsmittel für die Bemessung von tiefliegenden Tunnelbauwerken, in: Geomechanics and Tunneling, 2009

Wie sich das beim Kennlinienverfahren dargestellte Systemverhalten langfristig entwickelt ist derzeit noch weitgehend unbekannt. Eine langfristige Entfestigung des anstehenden Gebirges und somit eine Erhöhung des Drucks auf die Schale wird nicht berücksichtigt. Bezüglich der langfristigen Änderungen des Gebirgsdrucks, besonders bei alten Tunnel mit möglichen Hohlräumen hinter der Mauerwerksschale, besteht demnach noch Forschungsbedarf.

Schäden, welche durch einen erhöhten Druck auf das Gewölbe entstehen können sind beispielsweise Längsrisse, wie in Abbildung 28 dargestellt, Profilversätze an Blockfugen oder radiale Verformungen, wie in Abbildung 29 dargestellt oder auch Absandungen, wie bereits in Abbildung 24 dargestellt.



Abbildung 28 - Beispiel für Längsriss⁵¹

⁵¹ Gesellschaft für Baugologie und -meßtechnik mbH – Baugrundinstitut, UIC Working Group "Tunnel Maintenance", Katalog von Schäden und ihren Ursachen in alten Tunneln, 2003

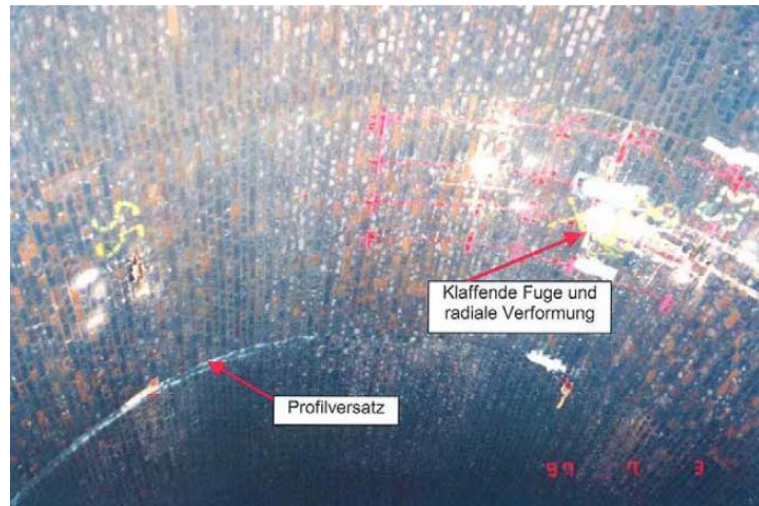


Abbildung 29 - Beispiel für Profilversatz und radiale Verformung⁵¹

Randbedingungen

Verantwortlich für das Langzeitverhalten des Gebirges sind Parameter, welche im Allgemeinen unter dem Gebirgsverhalten gemäß ÖGG Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb zusammengefasst werden. Das Gebirgsverhalten wird unter anderem durch folgende Randbedingungen bestimmt⁵²:

- Gebirgsart - Diese ist im Wesentlichen abhängig von den geotechnisch relevanten Eigenschaften des Gebirges
- Bergwasserverhältnisse
- Räumliche Orientierung der Trennflächen
- Örtlicher Spannungszustand

Weiters ist das Langzeitverhalten des Gebirges abhängig von langfristigen Einflüssen und deren Auswirkungen auf das Gebirge. Beispielsweise können in Gipskeupern Hohlräume ausgewaschen werden. Die dafür notwendigen Wasserwegigkeiten könnten unter anderem auch durch den Bau des Tunnels geschaffen worden sein. Die Folge von solchen Hohlräumen könnten Entfestigungen des Gebirges sein.

4.3.3.4 Versinterung Entwässerungssystem

Beschreibung

Aufgrund der Ablagerung von Kalk, auch Kalziumkarbonat, im Entwässerungssystem eines Tunnels, kann deren Funktionsfähigkeit eingeschränkt werden oder gänzlich verloren gehen.

⁵² Österreichische Gesellschaft für Geomechanik: Richtlinie für die geomechanische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb; 2. überarbeitete Auflage; 2008

Randbedingungen⁵³

Grund für die Ablagerung von Kalk ist das Vorhandensein von gelöstem Kalzium und Karbonat im Wasser. Das Karbonat kann entweder aus dem Bergwasser oder von atmosphärischem CO₂ stammen. Kalziumquellen können das Gebirge oder der Ausbau selbst sein. Beim Einsatz von Zementösen Baustoffen (z.B. Spritzbeton, Injektionen, Ankermörtel) beim Neubau oder infolge von Instandsetzungen kann das Kalzium auch aus der Auflösung von Portlandit stammen.

Mechanismen und Schadensbilder

Ist die maximale Löslichkeit der Produkte im Wasser erreicht, fällt Kalk aus dem Wasser aus und lagert sich in den Drainageeinrichtungen ab. Die Minerale Bruzit und Aragonit sind nur selten Bestandteile der Ablagerungen.⁵³

Betroffen von der Versinterung sind alle Teile des Entwässerungssystems. Diese werden in Kapitel 4.3.2.4 und in Kapitel 4.3.4.7 erläutert.

Die Folgen der Versinterung solcher Einbauten sind vielfältig:

- Erhöhte Alterung des Gewölbes aufgrund von gestautem Wasser in der Sohle (siehe Kapitel 4.3.3.1 – kapillare Wasseraufnahme)
- Erhöhter Wasserdruck auf das Gewölbe durch Aufspiegelung des Grundwassers
- Verschlechterung des Gebirgsverhalten
- Wasserzutritte in den Hohlraum mit Eisbildung im Winter

4.3.4 Vorangegangene Instandsetzungen und andere Arbeiten am Gewölbe

Beschreibung

Ein Tunnelbauwerk wird über die Zeit hinweg, mitunter zahlreichen Instandsetzungsmaßnahmen ausgesetzt, welche das Bauwerk selbst und das Systemverhalten verändern. Manche Maßnahmen, wie zum Beispiel eine Fugenerneuerung, haben einen positiven Einfluss auf das Systemverhalten, andere Maßnahmen, wie zum Beispiel Querschnittsaufweitungen mit Schwächung des Mauerwerks, können einen destabilisierenden Einfluss auf das Systemverhalten haben. Dies wird in Kapitel 4.3.4.4.

Im Folgenden werden die einzelnen Maßnahmen beschrieben und mögliche Auswirkungen auf das Systemverhalten erläutert.

⁵³ Dietzel M., Rinder T., Niedermayr A. et al.: Ursachen und Mechanismen der Versinterung von Tunnel drainagen, in: BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Vol. 153, Issue 10, Seite 369-372, October 2008

4.3.4.1 Ankerungen

Beschreibung

Die Gründe für Ankerungen können vielfältig sein. Als Zugelemente können sie die Tragfähigkeit des Gebirges und gleichzeitig den Ausbauwiderstand erhöhen. Aus diesem Grund sind sie besonders gut geeignet um einen eventuellen Tragfähigkeitsverlust durch Profilierungsmaßnahmen im Vorhinein auszugleichen. Weiters kann das Gewölbe sowie eine nachträglich eingebrachte Spritzbetonschale mit dem Gebirge vernagelt werden.

Auswirkungen

Eine mögliche, destabilisierende Auswirkung der Einbringung von Ankern ist deren Korrosion, besonders im Bereich der Mauersteine. Werden die Anker nicht vollständig injiziert, kann dies, durch die Volumszunahme bei der Oxidation, zu Schäden am Mauerwerk führen. Weiters wird das Mauerwerk durch das Bohren der Anker geschädigt. Solche Schäden sind nur sehr kleinräumig zu erwarten und wirken sich deshalb, mit hoher Wahrscheinlichkeit, nicht auf das Systemverhalten aus. Bei Einsatz von zementösen Ankermörtel kann es zu Veränderungen von Wasserwegigkeiten und zu einer Erhöhung des Versinterungspotentials der Entwässerungselemente kommen.

Eine positive Auswirkung von singulären Ankern kann die Sicherung von bestimmten Bauteilen oder Gesteinsblöcken hinter der Schale sein. Wird beispielsweise eine bewehrte Spritzbetonschale auf einer Natursteinmauerung aufgebracht und durch Anker mit der Ausmauerung und dem dahinterliegenden Gebirge vernagelt, ist die Schale durch die Ausmauerung mit dem Gebirge verbunden. Auch wenn die Tragfähigkeit durch einzelne Anker nur untergeordnet verbessert wird, kann durch die Kombination von Ankern und einer bewehrten Spritzbetonschale ein Ablösen von einzelnen Teilen der Ausmauerung hintangehalten werden und somit die Gebrauchstauglichkeit sichergestellt werden.

Anders als singuläre Anker, hat eine Systemankerung einen wesentlichen, positiven Einfluss auf die Tragfähigkeit eines Tunnelbauwerks. Durch eine systematische Gebirgsvergütung und einhergehender Erhöhung des Ausbauwiderstands, wird die Tragwirkung des Gebirges verstärkt.⁵⁴

Randbedingungen

Die Randbedingungen von Ankerungen sind folgende:

- Art des Ankers (Verpressanker, Freispielanker,...)
- Ankerraster

⁵⁴ Girmscheid G.: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau; Ernst & Sohn; 2000

- Länge der Anker

4.3.4.2 Injektionen

Beschreibung

Injizieren ist das Verfüllen von Rissen, Fugen und Hohlräumen mit einem Füllstoff. Je nach Füllstoff wird dadurch das injizierte Gefüge verfestigt und, oder abgedichtet. Es gibt etliche Arten von Injektionen. Einige sind folgend angeführt:

- Verfestigungsinjektion
- Abdichtungsinjektion
- Auffüllinjektion
- Aufbruchinjektion
- Verdichtungsinjektion

Je nach Ziel der Injektion wird eines dieser Verfahren gewählt. Zusätzlich ist ein geeignetes Injektionsgut zu wählen.

Im Zusammenhang mit Tunnelanierungen werden hauptsächlich folgende Injektionsarbeiten durchgeführt:⁵⁵

- *Injektionen zur Baugrundverbesserung durch Einpressen von Injektionsgut in das Gebirge oder zwischen Ausbau und Gebirge (Packlage)*
- *Injektionen zum Verfüllen von kleineren Hohlräumen und offenen Fugen als kurz- bis mittelfristige Abdichtung*
- *Injektionen der Böden*

Auswirkungen

Die Auswirkungen von Injektionen sind je nach Injektionsart unterschiedlich. Zu beachten ist auf jeden Fall eine mögliche negative Auswirkung auf die Entwässerungselemente. Diese können durch eindringendes Injektionsgut verstopft werden. Langfristig sind Ablagerungen von gelösten Stoffen aus Injektionen mit Zementsuspensionen möglich.

Ziele der Injektionen:

- Erhöhung der Bettung hinter der Ausmauerung (vor allem im Kämpferbereich)
- Erhöhung des Verbunds Ausmauerung mit Gebirge und Hinterpackung
- Verbesserung des Gebirgsverhaltens durch Verpressen von offenen Klüften
- Unterbinden von ungünstigen Wasserwegigkeiten

⁵⁵ UIC-Kodex 779-10: Grundsätze für die Verwaltung und Instandhaltung bestehender Eisenbahntunnel; 2. Ausgabe; September 2012

- Aufbringen eines Drucks auf Gewölbe und somit Erhöhung des „Stein zu Stein“ – Verbundes

Wird das anstehende Gebirge mithilfe einer Verfestigungsinjektion verbessert, so erhöht dies die Tragfähigkeit des Systems Schale-Gebirge. Auch eine eventuell dazwischenliegende Hinterpackung kann verfestigt werden.

Hinter der Schale befindliche Hohlräume beeinflussen die Tragfähigkeit des Gewölbes negativ. Diese können mithilfe von Auffüllinjektionen verfüllt werden. Auf diese Weise kann ein durchgehender Verbund zwischen Gebirge und Schale hergestellt werden.

Randbedingungen

Die Randbedingungen einer Injektion sind folgende:

- Art der Injektion
- Injektionsdruck
- Injektionsgut (vor allem mineralisch, Harze, Schäume)
- Geometrie des injizierten Bereichs
- Menge des eingebrachten Injektionsguts

4.3.4.3 Profilaufweitung mit Beeinflussung des anstehenden Gebirges

Beschreibung

Einige der Gründe, welche eine Profilaufweitung erfordern können beispielsweise folgende sein:⁵⁵

- Geänderte Anforderungen an das Lichtraumprofil. Zum Beispiel wurde im Zuge der Einführung der „rollenden Landstraße“ in vielen Tunnel das sogenannte „ROLA-Eck“, ein Eck in den Kämpfern, aufgeweitet. Weiters vergrößerte sich das erforderliche Lichtraumprofil durch die Elektrifizierung der Strecken um das Bügelprofil.
- Geänderte Anforderungen an die Sicherheit, wie zum Beispiel Fluchtwege.
- Betriebliche Einbauten.
- Aerodynamische Erfordernisse aufgrund erhöhter Geschwindigkeiten.
- Aufweitung nach vorheriger Verdrückung des Gewölbes.

Wird bei einer Profilaufweitung die gesamte Mauerung, nicht nur ein Teil davon, entfernt, so kann das dahinterliegende Gebirge maßgeblich negativ beeinflusst werden. Durch den Entfall des Ausbaustützdrucks, wenn auch nur sehr kurzfristig, kann sich das Gebirge auflockern.

Weiters kann der nachträgliche Ausbruch von Nischen das Systemverhalten beeinflussen.

Auswirkungen

Eine Simulation einer solchen Auflockerung ist sehr komplex, da das System eine sehr umfangreiche Vorgeschichte aufweist. Bis dato unbekannt sind die Auflockerungen und Spannungsumlagerungen aufgrund der gewählten alten Bauweisen, wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Weiters ist das Langzeitverhalten des Gebirges, bei Betrachtung eines Zeitraums von über 100 Jahren, weitgehend unbekannt.

Randbedingungen

Bei der Profilaufweitung mit Beeinflussung des anstehenden Gebirges sind, je nach angewandter Vortriebsmethode, die Randbedingungen ähnlich jenen eines zyklischen oder kontinuierlichen Vortriebs. Die Einflussfaktoren für das Systemverhalten bei einem zyklischen Vortrieb sind gemäß ÖGG Richtlinie folgende⁵⁶:

- *das Gebirgsverhalten*
- *die Form, Größe und Unterteilung des Ausbruchsquerschnittes*
- *die Abschlagslänge*
- *die Lösemethode*
- *der räumliche Spannungszustand*
- *das Bergwasser*
- *die räumliche Entwicklung des Bauablaufes*
- *Stützmittel, soweit diese das Verhalten im Ausbruchsbereich beeinflussen*

4.3.4.4 Profilaufweitung ohne Beeinflussung des anstehenden Gebirges

Beschreibung

Bei geringfügigen Aufweitungen reicht es oftmals aus, nur einen Teil des Gewölbes zu entfernen. Dabei sind jedoch in der Regel vorausseilende Stützmaßnahmen, wie zum Beispiel Ankerungen oder Injektionen, notwendig. Gründe für solche Aufweitungen können dem vorigen Kapitel, Kapitel 4.3.4.3 entnommen werden.

Auswirkungen

Durch die Schwächung der Schale erhöht sich die Spannung im geschwächten Querschnitt. Die Größe der Spannungen ist, aufgrund der sehr komplexen Vorgeschichte des anstehenden Gebirges, nur sehr schwer zu kalkulieren. Weiters

⁵⁶ Österreichische Gesellschaft für Geomechanik: Richtlinie für die geomechanische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb; 2. überarbeitete Auflage; 2008

weist das Gewölbe selbst sehr inhomogene Festigkeitseigenschaften auf. Gründe dafür sind unter anderem die unregelmäßige Verteilung der Randbedingungen der Alterung und die Heterogenität der Materialien selbst. Solange die Tragfähigkeit des Gewölbes gewährleistet ist, sind die Verformungen welche das anstehende Gebirge beeinflussen könnten, vernachlässigbar gering.

Randbedingungen

Die Randbedingungen einer solchen Profilaufweitung ohne Beeinflussung des anstehenden Gebirges sind folgende:

- Spannungszustand im Gewölbe vor der Profilaufweitung
- Zustand des Gewölbes vor der Profilaufweitung
- Dynamische Belastung des Gewölbes aufgrund der Profilaufweitungsmaßnahmen
- Verhältnis Abtragstiefe zu Schalendicke
- Geometrie der Schalenschwächung (Größe, Lage)
- Vorab eingebrachte Sicherungsmaßnahmen

4.3.4.5 Dichtputz- oder Spritzbetonauftrag

Beschreibung

Als Dichtputz wird im Wesentlichen der flächige Putzauftrag im Firstbereich verstanden, welcher im Zuge der Elektrifizierung zur Vermeidung von Wasserzutritten händisch aufgebracht wurde. Der Dichtputz ist meist ohne Bewehrung oder Ankerungen ausgeführt.

Spritzbeton wurde und wird bei Tunnelinstandsetzungen bewehrt oder unbewehrt vor allem für folgende Maßnahmen angewendet:

- Flächige Sicherung von Gewölbebereichen mit hohem Potential für Ablösungen von Mauerwerksteilen.
- Vergütung von Abtragsbereichen wie zum Beispiel dem Rola-Eck.
- Fixierung und Schutz von eingebauten Entwässerungs- oder Tragelementen im Gewölbebereich.
- Abdichtung von Gewölbebereichen.

Auswirkungen

Für das Systemverhalten hinsichtlich Tragfähigkeit des Bauwerks, ist der Dichtputz- oder dünne Spritzbetonauftrag mit hoher Wahrscheinlichkeit unbedeutend. Lediglich die, im Zuge dieser Maßnahme, eingebrachten Anker wirken sich stabilisierend auf das Systemverhalten aus. Dies wird in Kapitel 4.3.4.1 beschrieben.

Hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit hat der Dichtputz- und/oder Spritzbetonauftrag grundsätzlich eine verbessernde Wirkung. Allerdings kann es gerade bei Spritzbeton und Dichtputz, welcher vor über 20 Jahren aufgebracht wurde wiederum zu Ablöseerscheinungen kommen.

Randbedingungen

Die Wirkung eines Dichtputz- oder Spritzbetonauftrags ist im Wesentlichen von folgenden Punkten abhängig:

- Alter des Dichtputz bzw. Spritzbetonauftrags
- Fläche und Lage des Auftrags wie zum Beispiel Firstbereich oder Lage zum Portal
- Dicke des Auftrags
- Tragelemente im Auftrag wie zum Beispiel Bewehrung, Gitter, Anker, Dübel
- Vorbehandlung des Untergrunds vor Auftrag beispielsweise durch Wasserstrahlen
- Geologie, Bergwasserzutritte und dessen Chemismus
- Baustoffzusammensetzung

4.3.4.6 Fugenerneuerung

Beschreibung

Bei einer Fugenerneuerung in einem Mauerwerkstunnel wird schadhafter oder verwitterter Fugenmörtel zuerst entfernt. Im Anschluss wird die Fuge wieder von Hand oder maschinell mit Fugenmörtel verfüllt. Ziel dabei ist die Dichtigkeit und Tragfähigkeit des Gewölbes zu erhalten. Nimmt der Fugenquerschnitt durch Verwitterung oder andere Einflüsse ab, so führt dies unweigerlich zu einer erhöhten Spannung in der Fuge. Weiters wird durch ausbrechende Fugen zusätzliche Oberfläche am Mauerwerk freigelegt. Außerdem können zusätzliche Wegigkeiten geschaffen werden, über welche Wasser ins Mauerwerk und in den Hohlraum eindringen kann.

Auswirkungen

- Wasserwegigkeiten durch das Mauerwerk und einhergehende Auswirkungen auf das Mauerwerk können reduziert werden. (siehe Kapitel 4.3.3.1)
- Ein positiver Effekt einer Fugenerneuerung kann auch eine verringerte Wasseraufnahmefähigkeit des Mauerwerks sein. Poröse Fugenmörtel können die kapillare Wasseraufnahme des Mauerwerks begünstigen. Durch eine Fugenerneuerung werden die Fugen abgedichtet. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Wasser, welches durch durchfahrende Züge in den Tunnel eingetragen wird und Wasser, welches an der Tunnellaibung kondensiert.
- Ein weiterer positiver Effekt kann die gleichmäßigere Verteilung der Spannungen im Gewölbe sein. Fugenausbrüche führen zu ungünstigen

Spannungsverhältnissen. Nicht nur in der Fuge selbst, sondern auch in den angrenzenden Mauersteinen. Durch eine Vergrößerung der Fugenquerschnittsfläche wird die zu übertragende Normalkraft im Mauerwerk auf eine größere Fläche verteilt. Dadurch kann die Spannung in der Fuge abnehmen. Auch können etwaige Zugspannungen und, oder Spritzendruck in den angrenzenden Mauersteinen reduziert werden.

- Allerdings könnte es durch eine höhere Steifigkeit des neu aufgetragenen Mörtels auch zu ungünstigen Spannungsverteilungen kommen. Dies wird in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** veranschaulicht. Durch außenliegende Auflager kommen Zugspannungen im Mauerstein zustande.⁵⁷

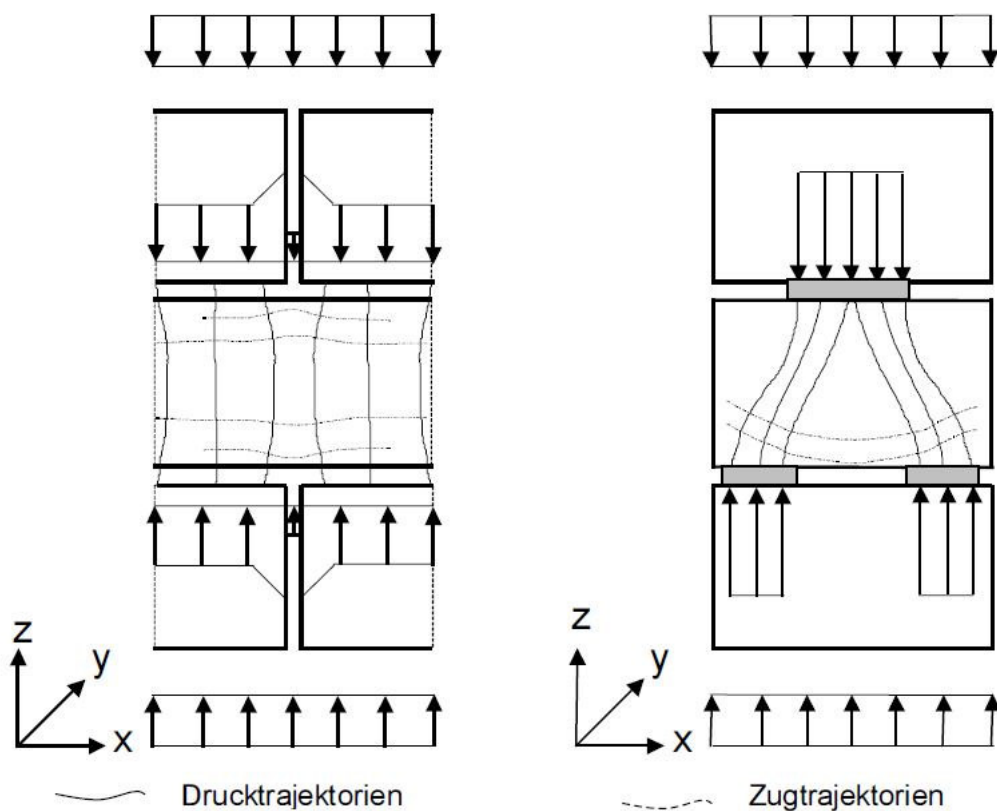


Abbildung 30 - Zugspannungen im Stein, ausgelöst durch Stoßfuge und unvollständig vermörtelte Lagerfuge⁵⁷

Randbedingungen

Die Wirkung einer Fugenerneuerung ist im Wesentlichen von folgenden Punkten abhängig:

⁵⁷ Huster, U.: Tragverhalten von einschaligem Natursteinmauerwerk unter zentrischer Druckbeanspruchung; Dissertation an der Universität Gesamthochschule Kassel; April 2000

- Zusammensetzung und Eigenschaften des Mörtels. Durch die Wahl des Mörtels können Druckfestigkeit, Steifigkeit, Wasserdampfdiffusionswiderstand, Beständigkeit gegen erneute Verwitterung und andere Eigenschaften gesteuert werden.
- Weiters kann die Art und Weise der Aufbringung des Mörtels die Auswirkungen einer Fugenerneuerung beeinflussen. Hier ist vor allem die Verteilung des neuen Mörtels in der Fuge und der zeitliche und räumliche Ablauf von Herauslösen des alten Mörtels, Einbringen und Aushärtung des neuen Mörtels von Interesse.

4.3.4.7 Nachträgliche Entwässerungsmaßnahmen

Beschreibung

Da es bei alten Natursteinmauerwerkstunneln praktisch nicht möglich war diese druckwasserhaltend zu gestalten, muss die druckfreie Ableitung der Bergwässer ständig gewährleistet sein. Der Aufbau eines Wasserdrucks auf das Mauerwerk kann, besonders wenn dieser asymmetrisch auf das Gewölbe wirkt, zu Tragfähigkeitsproblemen führen. Aus diesem Grund wurden und werden in betroffenen Tunneln nachträgliche Entwässerungsmaßnahmen durchgeführt. Entwässerungselemente, welche oft verbaut werden sind:

- Sohl- und Ulmendrainagen
- gebundene oder ungebundene Sickerpackungen
- Abschlauungen, Halbschalen, Flächendrainagen hinter Spritzbetonschalen
- Entlastungsbohrungen und sonstige Wasserableitungselemente

Auswirkungen

Die Auswirkungen sind durch die Vielzahl der möglichen Systeme verschieden. Ziel einer nachträglichen Entwässerungsmaßnahme ist in jedem Fall eine kontrollierte und effektive Ableitung der Bergwässer. Dadurch ist eine Verlangsamung der Alterung aufgrund von Bergwasser zu erwarten.

Zu beachten ist jedoch, dass durch Entlastungsbohrungen und andere neu geschaffene Wasserwegigkeiten das Auswaschen von Feinanteilen im Baugrund eine potentielle Tragfähigkeitsgefährdung darstellen kann, welche durch ein, dem anstehenden Gebirge angepasstes, Entwässerungssystem hintanzuhalten ist.

Randbedingungen

Die Randbedingungen des Einflusses „Nachträgliche Entwässerungsmaßnahmen“ sind zum einen die Zusammenwirkung der verbauten Systeme mit den Bauelementen des Tunnels samt anstehendes Gebirge und zum anderen die Bergwasserverhältnisse.

Das Zusammenwirken der Systeme mit den anderen Bauelementen des Tunnels kann durch eine Abstimmung aufeinander sichergestellt werden. Werden beispielsweise Entlastungsbohrungen durchgeführt und das daraus anfallende Wasser nicht abgeleitet, kann dies den Zustand des Bauwerks verschlechtern.

Bergwasserverhältnisse schließen unter anderem den Volumenstrom, den Druck, die Zusammensetzung und den Chemismus des Grundwassers mit ein. Diese Randbedingungen beeinflussen die Wirkung der Entwässerungsmaßnahmen wesentlich.

4.3.4.8 Sohlerneuerung / Ringschluss

Beschreibung

Als Sohlerneuerung werden im Folgenden verbessernde Maßnahmen im Sohlbereich bezeichnet. Solche Maßnahmen können aus einem oder mehreren der folgenden Gründe erfolgen:

- Herstellung eines nachträglichen Ringschlusses zur Erhöhung des Ausbauwiderstandes und Verbesserung der Tragfähigkeit.
- Verbesserung der Tragkonstruktion für den Oberbau.
- Erneuerung der Entwässerungselemente im Sohlbereich beziehungsweise Einbau zusätzlicher Entwässerungselemente wie zum Beispiel Drainagen.
- Abdichtung des Sohlbereichs zur Vermeidung, beziehungsweise Reduktion von Bergwasserzutritten aus der Sohle oder Wasserzutritte vom Tunnelhohlraum ins anstehende Gebirge zum Verhindern von Quell- und Schwellerscheinungen.

Bei einer Sohlerneuerung mit oder ohne Ringschluss werden zuerst, wenn nötig, vorausseilende Sicherungsmaßnahmen durchgeführt. Diese können Injektionen zur Verbesserung der Bettung, Ankerungen oder Unterfangungen der Widerlager sein. Im Anschluss erfolgt der Sohlaushub und, wenn erforderlich, der Einbau einer Sohlplatte oder eines Sohlgewölbes.

Auswirkungen

- Durch die Herstellung eines Ringschlusses wird im Wesentlichen der Ausbauwiderstand des Gewölbes erhöht. Eine Sohlerneuerung hat meist eine Reduzierung der Beeinträchtigungen der Gebrauchstauglichkeit des Oberbaus zum Ziel.

Weiters kann die Ableitung der Bergwässer durch eine eingebaute Sohlplatte oder einem Sohlgewölbe verbessert werden, sofern hierfür Entwässerungselemente, wie beispielsweise Drainagen, verbaut wurden. Ist dies nicht der Fall, kann die Tragfähigkeit durch einen sich aufbauenden Wasserdruck auf die Sohle verringert werden.

Randbedingungen

Die Randbedingungen einer Sohlerneuerung sind folgende:

- Vorab eingebracht Sicherungsmaßnahmen
- Geometrie und Umfang des zusätzlichen Sohlaushubs
- Geometrie, Aufbau und Qualität der Baustoffe der neuen Sohle
- Ausführung der Sohle und des Anschlusses an das Widerlager bzw. Gewölbe
- Räumlicher und zeitlicher Ablauf der Maßnahme

4.3.5 Betrachtete, umfangreiche Instandsetzung oder Erneuerung

Beschreibung

Die betrachtete, umfangreiche Instandsetzung oder Erneuerung stellt die Maßnahme dar, für welche das Systemverhalten ermittelt werden soll. Im Idealfall findet diese Maßnahme nach mehr als 150 Jahren nach dem Bau des Tunnelbauwerks, der Nutzungsdauer österreichischer Eisenbahntunnel, statt.

Als umfangreiche Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen werden in dieser Arbeit Maßnahmen am Gewölbe bezeichnet, welche temporär oder permanent die Dicke der Ausmauerung reduzieren.

Dadurch ist auch eine Reduktion der Tragfähigkeit des Bauwerks am Ort und für die Dauer der Arbeiten zu erwarten. Aus diesem Grund müssen für die Zwischenbauzustände genügend Tragfähigkeitsreserven eingeplant, oder mithilfe von vorausseilenden Maßnahmen geschaffen werden. Mögliche vorausseilende Sicherungsmaßnahmen sind beispielsweise das Einbringen einer Systemankerung, Injektionen oder Stahlbetonrippen.

Einflüsse

Die Einflüsse der umfangreichen Instandsetzung oder Erneuerung sind folgende:

- Verhältnis Abtragstiefe zu Schalendicke
- Geometrie der Schalenschwächung (Größe, Lage)
- Vorab eingebrachte Sicherungsmaßnahmen
- Zeitraum von Schalenschwächung bis Stützung
- Geänderte Geometrie

Diese Einflüsse sind im Rahmen der Planung der Instandsetzung oder Erneuerung zu berücksichtigen.

5 Beschreibung der Degradation

5.1 Grundlagen

In dieser Arbeit wird unter dem Begriff „Degradation“ der Verlust für die Gebrauchstauglichkeit oder Tragfähigkeit relevanter Material- oder Bauteileigenschaften verstanden. Mit Hilfe von Degradationskurven kann die „Alterung“ und somit Reduktion der Eigenschaften von einzelnen Materialien, wie zum Beispiel dem Mörtel, beziehungsweise ganzen Bauteilen, wie dem Mauerwerk eines Tunnels, unter bestimmten Randbedingungen über die Zeit beschreiben werden. Eine solche Kurve ist in Abbildung 31 als Beispiel dargestellt.

Ziel ist es, aufgrund einer möglichst genauen Vorhersage der Degradation der Elemente eines Tunnels, unter bestimmten Randbedingungen den erforderlichen Instandsetzungsbedarf möglichst frühzeitig abschätzen zu können. Eine Vorlaufzeit von über 10 Jahren vor der erforderlichen Instandsetzung ist anzustreben, damit Ressourcen und erforderlichen Streckensperren, etc. rechtzeitig geplant werden können.

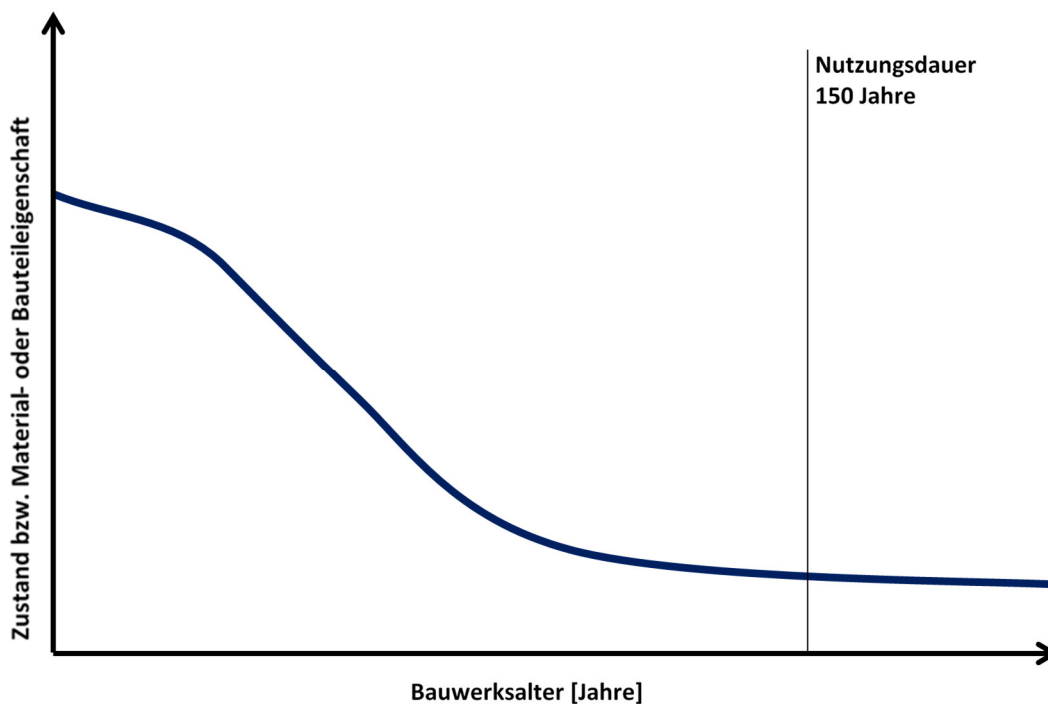


Abbildung 31 - Beispiel für Degradationskurve⁵⁸

⁵⁸ Robert Matt, Instandhaltungskordinator und Fachreferent Tunnelbau, ÖBB Infrastruktur AG

Ausgehend von bestimmten Material- oder Bauteileigenschaften kommt es, in Abhängigkeit von Randbedingungen wie dem Mikroklima, zu einem Verlust der Gebrauchstauglichkeit oder Tragfähigkeit des Tunnelbauwerks. Indirekt werden diese Eigenschaften durch Zustandsnoten dokumentiert. Zustandsnoten sind zusammenfassende Beurteilungen des Tunnelzustands und werden im Zuge von Inspektionen in bestimmten Zeitintervallen durch Tunnelexperten vergeben. Bei österreichischen Eisenbahntunnel mit einem Baujahr vor 1980 werden diese Zustandsnoten mindestens alle 4 Jahre vergeben. Die Zustandsnoten beziehen sich allerdings jeweils auf den ungünstigsten Bereich des Tunnels.

Abhängig von den Einflüssen und deren Randbedingungen während den in Kapitel 4.1 beschriebenen Phasen, verändert sich die Größe der Eigenschaften mit dem Bauwerksalter. Bei günstigen Einflüssen und Randbedingungen wird die Degradation langsamer voranschreiten. Die Kurve ist in diesem Fall flacher als bei ungünstigen Einflüssen und Randbedingungen, welche eine schnellere Degradation bedingen.

Aufgrund der Heterogenität der verbauten Materialien und der Einflüsse in alten Mauerwerkstunnel, ist es für die praktische Anwendung dieser Methodik zweckmäßig, die Degradation auf bestimmte Randbedingungen zu beziehen und die Kurve als Bereich anzugeben. Die tatsächliche Größe der Eigenschaft kann in einer ersten Überlegung als Normalverteilung in diesem Bereich angegeben werden.

Abbildung 32 dient als Beispiel für die Degradation der Druckfestigkeit von Mauersteinen. Die grüne Fläche zeigt einen möglichen statistischen Bereich der Degradation und die, gemäß Normalverteilung, wahrscheinlichste Degradationskurve unter den betrachteten Randbedingungen. In diesem Fall wird von Randbedingungen ausgegangen, aufgrund derer Einflüsse wie die Verwitterung nur wenig Auswirkung auf die Festigkeit haben.

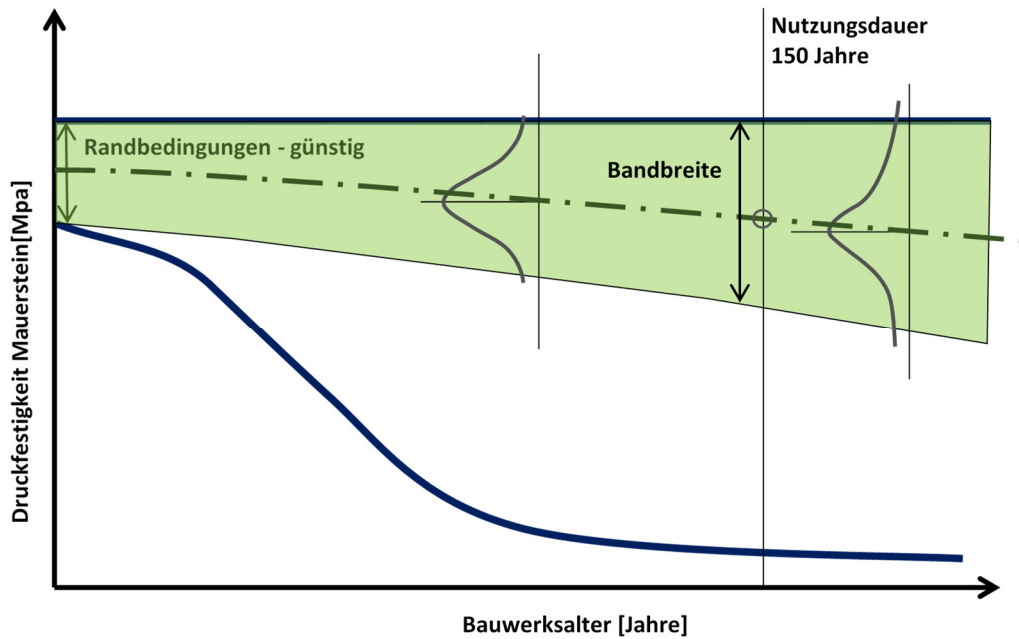


Abbildung 32 - Degradation Druckfestigkeit Mauersteine - günstige Randbedingungen⁵⁸

Abbildung 33 wiederum, zeigt dasselbe Beispiel für Randbedingungen aufgrund derer Einflüsse wie die Verwitterung eine größere Auswirkung auf die Druckfestigkeit der Mauersteine haben als im vorigen Beispiel.

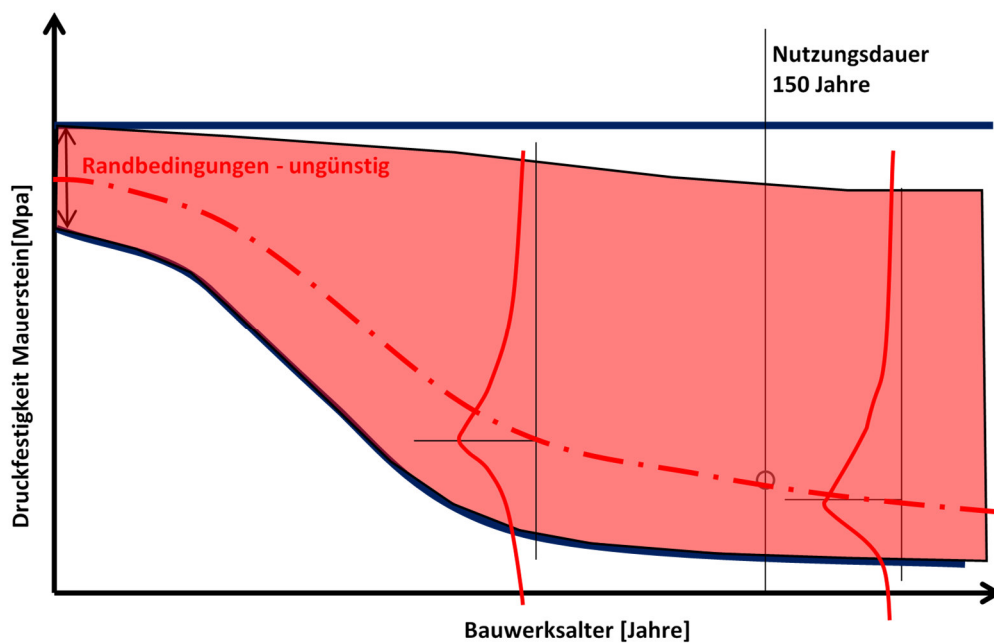


Abbildung 33 - Degradation Druckfestigkeit Mauersteine - ungünstige Randbedingungen⁵⁸

Unter Zugrundelegung solcher Degradationsbereiche und -kurven, können Material-, beziehungsweise Bauteileigenschaften in Abhängigkeit von den tunnelspezifischen Randbedingungen und dem Bauwerksalter abgeleitet werden. Die Bandbreite der Eigenschaften kann für Sensitivitätsanalysen oder für statische Modelle eingesetzt werden. Welche Eigenschaften relevant für die Tragfähigkeit, beziehungsweise die Gebrauchstauglichkeit des Tunnelbauwerks sind und wie die Degradationskurve für bestimmte Material-, beziehungsweise Bauteileigenschaften, in Abhängigkeit von bestimmten Randbedingungen verläuft, ist in zukünftigen Arbeiten näher zu erheben.

Derzeit sind keine Quellen bekannt, welche solche Degradationsbereiche für Elemente eines Mauerwerkstunnels beinhalten. Wie ein solcher Bereich, beziehungsweise die darin enthaltene, wahrscheinlichste Kurve, erstellt werden könnte, wird in Kapitel 5.2 am Beispiel der Festigkeit eines Mauersteins erläutert.

5.2 Ermittlung der Degradation am Beispiel „Mauerstein aus Quarzsandstein“

In diesem Kapitel soll die mögliche Erstellung eines Degradationsbereichs am Beispiel eines Mauersteins erläutert werden. Als Praxisbeispiel dienen Quarzsandsteine, welche zum Beispiel im Rekawinkler und Kleinen Dürrebergtunnel verbaut wurden. Als betrachtete Eigenschaft wird die einaxiale Druckfestigkeit der Steine gewählt. Diese Tunnel sind zwei aufeinanderfolgende Eisenbahntunnel auf der österreichischen Weststrecke. Beide Tunnel sind auf das Jahr 1858 datiert und somit über 150 Jahre alt.

5.2.1 Ermittlung Ausgangszustand

Das erste Ziel bei der Erstellung eines Degradationsbereichs eines Mauersteins ist die Kenntnis des Ausgangszustands, also die Druckfestigkeit der Mauersteine bei deren Einbau. Wie in Kapitel 3.4.1.2 beschrieben wurde schon sehr früh höchstens Wert auf die Qualität der eingebauten Mauersteine gelegt. Es ist daher von unverwitterten Steinen ohne Vorprägung mit Rissen auszugehen.

Folgende Möglichkeiten bieten sich zur Ermittlung der ursprünglichen Druckfestigkeit an:

1. Versuchsdurchführungen an Gesteinsproben aus dem Steinbruch in welchem auch die Mauersteine des Tunnels gewonnen wurden. Bei der Probenahme und der Versuchsdurchführung ist auf mehrere Faktoren zu achten:
 - Die Probe muss dieselben Eigenschaften aufweisen wie die Mauersteine bei deren Gewinnung. Dabei ist vor allem auf den Verwitterungsgrad,

Vorbeanspruchungen und andere Parameter zu achten, welche die Druckfestigkeit beeinflussen können.

- Eine etwaige Anisotropie des Gesteins, wie beispielsweise die Schieferung oder Schichtung, ist bei der Versuchsdurchführung zu berücksichtigen. Zusätzlich ist auch zu erheben wie die Steine im Gewölbe verbaut worden sind. Sofern die Steine größtenteils unter Berücksichtigung der Schichtung eingebaut wurden, so sind die Probekörper in derselben Richtung zu belasten.
2. Versuchsdurchführungen an Gesteinsproben aus Bereichen des Tunnels, welche günstigen Randbedingungen ausgesetzt sind und die Verwitterung hier keine oder nur geringe Einflüsse an den Mauersteinen verursachte.
 3. Die Ergebnisse der Druckversuche ergeben eine Verteilung, welche im Normalfall, bei einem größeren Probenumfang, einer Normalverteilung entspricht und die Ausgangsbasis des einaxialen Drucks zum Zeitpunkt Null wiedergibt.
 4. Ist eine solche Probenahme nicht möglich, kann alternativ eine Bandbreite aus einschlägiger Literatur für das unverwitterte Gestein verwendet werden. Dabei ist auf die Verwendung einer möglichst vergleichbaren Quelle zu achten. Druckfestigkeitswerte aus älterer Literatur wurden möglicherweise mit einer anderen Methodik als der derzeitige Stand der Technik darstellt, ermittelt. Dadurch können die Ergebnisse der Druckversuche auf welche in der Literatur Bezug genommen wird, gravierend von später ermittelten Werten abweichen.

Beim Rekawinkler und beim Kleinen Dürrebergtunnel wurden beispielsweise Mauersteine aus Quarzsandstein verwendet. Die einaxiale Druckfestigkeit von quarzitischem Sandstein wird mit 120 - 200 MPa angegeben⁵⁹. Diese einaxiale Druckfestigkeit eines Probekörpers mit der definierten Geometrie Höhe zu Durchmesser gleich zwei zu eins, kann nun auf eine Druckfestigkeit eines Mauersteins umgerechnet werden. Dazu wird die einaxiale Druckfestigkeit mit dem Formfaktor 1,15, für Höhe und Breite größer 250 mm, multipliziert. Die Vorgehensweise wird in der ÖNORM EN 772-1 beschrieben. Die Ergebnisse ergeben eine Bandbreite von 138MPa bis 230 MPa.

5.2.2 Ermittlung Degradationsbereich und Kurvenverlauf

Wurde die Ausgangslage der einaxialen Druckfestigkeit über eine Bandbreite oder Verteilung definiert, kann die Degradation durch verschiedene Methoden weiter definiert werden:

⁵⁹ Maier, J.: Handbuch Historisches Mauerwerk, 2. Auflage, Springer Vieweg, 2012

1. Festlegung von Tunnelbereichen, welche ähnlichen Randbedingungen ausgesetzt sind. Probenentnahmen aus den verschiedenen Tunnelbereichen und Durchführung von einaxialen Druckversuchen. Gegebenenfalls auch ergänzt um beispielsweise Triaxialversuche oder point load tests.
2. Aufnahme des Verwitterungs- und Zerlegungsgrades der Mauersteine im Bauwerk und Vergleich mit Literaturwerten für dasselbe Gestein mit entsprechendem Verwitterungs- und Zerlegungsgrad.
3. Recherche von Versuchsergebnissen bei Quarzsandstein-Mauersteinen aus anderen alten Bauwerken welche vergleichbaren Einflüssen und Randbedingungen ausgesetzt waren, wie zum Beispiel alte Tunnelbauwerke oder alte Kellergewölbe. Bei weit zurückliegenden Untersuchungen muss auf die Art der Ermittlung der Versuchsergebnisse geachtet werden. Weiters ist der Versuchszeitpunkt und das Bauwerksalter zu berücksichtigen.
4. Recherche von vergangenen Bauwerkserkundungen des betrachteten Tunnelbauwerks. Besonders bei dieser Methodik muss wieder auf die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse mit aktuellen Werten geachtet werden.
5. Versuchstechnische Rekonstruktion des Alterungsprozesses im Labor. Eventuell ist eine Extrapolation der Veränderung der Druckfestigkeit eines Langzeitversuchs (> 1 Jahr) über 150 Jahre möglich.

Beim Rekawinkler und beim Kleinen Dürrebergtunnel wurden im Jahr 2012 Kernbohrungen zur Erkundung der Mauerwerksschale durchgeführt. Ein Auszug der Ergebnisse ist in Tabelle 9 und Tabelle 10 dargestellt. Hier ist anzumerken, dass der geringe Probenumfang nicht repräsentativ ist. Weiters wurden die Proben zufällig aus bestimmten Tunnelbereichen gezogen. Ob und inwieweit durch die gegenständlichen Proben die gesamte Bandbreite abgedeckt wird ist nicht bekannt.

Die nachfolgend ermittelten Werte dienen nur zur Darlegung der exemplarischen Vorgehensweise.

Bohrung	Durchmesser [mm]	UCS [MPa]
B1 Rekawinklertunnel	50,8	71,68
D1 kleiner Dürrebergtunnel	50,8	94,30
D4 kleiner Dürrebergtunnel	50,8	60,45
A1 Rekawinklertunnel	50,8	82,73

Tabelle 9 - Ergebnisse Kernbohrungen - trockene Verhältnisse

Wert	UCS [MPa]
Kleinster Wert	60,45
Durchschnittswert	77,29
Größter Wert	94,30

Tabelle 10 - Auswertung Ergebnisse Kernbohrungen - trockene Verhältnisse

Der dadurch definierte Degradationsbereich kann gemäß Abbildung 34 dargestellt werden.

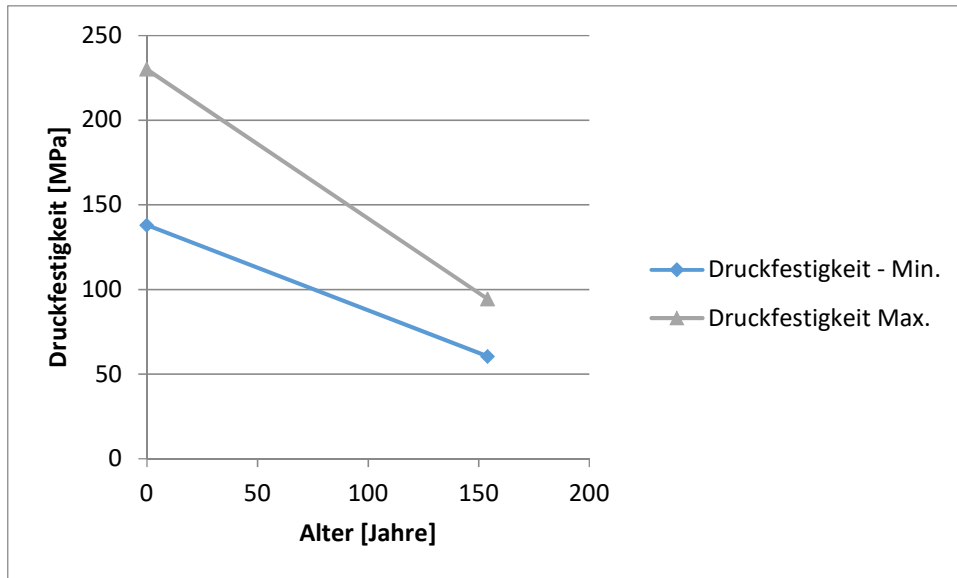


Abbildung 34 - Degradationsbereich Mauersteine Rekawinkler- und kleiner Dürrebergtunnel

Um einen repräsentativen Kurvenverlauf wie in Abbildung 32 und Abbildung 33 zu erhalten, müssten zum einen mehrere Punkte, auf verschiedene Altersbereiche verteilt, ermittelt werden. Zum anderen sind die Einflüsse und Randbedingungen der jeweiligen Tunnelbereiche zu berücksichtigen. Ob diese Kurven ein degressives, progressives oder anderes Verhalten aufweisen und in wie weit dieses Verhalten von den Einflüssen und Randbedingungen abhängig ist, ist unbekannt und noch näher zu untersuchen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit werden die wesentlichen Einflüsse auf das Systemverhalten eines Bestandstunnels mit Natursteinmauerwerk vom Bau bis zu einer umfangreichen Instandsetzungsmaßnahme erläutert. Weiters wurde eine Methode vorgestellt, welche eine Quantifizierung der Änderung der Eigenschaften eines Tunnelbauwerks während seiner Bestandsdauer ermöglichen soll.

Anfangs wurden die Bauweisen und Bauelemente von Natursteinmauerwerkstunnel erläutert. Da es viele verschiedene Möglichkeiten gab die Vortriebsabfolgen, Öffnungsweiten, Ringschlussdistanz, Bölzung und vieles mehr innerhalb einer Bauweise zu variieren, ist eine bauwerksspezifische Recherche und, oder Erkundung unerlässlich, um eine geeignete Datenbasis für die Kenntnis des Ausgangszustands nach dem Bau des Tunnels zu erlangen.

Durch Alterung und vorangegangene Instandsetzungsmaßnahmen verändern sich die Eigenschaften der Bauelemente des Tunnels im Laufe der Zeit. Wie sich welche Einflüsse auf welche Bauelemente eines Tunnelbauwerks und in weiterer Folge auf das Systemverhalten bei einer späteren, umfangreichen Instandsetzung auswirken, ist noch nicht in einer ausreichenden Detailtiefe erforscht.

Für eine Quantifizierung der Änderung der Eigenschaften der Bauelemente eines Tunnelbauwerks aufgrund bestimmter Einflüsse und Randbedingungen ist eine detaillierte Forschung der Grundlagen notwendig.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Lösemethoden Hohlraumbau	4
Abbildung 2 - Keilhauen	5
Abbildung 3 - Schlägel und Eisen ⁴	5
Abbildung 4 - Mechanisierter Schild nach J.D.Brunton und G.Brunton, U.K. Patent, 1876	6
Abbildung 5 - Erfindungen und klassische Tunnelbauweisen	7
Abbildung 6 - Ausbruchsreihenfolge Deutsche Bauweise (Kernbauweise)	8
Abbildung 7 - Deutsche Bauweise (Kernbauweise) Beispiel Triebitzertunnel ¹¹	8
Abbildung 8 - Deutsche Bauweise, Stadtbahntunnel Mülheim, Baulos 7	9
Abbildung 9 - Ausbruchsfolgen belgische Bauweise ¹⁵	9
Abbildung 10 - Unterfangung mithilfe überstehender Bogenschwelle	10
Abbildung 11 - Arbeitsschritte englische Bauweise ²⁰	11
Abbildung 12 - Österreichische Bauweise - Abstützung der „Sparren“ ²³	13
Abbildung 13 - Arbeitsfolge der österreichischen Bauweise ²²	13
Abbildung 14 - Schablone für Widerlags-Mauerwerk ²⁵	15
Abbildung 15 - Österr. Lehrbogen; Maßstab in Fuß (1 Fuß = 0,3139 Meter) ²⁵	16
Abbildung 16 - Historische Tunnelprofile - Radien in [m] ³¹	22
Abbildung 17 - Sohlkanal ³¹	24
Abbildung 18 - Drainsröhre ³¹	24
Abbildung 19 - Kernbohrungen Bestandstunnel	31
Abbildung 20 - Beispiel für Abschalung	38
Abbildung 21 - Beispiel für Mauerwerksausbruch ⁴²	38
Abbildung 22 - Beispiel für Fugenausbruch ⁴²	39
Abbildung 23 - Beispiel für Winderosion	39
Abbildung 24 - Beispiel für Absandung ⁴²	41
Abbildung 25 - Beispiel für Ausblühungen ⁴²	41
Abbildung 26 - Beispiel für Hohlstelle hinter dem Ausbau ⁴²	42
Abbildung 27 - Kennlinienverfahren - stabiler Zustand ⁵⁰	45
Abbildung 28 - Beispiel für Längsriss	46
Abbildung 29 - Beispiel für Profilversatz und radiale Verformung ⁵¹	47
Abbildung 30 - Zugspannungen im Stein, ausgelöst durch Stoßfuge und unvollständig vermörtelte Lagerfuge	55
Abbildung 31 - Beispiel für Degradationskurve	59
Abbildung 32 - Degradation Druckfestigkeit Mauersteine - günstige Randbedingungen ⁵⁸	61

<i>Abbildung 33 - Degradation Druckfestigkeit Mauersteine - ungünstige Randbedingungen⁵⁸.....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 34 - Degradationsbereich Mauersteine Rekawinkler- und kleiner Dürrebergtunnel.....</i>	<i>65</i>

8 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 - Dimension Mauersteine ²⁸,</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 2 - Mauerstärke [m]^{28, 29}</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 3 - Mörtel für trockene Tunnel²⁹.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 4 - Mörtel für feuchte Tunnel²⁹</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 5 - Mörtel für nasse Tunnel²⁹.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 6 – Überhöhungsmaß in Klassen I bis VII³⁰</i>	<i>23</i>
<i>Tabelle 7 - Einflüsse auf das Systemverhalten</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 8 - Einwirkungen auf Bauelemente und Randbedingungen</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 9 - Ergebnisse Kernbohrungen - trockene Verhältnisse.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabelle 10 - Auswertung Ergebnisse Kernbohrungen - trockene Verhältnisse.....</i>	<i>64</i>