

Diplomarbeit

Die Anwendbarkeit europäischer Tunnelinnenschalenvarianten auf Grundlage einer vergleichenden Untersuchung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

The applicability of European tunnel lining variants on the basis of a comparative study

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Christoph Diewald, BSc

Matr.Nr.: 01634798

Betreuung: Univ.Prof. Dr.-Ing. **Frank Lulei**
Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Alexander Bender**, BSc
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/235, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Dezember 2023



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

*„Wer immer tut, was er schon kann,
bleibt immer das, was er schon ist.“*

Harry Ford

Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei meiner Familie und meiner Freundin bedanken. Sie weckten meine Leidenschaft für den Tunnelbau, motivierten mich an meinen Plänen festzuhalten und standen stets hinter mir. Nicht nur während des Studiums, sondern auch im Zuge meiner persönlichen Weiterentwicklung wurde ich bestens unterstützt. Danke für alles!

Für die hervorragende Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Alexander Bender. Er pflegte ein kollegiales Verhältnis, brachte viele wertvolle Ratschläge ein und war bei Fragen meinerseits stets erreichbar. Danke für die tolle Zusammenarbeit.

Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Goger für die sachkundige Lehre, die das Verfassen dieser Diplomarbeit ermöglichte. Nicht zuletzt möchte ich mich bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Frank Lulei sowie Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Kurt Hechenblaickner für die zur Verfügung gestellte Literatur sowie für die Organisation des Baustellenbesuchs in Schweden bedanken.

Kurzfassung

Schlagwörter: Zyklischer Tunnelbau, Innenschalensysteme, Innenausbau, Abdichtungen

Die gegenständliche Diplomarbeit wurde im Zuge der Forschungstätigkeit des Instituts für Baubetrieb und Bauwirtschaft – Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik der TU Wien verfasst. Sie ist den unterschiedlichen Herangehensweisen an die Konzeption von Straßentunnelinnenschalen gewidmet und stellt eben diese gegenüber. Dabei liegt der Fokus auf den in Europa zur Anwendung kommenden Varianten.

Beginnend mit einer allgemein gehaltenen Einführung in den zyklischen Tunnelvortrieb werden die Vortriebsverfahren sowie die zu verwendenden Arbeitsmittel vorgestellt, deren geschichtliche Entwicklung aufgezeigt und Abgrenzungen gegenüber Tunnelvortriebsmaschinen getroffen. Weiter werden die Adaptierungsmöglichkeiten der neuen österreichischen Tunnelbaumethode, die im Falle wechselnder geologischer Verhältnisse immense Vorteile mit sich bringt, angeführt. Das eingehende Kapitel behandelt somit die Vortriebsarbeiten, die vor dem Einbau der Innenschale von Statten gehen.

In den anschließenden Kapiteln werden die verschiedenen Möglichkeiten des Innenausbaus aufgezeigt. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden lediglich europäische Varianten betrachtet. Konkret kommt es zur Untersuchung des mitteleuropäischen und der skandinavischen Systeme. Zu Beginn werden jeweils die jeweiligen normativen sowie geologischen Gegebenheiten vorgestellt und die Besonderheiten der Vortriebsarbeiten in den behandelten Regionen beschrieben. Im nächsten Schritt kommt es zur Anführung der Spezifika der Ausbauvarianten, wobei auf die Abdichtung gegen Frost und Wasser, die einzuhaltenden Anforderungen im Bezug auf den Brandschutz und die Dauerhaftigkeit sowie die Möglichkeiten zur Platzierung der elektrotechnischen Einrichtungen eingegangen wird. Um weiter einen Einblick in baubetrieblicher Hinsicht zu geben, sind jeweils am Schluss dieser Kapitel die benötigten Arbeitsgeräte, -mittel und -schritte angeführt.

Der nächste Teil der Arbeit umfasst den Vergleich und die direkte Gegenüberstellung der zuvor beschriebenen Systeme. Die Vor- und Nachteile der Innenschalenvarianten werden aufgezeigt, wobei der Fokus auf den zuvor angeführten Punkten liegt. Weiter kommt es zur Definition der Anwendungsgrenzen sowie deren Kausalitäten.

Abschließend wird versucht, auf Grundlage des Vergleichs und unter Berücksichtigung der vorliegenden geologischen Verhältnisse einen Einblick zu geben, welche Aspekte der in Skandinavien zur Anwendung kommenden Innenschalensysteme auch in Österreich anwendbar wären. Weiter werden die Hindernisse, die aufgrund der aktuell gültigen Richtlinien entstehen, vorgestellt.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Keywords: rock excavation, conventional tunnel construction, inner lining systems, sealing

This diploma thesis is part of the research activities of the Institute of Construction Management and Economics – Research Department of Construction Management and Construction Process Engineering at the Vienna University of Technology. It is dedicated to the different approaches to the design of inner linings of road tunnels and their comparison. The focus is on the variants which are used in Europe.

Starting with a general introduction to tunnel excavation, the methods and the equipment to be used are presented, their historical development is shown and distinctions to tunnel boring machines are made. Furthermore, the adaptation possibilities of the *New Austrian Tunneling Method* are mentioned. This chapter thus deals with the excavation work that takes place before the inner lining is installed.

In the following chapters, various solutions for inner linings are presented. At the beginning, the respective normative and geological conditions are presented and the special features of the rock excavation in the covered regions are described. In the next step, the specifics of the lining variants are listed, whereby the sealing against frost and water, the requirements regarding fire protection and durability and the possibilities for the placement of the electrical equipment are discussed. To conclude this chapter, the required tools, equipment and work steps are listed in order to provide an insight into the construction operation to be carried out.

In the next section, the systems described above are compared and contrasted. The advantages and disadvantages of the different inner shell variants are worked out, with the points mentioned above being discussed, as well as each system's application limits and the respective causalities.

Finally, based on the comparison and taking into account the geological conditions, an attempt is made to provide an insight into which aspects of the inner shell systems used in Scandinavia could also be used in Austria. Furthermore, the obstacles that arise due to the currently valid guidelines are presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Motivation	13
1.2	Forschungsfragen	14
1.3	Forschungsmethodik	14
1.4	Begriffsbestimmungen	15
2	Der zyklische Tunnelvortrieb	19
2.1	Terminologie der Tunnelbauverfahren	19
2.2	Geschichtliche Entwicklung bis zur modernen Technik	21
2.2.1	Traditionelle Bauweisen	22
2.2.2	Maschinen, Werkstoffe, Messtechnik	23
2.3	Neue österreichische Tunnelbaumethode	25
2.4	Vortriebsarten	27
2.5	Stützmittel	29
2.6	Bewetterung	33
2.7	Shutterung	34
2.8	Relevante Normen und Richtlinien	34
3	Das zentraleuropäische Innenschalensystem	36
3.1	Normative Anforderungen und Richtlinien	36
3.2	Geotechnische und hydrogeologische Gegebenheiten	38
3.3	Innenschalenkonstruktion	38
3.4	Beherrschung von Berg-, Grund-, Sicker- und Fahrbahnwässern	41
3.4.1	Abdichtung	41
3.4.2	Entwässerung	43
3.4.3	Fahrbahnwässer	45
3.5	Elektrische Einrichtungen und Einbauten	46
3.6	Brandschutz	46
3.7	Dauerhaftigkeit und Instandhaltung	47
3.8	Bauablauf	50
3.9	Zusammenfassung des zentraleuropäischen Innenschalensystems	55
4	Die schwedische Vorgehensweise beim Tunnelinnenausbau	57
4.1	Normative Anforderungen und Richtlinien	57
4.2	Geotechnische und hydrogeologische Gegebenheiten	57
4.3	Besonderheiten der Vortriebsarbeiten in Schweden	57
4.4	Innenschalenkonstruktion	58
4.5	Adaptiertes Regenschirmprinzip mit partieller Abdichtung	61
4.6	Elektrische Einrichtungen und Einbauten	63
4.7	Brandschutz	63
4.8	Dauerhaftigkeit und Instandhaltung	64
4.9	Bauablauf	64

4.10	Zusammenfassung des schwedischen Innenschalensystems	67
5	Die norwegische Vorgehensweise beim Tunnelinnenausbau	68
5.1	Normative Anforderungen und Richtlinien	68
5.2	Geotechnische und hydrogeologische Gegebenheiten	69
5.3	Besonderheiten der Vortriebsarbeiten in Norwegen	69
5.4	Innenschalenkonstruktion	70
5.5	Tunnelabdichtung und Entwässerung	74
5.6	Elektrische Einrichtungen, Einbauten	76
5.7	Brandschutz	77
5.8	Dauerhaftigkeit und Instandhaltung	78
5.9	Bauablauf	79
5.10	Zusammenfassung der norwegischen Innenschalensysteme	80
6	Vergleich und Anwendbarkeit der Ausbauvarianten	81
6.1	Aspektspezifische Erläuterung der Innenschalenvarianten	81
6.1.1	Beherrschung der Bergwässer im Zuge der Vortriebsarbeiten	81
6.1.2	Verwendung und Entsorgung des Ausbruchmaterials	82
6.1.3	Druckwasserhaltende und statische Aufgaben der Konstruktion	83
6.1.4	Positionierung und Montage der Abdichtung	83
6.1.5	Dauerhaftigkeit und Robustheit	84
6.1.6	Brandschutz und Verkehrsunfälle	85
6.1.7	Einbauten und elektrische Einrichtungen	86
6.1.8	Profilveränderlichkeit	87
6.1.9	Tabellarische Auflistung	88
6.2	Aspektspezifische Gegenüberstellung der Innenschalenvarianten	92
6.2.1	Beherrschung der Bergwässer im Zuge der Vortriebsarbeiten	92
6.2.2	Verwendung und Entsorgung des Ausbruchmaterials	93
6.2.3	Druckwasserhaltende und statische Aufgaben der Konstruktion	93
6.2.4	Positionierung und Montage der Abdichtung	94
6.2.5	Dauerhaftigkeit und Robustheit	94
6.2.6	Brandschutz und Verkehrsunfälle	94
6.2.7	Einbauten und elektrische Einrichtungen	95
6.2.8	Profilveränderlichkeit	95
6.2.9	Aspektspezifische Vergleichsmatrix	95
6.3	Anwendbarkeit und normative Hindernisse in Österreich	97
6.3.1	Betrachtung der Anwendbarkeit einzelner Teilaspekte der skandinavischen Varianten in Österreich	97
6.3.2	Die gesamthafte Anwendung der skandinavischen Varianten in Österreich	98
6.3.3	Normative Hindernisse	99
6.4	Zusammenfassung des Vergleichs und der Anwendbarkeit	100
7	Fazit und Ausblick	101
7.1	Beantwortung der Forschungsfragen	101
7.2	Ausblick	103



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kapitel 1

Einleitung

Der Tunnelbau als Teil der Ingenieurskunst nimmt in Österreich aufgrund der geografischen Lage in Mitten der Alpen eine essentielle Rolle ein. Die Sparte ist historisch gewachsen und hat mittlerweile große Tradition. Die geologischen Gegebenheiten in vielen Teilen dieser Region sind als herausfordernd anzusehen. In Kombination mit den oftmals großen Überlagerungen ergeben sich große Belastungen, die durch den Ausbau aufgenommen werden müssen. Im 20. Jahrhundert wurde im Alpenstaat durch mittlerweile weltweit bekannte Ingenieure¹ die Neue Österreichische Tunnelbaumethode entwickelt – durch die geänderte Herangehensweise trägt das Gebirge die Lasten mit, womit der aufzubringende Widerstand geringer ausfallen kann. Durch den Einbau der Außenschale wird ein Gleichgewichtszustand angestrebt – eine Erhöhung der Sicherheit wird durch den Einbau der Ortbetoninnenschale erreicht. Diese kann eingebaut werden, sobald die Verschiebungen der Außenschale auf ein gewisses Maß abgenommen haben.

Im Zuge vieler Projekte werden allerdings weniger komplexe geologische Zonen durchfahren – in diesen Fällen stellt sich die Frage, ob eine derart massive Innenschalenkonstruktion statisch erforderlich bzw. wirtschaftlich ist. Der ingenieurmäßige Gedanke fordert eine stetige Weiterentwicklung der zur Anwendung kommenden Bauverfahren und Systeme. Aus diesem Grund befasst sich die gegenständliche Diplomarbeit mit dem Vergleich unterschiedlicher Innenschalenvarianten, die in europäischen Straßentunneln verbaut sind. Dem in Mitteleuropa zur Ausführung kommenden Innenausbau werden skandinavische Systeme gegenübergestellt. Ziel der Arbeit ist es, etwaige Grenzen der Systeme aufzuzeigen, Vor- und Nachteile, sowie die zu betreibenden Aufwände darzustellen und abschließend die Anwendbarkeit der skandinavischen Innenschalenvarianten in Mitteleuropa darzulegen. Weiter werden etwaige Hindernisse, die aufgrund der österreichischen Normenlandschaft entstehen, aufgezeigt.

1.1 Motivation

Unternimmt man eine Reise in den Norden Europas und fährt dort aufmerksam durch einen Tunnel, fällt einem auf, dass sich die verbaute Innenschalenkonstruktion stark von der in Mitteleuropa bekannten unterscheidet. Anstatt des hierzulande üblichen, massiven Ortbetongewölbes ist eine filligrane Spritzbetondecke ersichtlich. Es tun sich rasch einige Fragen auf:

- Warum haben sich die unterschiedlichen Herangehensweisen entwickelt?
- Hat dies nur geologische oder auch normative Hintergründe?
- Welche Vor- und Nachteile bieten die verschiedene Methoden?
- Könnten die Systeme auch in Österreich eingesetzt werden?

¹Der Autor legt großen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung. Im Sinne der besseren Lesbarkeit wird im Zuge dieser Diplomarbeit jedoch entweder die maskuline oder feminine Form verwendet. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des anderen Geschlechts.

Die gegenständliche Diplomarbeit bietet die Chance, diese Thematik zu analysieren. Dabei soll eine gesamtheitliche Betrachtung unternommen werden. Die jeweils vorliegenden geologischen Verhältnisse, normative Grundlagen und der Bauprozess sollen aufgezeigt und anschließend verglichen werden. Diese Vorgehensweise dient als Grundlage, um in weiterer Folge ein etwaiges Optimierungspotential der österreichischen Methode aufzeigen zu können. Es ist Aufgabe des Bauingenieurs, die aktuell eingesetzten Verfahren und Systeme stetig zu hinterfragen und weiter zu entwickeln, um den geforderten technischen und wirtschaftlichen Erfolg langfristig sicherstellen zu können.

1.2 Forschungsfragen

Die Forschungsfragen definieren den Aufbau der Diplomarbeit und grenzen deren Umfang ein. Aufgrund einer Diskussionsgrundlage wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Alexander Bender (Betreuer – TU Wien) folgende Fragestellungen erarbeitet:

- Welche verschiedenen Herangehensweisen an den Innenausbau von zyklisch aufgefahrenen Straßentunneln haben sich in Europa entwickelt?
- Sind die Lösungsansätze der verschiedenen Herangehensweisen zur Sicherstellung der Abdichtung, der Dauerhaftigkeit, des Brandschutzes etc. ähnlich, oder gibt es grundlegende Unterschiede?
- Können die in Skandinavien entwickelten Systeme, oder zumindest Teile davon, sinnvoll in Mitteleuropa eingesetzt werden? Tun sich aufgrund der österreichischen Normenlandschaft Hindernisse auf?

1.3 Forschungsmethodik

Zur Vermittlung allgemeiner Tunnelbaugrundkenntnisse ist der erste Teil dieser Arbeit dem zyklischen Vortrieb gewidmet. Beginnend mit der Abgrenzung zum maschinellen Vortrieb wird Basiswissen hinsichtlich der geschichtlichen Entwicklung, den aktuell zum Einsatz kommenden Bauverfahren inkl. den erforderlichen Hilfsmaßnahmen (Schutterung, Bewetterung, etc.) sowie den notwendigen Stützmitteln vermittelt.

Dank der guten Zusammenarbeit mit Bauunternehmen konnten mehrere Tunnelbauprojekte in ganz Europa besichtigt werden. Weiter wurden große Datenmengen bestehend aus Baustellenpräsentationen, Fotos und Verfahrensbeschreibungen sowie Normen und Richtlinien zur Verfügung gestellt. Zusätzlich konnte der Autor aufgrund seiner Berufstätigkeit tiefgreifende Erfahrungen im Bereich der Vortriebs- und Innenschalenarbeiten machen. All diese Informationen bilden die Datengrundlage für die, an das Einführungskapitel anschließenden, Erläuterungen. Die Ausarbeitung dieser Kapitel beruht somit auf einer umfangreichen Literaturrecherche und den, unter anderem den Bauablauf betreffenden, gesammelten Erfahrungen.

Um in weiterer Folge einen besseren Vergleich der verschiedenen Varianten des Innenausbaus zu ermöglichen, werden im Zuge der Vorstellung der Bauweisen stets die selben Aspekte analysiert. Diese umfassen unter anderem die geologischen sowie normativen Grundlagen, die Bergwasserabdichtung, die Brandschutzthematik, etc.

Den nächsten Teil dieser Diplomarbeit bildet eine vergleichende Untersuchung. Diese soll Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede zwischen den einzelnen Herangehensweisen aufzeigen. Um eine bestmögliche Gegenüberstellung sicherzustellen, werden jeweils die Lösungsansätze zu einzelnen Teilaspekten des Gesamtkomplexes betrachtet.

Im abschließenden Vergleich wird untersucht, ob und unter welchen Voraussetzungen die skandinavischen Systeme auch in Mitteleuropa Anwendung finden könnten. Normative Barrieren werden aufgezeigt und hinterfragt. Im Schlusswort dieser Diplomarbeit werden die, zu Beginn der Ausarbeitung definierten, Forschungsfragen mit Blick auf die in Zukunft durchzuführenden Tunnelbauprojekte bestmöglich beantwortet.

1.4 Begriffsbestimmungen

Um einen einheitlichen Wortgebrauch im Bereich des Tunnelbaus sicherstellen zu können, sind im folgenden Teil wichtige Begriffe erläutert. Die Definitionen sind den einschlägigen Normen und Richtlinien sowie der Fachliteratur entnommen:

Arbeitsfuge: Planmäßige Fuge in einem monolithischen Bauwerk, die aufgrund des Herstellungsprozesses vorzusehen ist.²

Ausbau: Maßnahmen zur Stützung der Laibung.³

Blockfuge: Arbeitsfuge, die sich zufolge der Innenschalenherstellung mit einem Schalwagen zwischen zwei Gewölbeblöcken ergibt.²

Gebundene Sickerpackung: Spezialbeton ohne Sand- und Feinkornanteile, der aus einheitlich großen Gesteinskörnern besteht und nur eine geringe Menge an Bindemittel und Anmachwasser enthält.⁴

Fahrbahntwässerung: Sammlung und Ableitung der im Fahrraum auftretenden Wässer bis zur Gewässerschutzanlage.⁴

Firstspaltverpressung: Im Anschluss an die Betonagearbeiten durchgeführte Verpressung des Firstspaltes zwischen Innenschale und Kunststoffdichtungsbahn.²

Flächendrainageelemente: Flächige Elemente, die zusickerndes Poren- bzw. Bergwasser fassen und zur Ulmendrainage führen.⁴

Injektion: Verfüllen von Poren und Klüften des Baugrundes mit einem Injektionsgut.³

Innenschale: Flächiges Bauteil, das die dauerhafte Hohlraumauskleidung eines Untertagebauwerks umfasst. Sie dient im Gegensatz zur Außenschale nicht der unmittelbaren Hohlraumstützung und wird im Regelfall erst im Anschluss an die Vortriebsarbeiten verbaut.³

Inspektion: All jene Maßnahmen, die zur Erhebung des Istzustandes getätigt werden und die Entscheidungsgrundlage für die Planung der Instandhaltung bilden.⁴

Instandhaltung: All jene Maßnahmen, die zur Aufrechterhaltung und zur Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit eines Bauteils gesetzt werden (Wartung und Instandsetzung).⁴

Instandsetzung: All jene Maßnahmen, die zur Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit eines Bauteils gesetzt werden.⁴

Kontinuierlicher Vortrieb: Vortriebsart, bei der die einzelnen Arbeitsvorgänge im Wesentlichen zeitgleich von einer Tunnelvortriebsmaschine ausgeführt werden.⁵

²Vgl. [29] *Richtlinie Tunnelabdichtung*

³Vgl. [31] *ÖNORM B 2203-1*

⁴Vgl. [38] *Richtlinie Tunnelentwässerung*

⁵Vgl. [1] Adam

- Mixed-Face-Conditions:** Ein Gemisch aus verschiedenen Gesteinsarten innerhalb des Querschnitts, infolge dessen sich ein unterschiedliches Löseverhalten einstellt bzw. sich die Erfordernis der Anwendung unterschiedlicher Lösemethoden ergibt.⁶
- Pfändbleche, Dielen:** Brettförmige Stahlbauteile, die zur flächigen Stützung des vorausseilenden Hohlraumrandes eingesetzt werden.⁶
- Primäres Entwässerungssystem:** Jener Teil der Wasserfassung und Ableitung, der nach dem Einbau nicht mehr für Instandhaltungsmaßnahmen zugänglich ist.⁷
- Q-System:** Gebirgsklassifizierungssystem, das in Norwegen entwickelt wurde.⁸
- Regelquerschnitt:** Im Zuge der Planung festgelegter typischer Querschnitt eines Hohlraum- oder Tunnelbauwerks.⁹
- RQD-Index:** Prozentsatz an vollständigen Bohrkernstücken eines 1 m langen Bohrkerns, die länger als 100 mm sind.¹⁰
- Schaumstoffstreifen:** Wird in der Blockfuge platziert, um das Auslaufen von Material im Zuge der Firstpaltverpressung zu verhindern.¹¹
- Schutzschicht:** Zwischen dem Abdichtungsträger und der Kunststoffdichtungsbahn situiertes Geotextil zum Schutz vor mechanischer Überbeanspruchung.¹¹
- Schutzstreifen:** Hohlraumseitig angebrachter Kunststoffdichtungsstreifen zum Schutze der Abdichtungsbahnen. Er wird im Bereich der Blockfuge platziert, um lokale Überbelastungen durch die Stirnschalung zu verhindern.¹¹
- Sekundäres Entwässerungssystem:** Jener Teil der Wasserfassung und Ableitung, der nach dem Einbau für Instandhaltungsmaßnahmen zugänglich ist.⁷
- Sicherheitsfaktor:** Gibt das Verhältnis der Widerstandsfähigkeit des Ausbaus zu der auftretenden Belastung an.⁹
- Spieße:** Anker, Hohlrohre, Stäbe kleinen Durchmessers, die zur Stützung des vorausseilenden Hohlraumrandes eingesetzt werden.⁶
- Spion:** In Bereiche der Firste platziertes Rohr zur Kontrolle des Betonfüllstandes im Zuge der Gewölberstellung.¹¹
- Stützmittel:** Elemente, die zur Stützung der Hohlraumlaibung in Tunnelbauwerken eingesetzt werden.⁶
- Tauernfenster:** Bereiche, in denen sonst tiefliegende Gesteinschichten durch Verschiebungen großflächiger Erdkrustenteile an der Oberfläche zu sehen sind.¹²
- Teilflächen:** Unterteilung des Ausbruchquerschnitts in mehrere Segmente.⁶

⁶Vgl. [31] *ÖNORM B 2203-1*

⁷Vgl. [38] *Richtlinie Tunnelentwässerung*

⁸Vgl. [2] Barton et al.

⁹Vgl. [1] Adam

¹⁰Vgl. [6] Deere und Deere

¹¹Vgl. [29] *Richtlinie Tunnelabdichtung*

¹²Vgl. [44] Tollmann

Trennflächen: Zuzolge der Überbeanspruchung des Festgesteins entstandene, zweidimensionale Unterbrechungen des mechanischen Zusammenhangs.¹³

Ulmendrainage: Kollektiv an Drainage- und Sammelleitung an den Ulmenfüßen, zu dem das Wasser über die Flächendrainageelemente geleitet wird.¹⁴

Unterprofil: Unterschreitung der planmäßig auszuführenden Querschnittsgeometrie.¹³

Übermaß: Jener Radius, um den der Querschnitt vergrößert wird, um die zu erwartenden Gebirgsverschiebungen aufnehmen zu können.¹⁵

Wartung: All jene Maßnahmen, die zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit eines Bauteils gesetzt werden.¹⁴

Zyklischer Vortrieb: Vortriebsart, bei der die Arbeitsvorgänge zeitlich nacheinander und unter Zuhilfenahme verschiedener Geräte erfolgen.¹⁵

¹³Vgl. [1] Adam

¹⁴Vgl. [38] *Richtlinie Tunnelentwässerung*

¹⁵Vgl. [31] *ÖNORM B 2203-1*

Abkürzungsverzeichnis

ASI Austrian Standards International

CEN Comité Européen de Normalisation

DSV Düsenstrahlverfahren

ETK Einheitstemperaturkurve

EU Europäische Union

EWR Europäischer Wirtschaftsraum

FSV Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr

KDB Kunststoffdichtungsbahn

NGI Norwegian Geotechnical Institut

NÖT Neue Österreichische Tunnelbaumethode

TSM Teilschnittmaschine

TVM Tunnelvortriebsmaschine

ÖBV Österreichische Bautechnik Vereinigung

ÖGG Österreichische Gesellschaft für Geomechanik

ÖVBB Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik

Kapitel 2

Der zyklische Tunnelvortrieb

Im Laufe der Zeit wurden verschiedenste Tunnelbauverfahren entwickelt. Grob kann man diese in zyklische und kontinuierliche Vortriebe unterteilen. Zu Beginn dieses Kapitels wird die Abgrenzung zwischen diesen beiden Gruppen an Bauverfahren durchgeführt. Anschließend wird die geschichtliche Entwicklung der Vortriebsverfahren sowie der Maschinenteknik behandelt. Der nächste Teil des Kapitels beinhaltet die Beschreibung der aktuellen Vortriebsverfahren und der dabei zum Einsatz kommenden Stützmittel. Abschließend werden all jene Baumaßnahmen angeführt, die zur Aufrechterhaltung der Vortriebsarbeiten erforderlich sind.

2.1 Terminologie der Tunnelbauverfahren

In diesem Abschnitt werden die Begrifflichkeiten, die im Zuge der Planung und beim Bau von Tunnelbauwerken an der Tagesordnung stehen, erläutert. Der erste Teil behandelt die Trennung zwischen dem Einsatz von Tunnelvortriebsmaschinen und dem sogenannten universellen Ausbruch. Im Anschluss werden die Grundbegriffe der einzelnen Querschnittsteile des Tunnelprofils benannt.

Der zyklische Vortrieb – Das Gegenstück zum kontinuierlichen Vortrieb

Werden die Arbeiten des Ausbruchs, der Schutterung, sowie des Stützmitteleinbaus zeitlich versetzt ausgeführt, handelt es sich um einen zyklischen Vortrieb. Dieser wird laut *ÖNORM B 2203-1* [31] auch bergmännischer, konventioneller oder universeller Vortrieb genannt. Zu dieser Vortriebsmethode zählen der Bagger-, Spreng- und Teilschnittmaschinenvortrieb. Die einzelnen Prozesse werden zudem meist von unterschiedlichen Geräten ausgeführt. Es kommen Tunnelbagger, Bohrwagen, Radlader, Spritzbetonmanipulator usw. zum Einsatz.¹⁶

Anders ist dies beim kontinuierlichen Vortrieb. Die Arbeitsschritte werden (teilweise) gleichzeitig von nur einem, sehr komplexen, Gerät ausgeführt.¹⁷ Diese sogenannten Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) werden in den letzten Jahrzehnten immer häufiger eingesetzt. Zeitaufwendige Rüstarbeiten, die beim zyklischen Vortrieb erforderlich sind, können umgangen werden – es kommt zu einer Erhöhung der Vortriebsleistung. Dieser Umstand führt vor allem bei Großprojekten mit langen aufzufahrenden Strecken zu einer Bauzeitersparnis und einer Kostensenkung. Weiter gewinnt der kontinuierliche Vortrieb aufgrund der erhöhten Arbeitssicherheit immer mehr an Beliebtheit.¹⁸

Das Einsatzgebiet von Tunnelvortriebsmaschinen ist allerdings eingeschränkt. Kavernen, Querschläge, Querschnittsänderungen, geologische bzw. hydrogeologische Störungszonen, wechselnde Untergrundverhältnisse sowie druckhaftes Gebirge bereiten Tunnelvortriebsmaschinen Probleme. Beim zyklischen Vortrieb kann die Vortriebsmethode, der Stützmitteleinbau und die Profilgeometrie laufend den tatsächlich in situ angetroffenen geotechnischen Verhältnissen angepasst werden.

¹⁶Vgl. [31] *ÖNORM B 2203-1*

¹⁷Vgl. [32] *ÖNORM B 2203-2*

¹⁸Vgl. [4] Bonapace et al., S. I

Zusätzlich sind TVM's bei kleineren Projekten aufgrund der hohen Investitionskosten zumeist unwirtschaftlich.

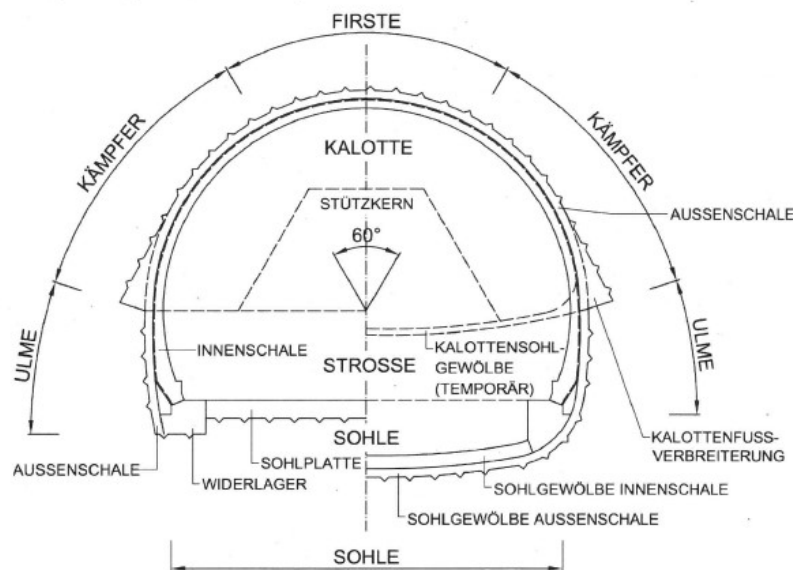


Abb. 2.1: Benennung der verschiedenen Teilbereiche im Querschnitt eines Tunnelbauwerks (Quelle: ÖNORM B 2203-1 [31])

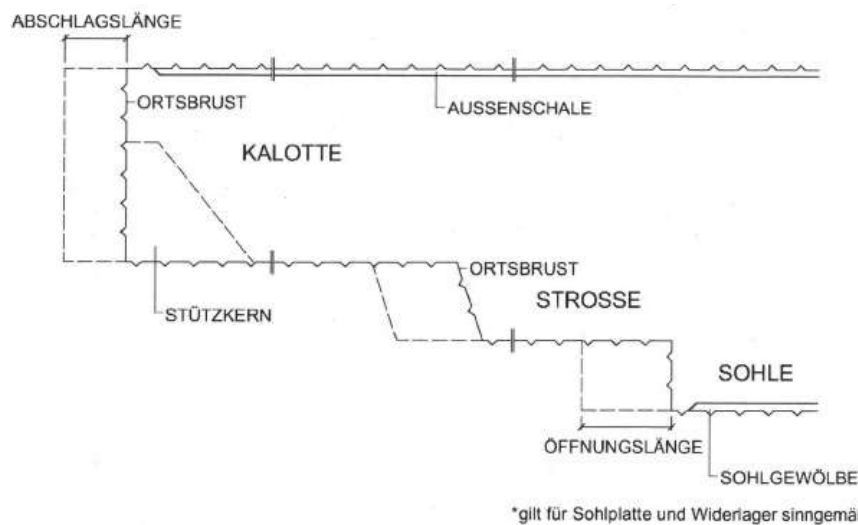


Abb. 2.2: Benennung der verschiedenen Teilbereiche im Längsschnitt eines Tunnelbauwerks (Quelle: ÖNORM B 2203-1 [31])

Tunnelbautechnische Grundbegriffe des zyklischen Vortriebs

Die Form des Ausbruchquerschnitts kann beim zyklischen Vortrieb je nach Erfordernis gewählt und während der Ausführung laufend adaptiert werden. Bei großen Tunnelprofilen oder Kavernen ist es erforderlich, abschnittsweise auszubrechen. Limitierender Faktor ist oftmals die Reichweite der Baumaschinen. Ungünstige Untergrundverhältnisse können ein weiterer Grund für einen Vortrieb in Teilbereichen/flächen sein. Die Begriffsdefinitionen dieser Teilbereiche sind in der

ÖNORM B 2203-1 [31] festgelegt und in Abb. 2.1 dargestellt. In den meisten Fällen kommt es zu einer Unterteilung in Kalotten- und Strossen-/Sohlvortrieb. Der Vortrieb der Kalotte hat einen gewissen Vorlauf zu jenen der Strosse und der Sohle. Diese Vorgehensweise kann in Abb. 2.2 eingesehen werden.¹⁹ Weitere Möglichkeiten sind zum einen der Einsatz von vorauseilenden Ulmenstollen bei breiten Ausbruchsprofilen, zum anderen werden in stark druckhaftem Gebirge Vorausstollen eingesetzt. Diese eilen der Aufweitung (Kalottenprofil) voraus und ermöglichen eine Vorwegnahme der Verformungen. Weiter werden diese Stollen zur Vorerkundung des Gebirges herangezogen. Zu beachten ist, dass der Vortrieb und die darauffolgend erforderliche Aufweitung nicht gleichzeitig aufgeföhren werden können und sich eine Verlängerung der Bauzeit ergibt.

Die aktuell zum Einsatz kommenden Vortriebsverfahren entwickelten sich im Laufe der Zeit. Im anschließenden Abschnitt dieser Arbeit wird erläutert, wie die geschichtliche Entwicklung von Statten ging.

2.2 Geschichtliche Entwicklung bis zur modernen Technik

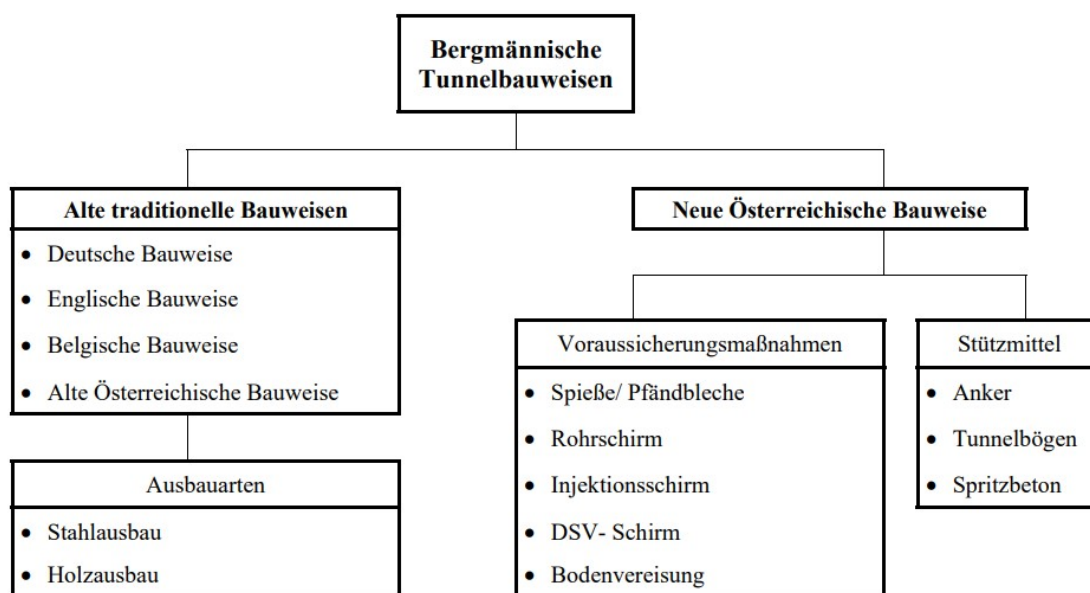


Abb. 2.3: Übersicht der bergmännischen Bauweisen sowie deren jeweilige Bestandteile des Ausbaus (Quelle: Adam [1], S. 67)

Bei zyklischen Vortrieben handelt es sich um sogenannte bergmännische Tunnelbauweisen. Abb. 2.3 behandelt die verschiedenen Varianten sowie die zum Einsatz kommenden Stützmittel. Da es sich beim Tunnelbau zumeist um sehr kostspielige Projekte handelt, ist nicht nur die richtige Auswahl der Ausbruchsmethode, sondern auch deren stetige Weiterentwicklung, essentiell. Andernfalls kann der wirtschaftliche Erfolg nicht langfristig sichergestellt werden.²⁰ Grundlage für die Einführung neuer Verfahren ist die Weiterentwicklung der einzusetzenden Gerätschaften, Arbeitsmittel und der Messtechnik.

In den anschließenden Unterkapiteln wird zuerst jeweils die geschichtliche Entwicklung und im Anschluss der Stand der Technik aufgezeigt.

¹⁹Vgl. [20] Girmscheid, S. 62

²⁰Vgl. [20] Girmscheid, S. 67

2.2.1 Traditionelle Bauweisen

Die ersten Tunnelbauwerke entstanden bereits vor tausenden Jahren. Die damals zur Verfügung stehenden Mittel und Werkzeuge sind mit den heute eingesetzten Hochleistungsmaschinen nicht zu vergleichen. Im Laufe der Zeit haben sich einige Bauweisen entwickelt – allerdings kommen viele heutzutage kaum mehr zum Einsatz. Im Folgenden werden die Wichtigsten, die in Europa zur Anwendung gekommen sind, behandelt.²¹

Deutsche Bauweise – Kernbauweise

Bei der im 19. Jahrhundert entwickelten Kernbauweise werden zu Beginn kleine Stollen an den Ulmen sowie im Anschluss in der Firste vorgetrieben. Der Kern bleibt bis zum Schluss bestehen – auf diesem kann sich das Gebirge abstützen. Noch vor dem Abtrag des Kerns werden die Widerlager sowie im Anschluss das Gewölbe gemauert oder betoniert. Die kleinen Stollen erschweren die Tunnellogistik. Schutterung, Bewetterung und Wasserableitung stellen einige Herausforderungen dar. Die kleinen Stollen bringen aber auch Vorteile mit sich. Die Holzverbauten benötigen eine geringere Mächtigkeit und durch die kleinen Ausbruchsprofile werden Setzungen minimiert. Diese Vorgangsweise kommt heute noch vereinzelt beim Auffahren von Kavernen zur Anwendung. Eine ähnliche Bauweise, der Ulmenstollenvortrieb, wird bei großen und all jenen Querschnitten, die keinen Kalottenvortrieb zulassen, angewendet.²²

Englische Bauweise – Längsträgerbauweise

Bei der englischen Bauweise werden größere Abschnitte der Mauerung in einem Zug eingebracht. Zuvor wird der Gesamtquerschnitt mit kleineren Stollen ausgebrochen und anschließend temporär mit einer Jochzimmerung gestützt. Letztere besteht aus Verböhlungen und den namensgebenden Längsträgern. Nachdem einige Meter aufgefahren wurden, wird der Verbau durch die Mauerung ersetzt. Gegenüber der zuvor beschriebenen deutschen Bauweise ergeben sich Vor- und Nachteile. Der vollflächige Ausbruch erleichtert die Schutterung, Belüftung sowie die Wasserhaltung. Weiter können die einzelnen Arbeitsvorgänge parallel ausgeführt werden. Allerdings ergibt sich durch die auf der schon bestehenden Mauerung aufgesetzten Kronenbalken, die zur Sicherung der Firste eingesetzt werden, ein deutlicher Mehrausbruch. Zusätzlich kommt es aufgrund des großen Ausbruchsquerschnitts zu einem großen Druck auf die Ortsbrust. Folglich ist diese mit einem aufwendigen Verbau zu stützen.²³

Belgische Bauweise – Unterfangungsbauweise

Im Vergleich zu den anderen Bauweisen, die in diesem Kapitel beschrieben werden, folgt die belgische Bauweise einem konträren Zugang. Speziell ist, dass zu Beginn der Firstbereich ausgebrochen wird. Auf aufwendige Holzzimmerungen wird verzichtet, stattdessen wird sofort die endgültige Mauerung verbaut. Für diese Bauweise ist der nächste Arbeitsschritt, die Unterfangung, maßgebend. Es werden die Ulmenbereiche ausgebrochen und anschließend die Mauerung vollzogen, bevor zum Schluss der Kernbereich abgetragen wird. Ist ein Sohlgewölbe erforderlich, kann dieses erst nach dem Kernabtrag eingebaut werden. Dieser Umstand kann Probleme mit sich bringen. Der lange Zeitraum bis zum Ringschluss führt in schlechten geologischen Verhältnissen zu hohen Verschiebungen und folglich großen Belastungen auf den Ausbau. Aus diesem Grund kam es zu dem, in Kap. 2.3 beschriebenen, Verbruch beim Bau des Massenbergtunnels und anschließend zum erstmaligen Einsatz der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode beim Bau eines Straßentunnels.²⁴

²¹ Vgl. [21] Goger, S. 1

²² Vgl. [21] Goger, S. 7

²³ Vgl. [1] Adam, S. 69

²⁴ Vgl. [43] Stipek et al., S. 129 ff.

Alte Österreichische Bauweise – Ringbetriebsbauweise

Als erster Teilbereich wird ein kleiner Sohlstollen aufgeföhren. Dieser eilt den anderen Vortriebsbereichen bis zu 300 Meter voraus. In den hinteren Bereichen werden kleine vertikale Aufweitungen, die sogenannten Aufbrüche, vollzogen (Vgl. Abb. 2.4). Ist man mit diesen auf Firstniveau angelangt, werden wiederum zwei kleine Stollen in und entgegen der Vortriebsrichtung des Sohlstollen aufgeföhren. Aufgrund dieser Vorgehensweise und dem Einsatz vieler Mineure, entstehen mehrere Vortriebssäste – es kommt zu einer Maximierung der Vortriebsleistung. Im hinteren Vortriebsbereich wird der Firststollen seitlich aufgeweitet, bevor abschließend die Umlenker ausgebrochen werden. Zum Schutz der Mineure und zur Verschiebungsminimierung werden bei all den beschriebenen Vorgängen temporäre Holzverbauten vorgesehen. Nachdem der volle Querschnitt aufgeföhren ist, werden die Widerlager und das Gewölbe gemauert. In vielen Projekten wurde auf den Einbau eines Sohlgewölbes verzichtet. Folglich kam es in einigen Fällen zu Verdrückungen, die selbst durch Einbau einer sehr dicken Schale nicht verhindert werden konnten.²⁵

Die Alte Österreichische Tunnelbauweise wurde gemeinsam mit der belgischen Bauweise über lange Zeit bei den meisten Vortrieben eingesetzt. In Amerika unter „Multiple Drift Method“ bekannt, wird sie auch heute noch eingesetzt.

In Österreich wurde sie erstmals im Jahr 1839 bei dem Bau eines Tunnels bei Gumpoldskirchen angewendet. Dieser ist Teil der Strecke Wien-Gloggnitz, nach deren Fertigstellung mit dem Großprojekt Semmeringbahn begonnen wurde. Die Errichtung der Bauwerke der Semmeringbahn wurde ebenfalls unter Einsatz der alten Österreichischen Tunnelbauweise bewerkstelligt.²⁶ Beim Bau des 1434 Meter langen Haupttunnels wurde zusätzlich zu den Vortrieben von den beiden Portalen aus, auch von mehreren Schächten aus, vorgetrieben. Aus diesem Grund und mithilfe der oberhalb beschriebenen Vorgehensweise ergaben sich über 20 Angriffsstellen gleichzeitig.

Aufgrund der hohen Anzahl an Angriffspunkten ist der logistische Aufwand enorm. Um eine funktionierende Schutterung und die Versorgung der Vortriebe und Mauerungsarbeiten aufrecht erhalten zu können, mussten zusätzlich zu den Mineuren (direkt produktives Personal) hunderte unproduktive Arbeiter für die Aufrechterhaltung einer funktionierenden Logistik eingesetzt werden.²⁷

2.2.2 Maschinen, Werkstoffe, Messtechnik

Die Grundlage für die Entwicklung neuer Bauverfahren bildet die stetige Weiterentwicklung der eingesetzten Maschinen, Materialien und der Messtechnik. In diesem Kapitel wird zu Beginn der geschichtliche Werdegang all dieser Punkte beleuchtet, bevor anschließend der aktuelle Stand der Technik angeführt wird.

Geschichtliche Entwicklung

Die ersten Tunnelbauwerke wurden schon vor tausenden Jahren unter dem Einsatz schwerster Handarbeit mit Spitzhacken und Brecheisen vorgetrieben. Mit der Erfindung des Schwarzpulvers erfuhr der Tunnelbau eine erste Revolution – die Herstellungsgeschwindigkeit der Sprenglöcher bestimmte anschließend die Vortriebsleistung. Das Interesse am Bergbau zur Schaffung von Verkehrswegen stieg mit der Erfindung der Eisenbahn stark an. Die Abbautechniken des Bergbaus haben eine bestmögliche Ausbeutung des Gebirges als Ziel, beim Tunnelbau wird allerdings eine hohe Lebensdauer und Sicherheit angepriesen. Diese konträren Zugänge verlangten eine

²⁵Vgl. [1] Adam, S. 73

²⁶Vgl. [25] Müller, S. 570 ff.

²⁷Vgl. [39] Pap, S. 100

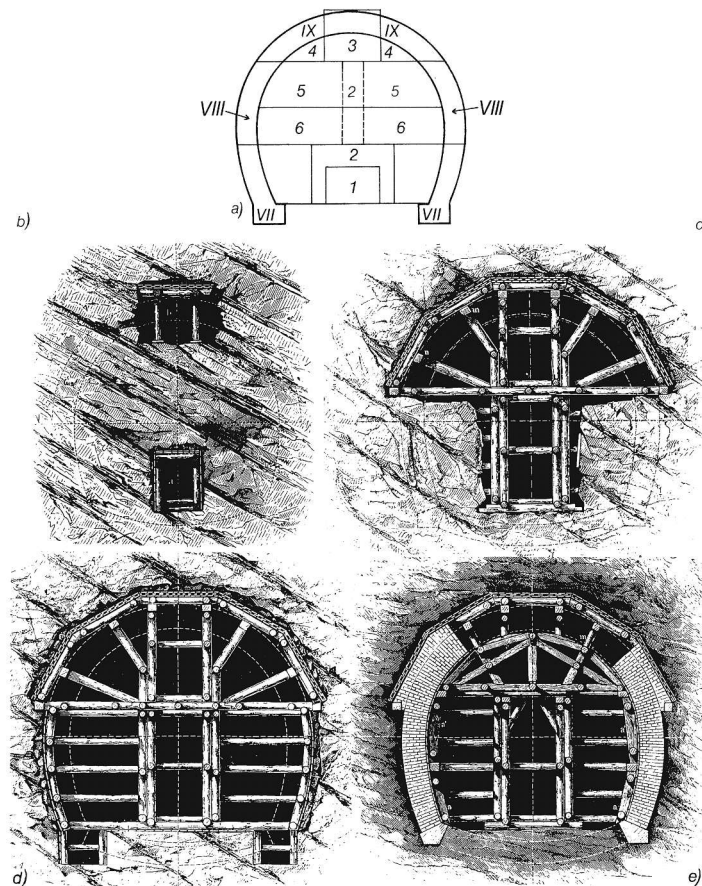


Abb. 2.4: Ausbruchsreihenfolge der einzelnen Teilquerschnitte im Zuge der alten österreichischen Bauweise (Quelle: Müller [25], S. 572)

Weiterentwicklung der Bergbauverfahren. Im Bauzustand wurden temporäre Holzzimmerungen eingesetzt, die für den späteren Betrieb durch gemauerte Gewölbe ersetzt wurden.²⁸

Die Entwicklung des heute höchstpräzisen Vermessungswesens und dessen Systeme wurden in den letzten Jahrzehnten stark vorangetrieben. Allerdings wurden, wie in Kap. 2.2.1 beschrieben, schon viel früher Meisterleistungen der Ingenieurkunst geschaffen. Als Beispiel ist hier der Haupttunnel auf der alten Semmeringbahn zu nennen. Schon rund 1850 wurde dieser Tunnel ohne einen großen Durchschlagsfehler von mehreren Angriffspunkten aus erfolgreich vorangetrieben.²⁹

Stand der Technik

In Europa kommt heutzutage beim universellen Vortrieb annähernd ausschließlich die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) zur Anwendung. Diese wurde im 20. Jahrhundert entwickelt und wird in Kap. 2.3 ausführlich beschrieben. Grundstein für die Einführung dieser Methode ist der Einsatz von Spritzbeton. Müller beschreibt in *Der Felsbau, Band 3 Tunnelbau* [25] den Spritzbeton als vollkommeneren Verbaumethode gegenüber den früher eingesetzten Holz- und Stahlverbauten, weil sich eine bessere erste Abstützung und Stabilisierung des Gebirges einstellt. Zusätzlich bringt der Einsatz von Spritzbeton eine kürzere Einbauzeit gegenüber Holzverbauten

²⁸Vgl. [21] Goger, S. 1 f.

²⁹Vgl. [39] Pap, S. 99 ff.

mit sich, wodurch nahezu jegliche Fels- bzw. Bodenformationen mit noch so kurzen freien Standzeiten bewältigt werden können.³⁰

Zusätzlich zu den Materialien hat auch die Maschinenteknik eine Revolution erfahren. Es kommen speziell für den Tunnelbau entwickelte Geräte zum Einsatz. In Abb. 2.5 ist eine dieser Hochleistungsmaschinen dargestellt. Mit diesem sogenannten Bohrwagen werden Sprenglöcher gebohrt (siehe Kap. 2.4) und einige Stützmittel (siehe Kap. 2.5) eingebaut. Weiter werden Bagger, Radlader, Spritzbetonmanipulatoren, Hebebühnen usw. eingesetzt.

Wie in Kap. 2.3 beschrieben, sind die laufende Überwachung und Interpretation der Gebirgsverschiebungen wichtige Grundsätze der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode. Anhand der gewonnenen Daten kann untersucht werden, ob sich das System im erwarteten Ausmaß verhält, oder ob Adaptierungen am Ausbau oder Ausbruch erforderlich sind. Um diese Daten zu gewinnen, werden heutzutage 3D-Verschiebungsmessungen, Extensometer, Inklinometer, Druckmessdosen, Dehnmessstreifen, Messanker, Piezometer usw. eingesetzt. Durch die Erfindung dieser Gerätschaften und Messtechniken hat der zyklische Tunnelvortrieb große Änderungen erfahren. Welche Messgeräte verbaut werden, ist mit Bedacht zu wählen, weil sie oftmals hohe Investitionskosten mit sich bringen. Allerdings können die gewonnenen Daten wichtige Erkenntnisse für die weiteren Vortriebsarbeiten liefern und folglich daraus Bauzeit-, Material- und somit immense Kostenersparnisse entstehen, die wiederum die Investitionskosten um ein Vielfaches übertreffen.³¹

Um zyklische Vortriebe aufzufahren wird, wie schon eingehend erwähnt, im Regelfall die NÖT angewendet. Diese revolutionäre Herangehensweise bietet die Möglichkeit laufender Adaptierungen des Ausbauwiderstands und wird im anschließenden Teil dieser Arbeit ausführlich erklärt.

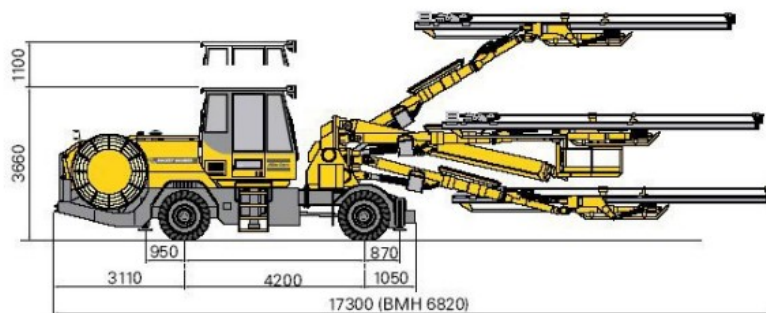


Abb. 2.5: Schematische Darstellung eines Bohrwagens mit drei Lafetten und einer Hebebühne (Quelle: Goger [21], S. 72)

2.3 Neue österreichische Tunnelbaumethode

Im Vergleich zu den in Kap. 2.2.1 beschriebenen Vorgehensweisen folgt die NÖT einem konträren Konzept – der Bereich um den geschaffenen Hohlraum soll die Lasten mittragen.³² Durch diesen revolutionären Zugang konnte das Preis-Leistungsverhältnis der Großprojekte stark verbessert werden.³³ Die NÖT wurde erstmals in den 1950er Jahren zum Ausbau von Wasserstollen in Tirol und anschließend beim Bau des Massenbergstraßentunnels in den Jahren 1964 und 1965 angewendet. Dieser ist Teil der Südmumfahrung der steirischen Stadt Leoben und wurde zu Beginn

³⁰Vgl. [25] Müller, S. 577 ff.

³¹Vgl. [41] Pilgerstorfer et al., S. 424 ff.

³²Vgl. [1] Adam, S. 73

³³Vgl. [43] Stipek et al., S. 9

nach der belgischen Bauweise aufgeföhren. Nachdem es im Zuge der Vortriebsarbeiten zu einem Tagbruch kam, wurde Herr Prof. Rabcewicz zur Umplanung und Bauüberwachung bestellt. Dieser gilt als Miterfinder der NÖT und setzte auf die, noch heute gültigen, Grundsätze der neuen Baumethode. Durch diese Umstellung konnten die schwierigen in situ Verhältnisse erfolgreich aufgeföhren werden.³⁴

Im ursprünglichen Zustand verfügt der Gebirgs- bzw. Bodenkomplex über eine gewisse Eigentragfähigkeit. Diese wird im Zuge des Ausbruchs herabgesetzt. Durch den Einbau von Spritzbeton und etwaigen weiteren Sicherungsmaßnahmen kommt es zu der Aktivierung eines Tragringes – das Gebirge rund um dem Ausbruchsrand bildet gemeinsam mit der Ankerung und den weiteren Stützmitteln ein tragendes Bauteil. Dieses komplexe Tragwerk erlaubt die, für die Spannungsumlagerung erforderliche, Verformung. Der Ausbau kann in geringerem Maße und somit wirtschaftlicher ausfallen.³⁵ Der Zeitpunkt des Stützmitteleinbaus spielt eine wichtige Rolle. Dies kann in Abb. 2.6 eingesehen werden. Auf der Abszisse ist die Verformung und auf der Ordinate der sogenannte Ausbauwiderstand eingetragen. Letzterer beschreibt den erforderlichen radialen Stützdruck, der aufgrund der nicht mehr vorhandenen Primärspannungen nun vom Ausbau ausgeübt werden muss.³⁶ Mithilfe der, für einen Gebirgsverhaltenstyp spezifischen, Gebirgskennlinie wird ein Zusammenhang zwischen der Verformung und dem erforderlichen Widerstand eingeföhrt. In der Abbildung ist eine solche Kennlinie beispielhaft eingezeichnet.

Wird eine geringe Verschiebung der Laibung gefordert, muss die Aufbringung des Widerstandes ehestmöglich erfolgen. Diese Forderung ergibt sich bei Tunneln mit geringer Überlagerung oder auch in innerstädtischen Gebieten. Bei tiefliegenden Tunneln ist diese Erfordernis meist nicht gegeben. Durch das Aufföhren eines größeren Übermaßes können Verformungen der Tunnellaibung kontrolliert zugelassen werden. Ein andernfalls erforderlicher, extrem steifer Ausbau kann dadurch vermieden und ein wirtschaftliches Arbeiten sichergestellt werden.³⁷ Wie in Abb. 2.6 eingesehen werden kann, sinkt der aufzubringende Widerstand mit zunehmender Verschiebung. Dies wird durch die Gebirgsentspannung ermöglicht. Steigen die Verformungen zu stark an, kann es jedoch zu einer Auflockerung und somit zu einem erneuten Anstieg der Gebirgskennlinie kommen. Um den rechtzeitigen Einbau der Stützmittel sicherstellen zu können, kann das Ausbruchsprofil in mehrere Teilflächen aufgeteilt werden. Zum Beispiel wird die Kalotte, wie in Abb. 2.2 dargestellt, in Teilbereiche unterteilt, die zeitlich versetzt vorgetrieben werden. Durch diesen Umstand wird zwar die Vortriebsgeschwindigkeit gesenkt – die Standsicherheit des Gesamtbauwerkes und die Arbeitssicherheit können allerdings sichergestellt werden.

Die Steigung der Ausbaukennlinie ergibt sich aus der Anzahl, Stärke und Effektivität der eingesetzten Stützmittel. Eine steilere Linie (Nummer 2) kennzeichnet einen vergleichsweise steifen, die flachere Linie 1 einen nachgiebigen Ausbau mit Stauelementen (siehe Kap. 2.5). Durch die richtige Wahl der Stützmittel, deren Umfang und Einbauzeitpunkt kann sich ein Gleichgewicht bei lediglich geringem Materialaufwand einstellen. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit wird ein Sicherheitsfaktor von 1,0 angestrebt. Dieser gilt lediglich für den Bauzustand und muss laufend überwacht werden. Nehmen die Verformungen nicht rasch genug ab, müssen Gegenmaßnahmen, zum Beispiel Nachankerungen, eingeleitet werden. Eine Erhöhung der Sicherheit wird im Regelfall erst nach Beendigung der Vortriebsarbeiten durch den Einbau der Innenschale verwirklicht.³⁸ Eine ausführliche Beschreibung der Ortbetoninnenschale folgt in Kap. 3.3.

Um eine wirtschaftliche Abwicklung eines Bauvorhabens sicherzustellen, sind die Ausbruchsmethode sowie die Erfordernis der Sicherungsmaßnahmen laufend neu zu bewerten. Mithilfe täglicher

³⁴Vgl. [43] Stipek et al., S. 129 ff.

³⁵Vgl. [21] Goger, S. 104

³⁶Vgl. [1] Adam, S. 31

³⁷Vgl. [31] ÖNORM B 2203-1

³⁸Vgl. [1] Adam, S. 74

geotechnischer Messungen und der im Zuge des Baufortschritts gewonnenen Erfahrungen wird eine schnelle Adaptierung ermöglicht.

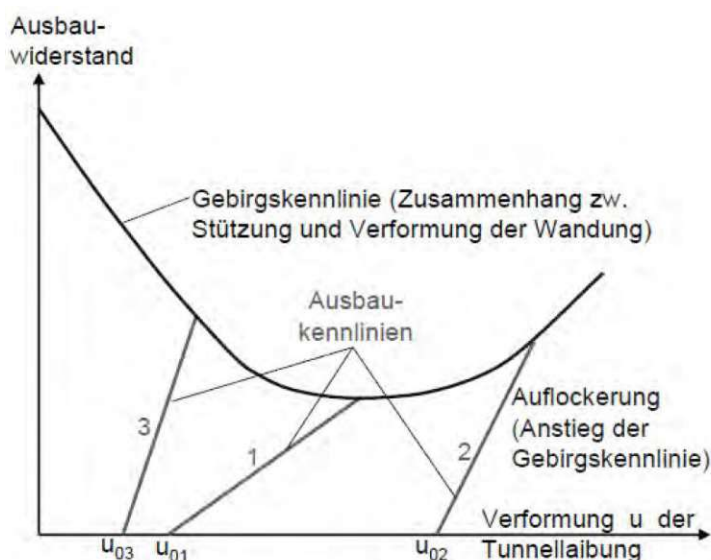


Abb. 2.6: Beispielhafte Gebirgs- und Ausbaueigenschaften zur Beschreibung des erforderlichen Ausbauwiderstands bei radialen Verformungen (Quelle: Vogt [51])

2.4 Vortriebsarten

Der zyklische Vortrieb umfasst all jene Vortriebsarten, bei denen die einzelnen Arbeitsvorgänge mit Einzelgeräten und zeitlich hintereinander ausgeführt werden (Vgl. Kap. 2.1). In den folgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten Vortriebsarten und deren jeweiliges Einsatzgebiet kurz beleuchtet. Wie der Name zyklischer Vortrieb schon verrät, wiederholen sich die Arbeitsschritte immer wieder. Es ergibt sich ein Kreislauf aus Abbauarbeiten, Schutterung, Stützmitteleinbau, Vorrassicherung und etwaiger Bohrlochherstellung.

Baggervortrieb

Im Lockergestein und Gebirge mit geringer Festigkeit kann unter Einsatz eines Tunnelbaggers eine gute Vortriebsleistung erreicht werden. Als Abbauwerkzeug kommen Tieflöffel, Abbaulöffel, Hydraulikmeissel und Schneidköpfe zum Einsatz. Die Baugeräte sind sehr stabil und robust ausgeführt, um den anspruchsvollen Einsatzbedingungen trotzen zu können. Im Vergleich zu üblichen Hydraulikbaggern, die im Erd- und Hochbau eingesetzt werden, weisen die Tunnelbagger eine niedrigere Bauhöhe auf. Durch die seitliche Kippmöglichkeit des Armes wird die geforderte Reichweite und die Möglichkeit des profilgenauen Abbaus verwirklicht.³⁹ Um den Gerätefahrer bestmöglich zu schützen sind die Maschinen mit stählernen Kabinenkäfigen ausgestattet.

Sollen kleine Querschnitte aufgefahren werden, stoßen Tunnelbagger aufgrund ihrer Größe schnell an ihre Grenzen. In diesem Fall ist der Einsatz von Teilschnittmaschinen zu bevorzugen.

Sprengevvortrieb

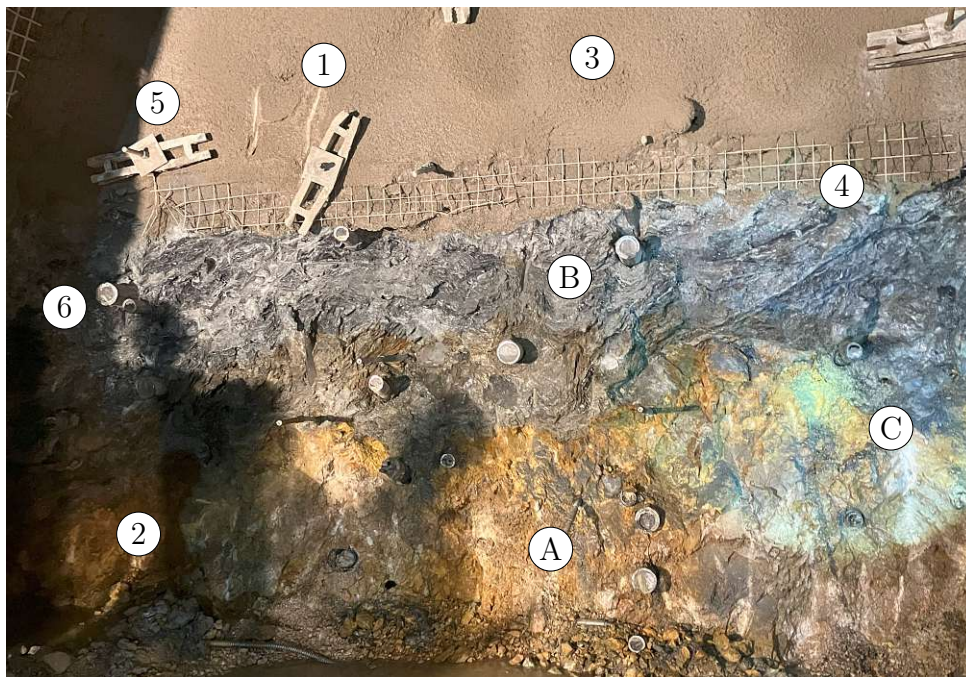
Weißt der Gebirgskomplex eine mittlere bis hohe Festigkeit auf, erweist sich der Sprengevvortrieb meist als wirtschaftlichste Methode. Die Ladung wird in Sprenglöchern platziert, die zuvor von einem Bohrwagen abgebohrt wurden. Der Sprengstoff kann entweder in Patronen- oder flüssiger

³⁹Vgl. [20] Girmscheid, S. 147

Form eingesetzt werden. Durch den Einsatz von Zündern im Bohrlochtiefsten werden Kreisläufe mit unterschiedlichen Zündstufen erstellt. Mittels einer Zündmaschine wird anschließend die Sprengung ausgelöst.⁴⁰ Nach einer Bewetterungspause kann mit den nächsten Arbeitsschritt des beschriebenen Zyklus begonnen werden.

Hybridvortrieb

In Bereichen mit wechselnden Verhältnissen, im Englischen „mixed face conditions“ genannt, ist ein Hybridvortrieb/Mischvortrieb unumgänglich. Trifft man an der Ortsbrust mehrere geologische Komplexe mit unterschiedlichen Festigkeiten an, muss kurzfristig entschieden werden, welche Vortriebsart die Effizienteste darstellt.⁴¹ In Abb. 2.7 kann dieser Umstand eingesehen werden. Im unteren Bereich der Teilfläche kann eine ockerfarbene karbonatische Brekzie (A) sowie rechts quarzische Einschaltungen (C) eingesehen werden. Diese weisen hohe Festigkeiten auf und müssen im Sprengvortrieb aufgefahren werden. Im oberen Bereich der Teilfläche findet man phyllitischen Glimmerschiefer (B). Dieser Komplex ist sehr weich, inkompetent und neigt zu Nachbrüchen – in diesem Teil ist kaum eine Verbandsfestigkeit vorhanden. Dieser Glimmerkomplex kann lediglich unter größter Vorsicht mit der Baggerschaufel abgebaut werden. Aus diesem Umstand ergeben sich unumgängliche Rüstzeiten und die Erfordernis, die Orstbrust in mehrere kleinere Teile, die hintereinander aufgefahren werden, zu unterteilen (= Teilflächenvortrieb).



- | | | |
|--------------------------|--------------------|-------------------------|
| A. Karbonatische Brekzie | B. Glimmerschiefer | C. Quarziteinschaltung |
| 1. Gesicherter Bereich | 3. Spritzbeton | 5. Ortsbrustanker |
| 2. Ungesicherter Bereich | 4. Baustahlgitter | 6. Injektionsventilrohr |

Abb. 2.7: Teilfläche einer Kalotte bei mixed face conditions in einem österreichischen Tunnel (Quelle: Eigene Aufnahme)

⁴⁰Vgl. [21] Goger, S. 72

⁴¹Vgl. [21] Goger, S. 94

Teilschnittmaschinenvortrieb

In kleinen Stollen können Tunnelbagger und Bohrwagen aus geometrischen Gründen nicht eingesetzt werden. Weiter ist bei Projekten mit kurzen Vortriebsstrecken die Anschaffung einer TVM mit kleinen Ausbruchquerschnitt oft unwirtschaftlich. In solchen Fällen haben sich Teilschnittmaschine (TSM) als probates Mittel erwiesen. Sie übernehmen die Aufgaben des Ausbruchs, des Ladens und der Schutterung des Gutes aus dem direkten Vortriebsbereich. Lediglich der Einbau von Stützmitteln muss mit separatem Gerät erfolgen. Mit diesen Maschinen ist somit ein semikontinuierlicher Vortrieb möglich. Dieser gestaltet sich weitgehend erschütterungsfrei und wird daher vermehrt in bebautem Gebiet eingesetzt.⁴²

In hartem Fels und bei größeren aufzufahrenden Querschnitten stoßen Teilschnittmaschinen allerdings rasch an ihre Grenzen. Zusätzlich stellt die große Staubeentwicklung im Zuge des stetigen Ausbruchs ein Problem im Bezug auf die Arbeitssicherheit dar.

2.5 Stützmittel

Damit sich der, in Kap. 2.3 beschriebene, Gebirgstragring einstellen kann, ist ein gewisser Ausbauwiderstand herzustellen. Dieser kann durch den Einbau von Stützmitteln realisiert werden. Im Folgenden werden all jene beschrieben, die am häufigsten zum Einsatz kommen.

Anker

Eines der wichtigsten Stützmittel im Tunnelbau stellen Ankerungen dar. Sie sind auf Zug oder Abscheren belastete Stäbe, Rohre oder Litzen.⁴³ Sie sollen nicht nur ein Herabfallen einzelner Gesteinsblöcke verhindern, sondern sind für die Ausbildung des Gebirgstragringes und einer gewissen Verdübelung des Komplexes zuständig. Zu hohe Verschiebungen und die damit einhergehende Entfestigung des Gebirges können durch den Einbau von Ankern in Kombination mit mehreren Schichten aus bewehrtem Spritzbeton zumeist verhindert werden (Vgl. Kap. 2.3).

In Abhängigkeit der vorliegenden geologischen Situation kann aus einer Vielzahl verschiedener Ankertypen und Längen ausgewählt werden. Der Einbau hat immer möglichst normal auf die Schichtflächen zu erfolgen – Ankerungen parallel oder in spitzem Winkel zur Schichtung sind zu verhindern.⁴⁴ In einem Baugrund mit geringer Festigkeit werden zusätzlich zu der radialen Ankerung auch sogenannte Ortsbrustanker eingebaut. Diese tragen zur Ortsbruststabilität bei und ermöglichen einen sicheren Vortrieb. Diese sind in Abb. 2.7 dargestellt. Um Überbelastungen der Betonversiegelung zu vermeiden können zusätzlich zu den Ankerplatten sogenannte Lastverteiler eingesetzt werden (Siehe Abb. 2.7). Diese sind erforderlich, weil der einerseits nur wenige Zentimeter dick aufgetragene und andererseits noch kaum ausgehärtete Spritzbeton andernfalls eine lokale Überbelastung erfahren würde. In Abb. 2.8 ist die Kraftabtragung eines Verpresspfahls dargestellt. Die Lasten werden über Schubspannungen ins Gebirge abgetragen. Die im Tunnelbau eingesetzten Anker werden zumeist über die volle Länge verpresst und stellen somit gemäß der Definition in der ÖNORM EN 1997-1-1 [35] Verpresspfähle dar.

Spritzbeton

Die Einführung der NÖT wurde durch die Erfindung des Spritzbetons ermöglicht. Namensgebend ist die Art der Aufbringung. Das Gut wird mit hoher Geschwindigkeit direkt auf das anstehende Erdreich/Gebirge aufgebracht und versiegelt die Oberfläche. Aufgrund des Drucks des Strahles wird automatisch eine ausreichende Verdichtungsarbeit geleistet. Durch die Beimischung von Beschleunigern wird der Erhärtungsvorgang des Gemisches stark beeinflusst. Ein erstes leichtes

⁴²Vgl. [20] Girmscheid, S. 150

⁴³Vgl. [31] ÖNORM B 2203-1

⁴⁴Vgl. [1] Adam, S. 84 ff.

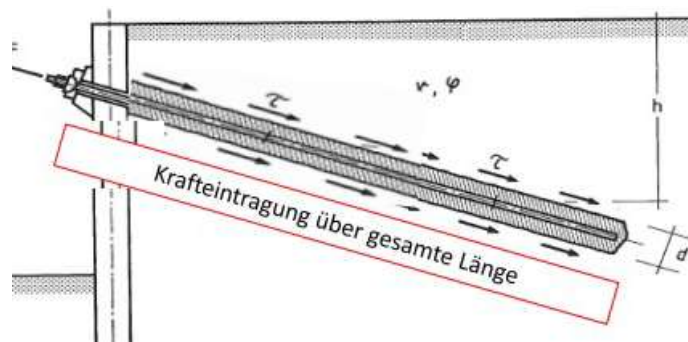


Abb. 2.8: Funktionsweise eines Verpresspfahls – Kraftübertragung über die ganze Länge aufgrund der voll verpressten Ankerstrecke (Quelle: ÖNORM EN 1997-1 [35])

Ansteifen passiert innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde. Durch diesen Umstand haftet der aufgespritzte Beton an der Laibung/Ortsbrust. Im frischen Zustand bringt der Spritzbeton einen für die NÖT großen Vorteil mit sich – er weist elastoplastisches Verhalten auf und erlaubt dadurch die Entlastung des Gebirges durch gewisse Verformungen. Somit kann die gewünschte Spannungsumlagerung erfolgen und sich in weiterer Folge der, im Kap. 2.3 beschriebene, Gebirgstraging einstellen.⁴⁵

Im Laufe der letzten Jahrzehnte haben sich verschiedenste Spritzbetonverfahren etabliert. Grob kann man diese in Trocken- und Nassspritzverfahren unterteilen. Bei ersterem wird ein Trockengemisch erst im Vortriebsbereich mit Wasser und in weiterer Folge mit Erstarrungsbeschleuniger vermischt. Bei kleineren Querschnitten sowie geringen Kubaturen kommen Trockenspritzbetonverfahren zur Anwendung. Im Allgemeinen werden sie allerdings selten eingesetzt, weil es einerseits zu einer großen Staubentwicklung kommt und die Leistungsfähigkeit der Trockenspritzgeräte gering ist. Beim Nassspritzverfahren wird der flüssige Beton obertage gemischt. Dies passiert entweder in, auf der Baustelle stationären, Mischanlagen oder externen Betonwerken. Fahrmaschinen bringen das Gut in den Vortriebsbereich und übergeben es an den Spritzbetonmanipulator. Direkt an der Düse erfolgt letztlich die Zugabe des Beschleunigers. Durch den Einsatz eines Manipulators ergeben sich Vorteile bei der Materialqualität, Arbeitssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Sicherung des Ausbruchsrandes.⁴⁶

Bewehrung

Ab gewissen Schichtdicken der Spritzbetonschale ist, zur Aufrechterhaltung des Gesamtverbundes, Bewehrung einzubauen. Um eine wirtschaftlich optimierte Ausführung zu ermöglichen, ist lediglich Mattenware einzusetzen und in Abhängigkeit der variierenden Abschlagslängen zuzuschneiden. In den letzten Jahren wird der Einsatz von Stahlfaser- anstatt Stahlbeton immer häufiger. Durch diese alternative Herangehensweise können einige, teils gefährliche, Arbeitsschritte vermieden werden. Laut Girmscheid [20] ist durch den Einbau einer Stahlfaserbetonaußenschale gegenüber einer einlagig bewehrten Spritzbetonschale eine Zeitersparnis von bis zu 40 Prozent zu bewerkstelligen. Zusätzlich kann die Bildung von Spritzschatten und eine daraus resultierende schlechtere Qualität der Schale vermieden werden.⁴⁷

Tunnelbögen

Bögen werden in nicht standfestem Bereichen eingesetzt. Durch die Bogenwirkung kann sofort eine gewisse Abstützung des anstehenden Gebirges erreicht werden. Weiter dienen sie als Auflager

⁴⁵Vgl. [21] Goger, S. 196

⁴⁶Vgl. [20] Girmscheid, S. 171 ff.

⁴⁷Vgl. [20] Girmscheid, S. 222

für die Mattenbewehrung. Sie müssen gewisse Anforderungen in Bezug auf den Verbund mit dem Spritzbeton, sowie bezüglich den aufzunehmenden Biege- und Normalkraftbeanspruchungen, allerdings keine dauerhaften statischen Anforderungen, erfüllen.⁴⁸

Spieße, Pfändbleche

Mit Anker und Spritzbeton können aufgefahrene Bereich des Tunnels gesichert werden. Um die Ausbruchsarbeiten möglichst unproblematisch abwickeln zu können, ist eine Voraussicherung einzusetzen. Diese kann durch Spieße und Pfändbleche, die den Hohlraumrand stützen, verwirklicht werden. In der Tunnelfirste eingebaut, sollen sie ein Herabgleiten von Felskörpern, Findlingen oder Lockergestein verhindern. Es kommt zu einer Verdübelung des Gesamtkomplexes. Aufgrund der speziellen Form von Gitterträgern (eine spezielle Ausführung der Tunnelbögen) bietet sich ein Einbau der Spieße zwischen Innen- und Außengurt der Gitterbögen an. Dadurch kann der Bogen später als Auflager für die Rohrspieße wirken. Aus geometrischen Gründen werden Spieße mit wenigen Grad Neigung schräg nach oben verbaut und folglich entsteht im Zuge der Ausbruchsarbeiten ein leichtes Überprofil, welches im Nachgang mit Spritzbeton verfüllt werden muss.

Spieße werden im Festgestein in vorgebohrte Löcher geschoben. In nicht bindigen Böden werden Pfändbleche eingeschoben/ingerüttelt. Letztere bilden flächenhafte Sicherungen. Diese beiden Voraussicherungsmaßnahmen sind jeden Abschlag nach zu setzen.

Rohrschirm

Zur Voraussicherung können alternativ zu Spießern und Pfändblechen massive Rohrschirme, bestehend aus vielen einzelnen Rohren, eingebaut werden. Beim Einsatz von Ventilrohren und einer anschließenden Injektion über eben diese, kann der Bereich zwischen den Rohren abgedichtet werden. Somit entsteht, ähnlich zum Einsatz von Pfändblechen, eine flächenhafte Sicherung.

Einige dieser verfüllten Ventilrohre können in Abb. 2.7 eingesehen werden. In diesem Fall wurden sie allerdings nicht für einen Rohrschirm sondern zur Gebirgsinjektion verwendet.

Gegenüber den Spießern und Pfändblechen bringen Rohrschirme einige Vor- und Nachteile mit sich. Die höheren Trägheitsmomente der Rohrschirmrohre können größeren Belastungen standhalten. Weiter weisen die einzelnen Schirme höhere Längen auf. Ein Nachsetzen ist daher oftmals erst nach 7 – 9 Metern erforderlich. Allerdings wird für das Abbohren eines Rohrschirms sowie die anschließende Verfüllung/Injektion der Rohre bzw. des umliegenden Gebirges circa ein Tag benötigt. Der alternative Einbau eines Spießschirmes kann innerhalb einer Stunde erfolgen und ist außerdem weit kostengünstiger. Der durch den Rohrschirmvortrieb aufgefahrene Sägezahn muss zusätzlich im Nachgang mit Spritzbeton verfüllt werden. Aus diesen Gründen werden Rohrschirme nur in geologisch komplexen Bereichen und bei der Erfordernis eines annähernd setzungsfreien Vortriebs verbaut.⁴⁹

Stachelemente

In stark druckhaftem Gebirge kommt es unweigerlich zu Verschiebungen. Ein steifer Ausbau könnte diese nicht aufnehmen, ohne Schäden davonzutragen (Risse in der SpC-Schale o. Ä.) Als Folge solcher Schäden verliert das System an Steifigkeit – es kommt zu einer Überbelastung der Anker und zu weiterem Steifigkeitsverlust. Setzt sich dieser Kreislauf fort, sind eine unerwünschte Auflockerung des Gebirges sowie anhaltende Verschiebungen nicht aufzuhalten.

Die frisch aufgetragene Spritzbetonschale weist elastoplastisches Materialverhalten auf – bis zu einem gewissen Ausmaß können Verschiebungen aufgenommen werden. Werden diese zu groß, entstehen aufgrund der starken Querspannungen im Beton Risse.

⁴⁸Vgl. [21] Goger, S. 221

⁴⁹Vgl. [1] Adam, S. 97 f.

Diesem Phänomen wird durch bewusst eingebaute Fugen (Kontraktionsschlitz) in der SpC-Schale entgegengewirkt. Die Gebirgsverformung verursacht eine Verkürzung der Abwicklungslänge in der Laibung. Sind Kontraktionsschlitz vorhanden, schließen sich diese dadurch zunehmend. Zu den radialen Verformungen kommen im Regelfall auch Longitudinale hinzu. Diese können wiederum über sogenannte Radialfugen zugelassen werden.

Um die Verschiebungen kontrollieren zu können, werden diese Schlitz oftmals mit Stauchelementen bestückt. Diese gibt es mittlerweile in verschiedensten Ausführungen. Ziel ist es, die Verformung solange zuzulassen, bis eine gewisse Entspannung des Gebirges zugelassen wurde. Nach einigen Tagen sollen diese durch das Erlangen der Festigkeit von Beton und Ankervermörtelung eingedämmt werden. Folglich geht die Ausbildung der gewünschten Systemsteifigkeit von Statten. Durch diese Herangehensweise werde Verformungen aufgenommen, ohne dass sich Schadensbilder in der Spritzbetonschale einstellen. Der Gebirgstragring kann somit erfolgreich gebildet werden.⁵⁰



Abb. 2.9: Vortrieb in stark druckhaftem Gebirge unter dem Einsatz von acht Reihen Stauchelementen in einem Tunnel in Österreich (Quelle: Eigene Abbildung)

In der Abbildung 2.9 ist ein Tunnel in Österreich dargestellt. Dieser führt unter anderem durch stark druckhafte Gebirgsbereiche. Um die Verformungen schadlos in die Spritzbetonschale übertragen zu können, müssen einige Reihen an Stauchelementen verbaut werden. Während des Strossen- und Sohlvortriebs folgen längere Standzeiten der Ortsbrustwand. In diesem Zeitraum kommt es zu großen Deformationen im Ortsbrustbereich. Um Schäden aufnehmen zu können sind Kontraktionsschlitz, gefüllt mit Platten aus extrudiertem Polystyrol, vorzusehen.

DSV-Schirme, Injektionen, Vereisung

Um einen sicheren Vortrieb zu ermöglichen müssen in geologischen Störungszonen, unter Flüssen oder innerstädtisch in manchen Fällen sehr kostenintensive Vorkehrungen getroffen werden.

Durch Einsatz des Düsenstrahlverfahren (DSV) oder Injektionen können die in situ Eigenschaften von Böden und Gebirge grundlegend verändert werden. Die Durchlässigkeit kann stark

⁵⁰Vgl. [21] Goger, S. 224

verringert werden – dadurch wird ein Auffahren von Tunneln durch stark wasserführende Zonen ermöglicht. Weiter können diese Verfahren zur Gebirgsvergütung eingesetzt werden – dabei wird die Festigkeit des Gesamtverbundes erhöht.

Die Bodenvereisung kommt oftmals bei Flussunterquerungen zum Einsatz. Durch Einfrieren des Boden-Wasserkomplexes wird ein sicherer Vortrieb ermöglicht. Es kann flüssiger Stickstoff oder eine Solelösung eingesetzt werden. Diese kostenintensive Maßnahme hat allerdings einen eingeschränkten Anwendungsbereich. Schon bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten kann kein geschlossener Dichtkörper hergestellt werden.⁵¹

2.6 Bewetterung

Bei jeglichen Arbeiten in Tunneln ist die Versorgung mit Frischluft sicherzustellen. Dies ist aus diversen Gründen unumgänglich:⁵²

- Versorgung der Arbeiter mit atembare Luft
- Verdünnung von Staub, Motoremissionen, usw
- Abtransport des Bojans (giftige Sprengschwade)
- Minimierung der Feinstaubbelastung (Quarzfeinstaub, ...)
- Erhöhung und Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit von Geräten und Maschinen
- Verhinderung/Einschränkung der Lufterwärmung

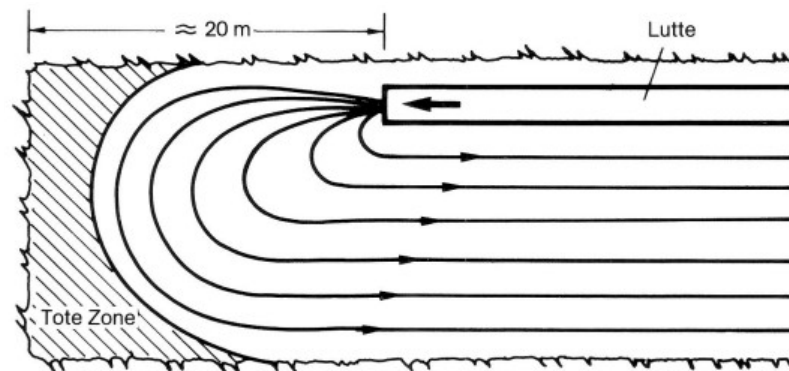


Abb. 2.10: Funktionsweise einer drückenden Bewetterung durch den Einsatz einer Belüftungslutte (Quelle: Goger [21])

Die Belüftung kann über eine drückende oder saugende Bewetterung bewerkstelligt werden. Bei langen Bauwerken kommen alternativ Umluftsysteme zum Einsatz. In Abb. 2.10 kann das System einer drückenden Bewetterung eingesehen werden. Durch sogenannte Lutten wird die Frischluft in den Tunnel geblasen und die teilweise verunreinigte Luft strömt anschließend durch die Tunnelröhre aus dem Bauwerk. Lutten müssen regelmäßig nachgebaut werden, um die Versorgung der Arbeiten im direkten Ortsbrustbereich sicherstellen zu können. Um eine Zerstörung

⁵¹Vgl. [1] Adam, S. 99 ff.

⁵²Vgl. [20] Girmscheid, S. 643

der Versorgungsleitung zu verhindern wird die Belüftung vor der Sprengung abgeschaltet und die Plastikhaut fällt in sich zusammen.⁵³

2.7 Schutterung

Die Aufnahme und der Abtransport des ausgebrochenen Materials soll im Sinne eines wirtschaftlichen Bauablaufes möglichst schnell erfolgen. Dieser Vorgang wird Schutterung genannt. Beim Bagger- und Sprengvortrieb nehmen Radlader das Material auf und übergeben dies im Regelfall an Muldenkipper. Bei kürzeren aufzufahrenden Tunneln wird das Ausbruchsmaterial mit den Kippern aus dem Tunnel zur Deponie gebracht. Im Falle längerer Tunnel passiert die Verfuhr zumeist über Förderbänder. Um dies möglich zu machen, muss das Material oftmals zuerst gebrochen werden. In diesem Fall wird das Material in einen, im hinteren Vortriebsbereich situierten, Brecher geschuttert, dieser verkleinert das Gut und übergibt es im Anschluss direkt an das Förderband.⁵⁴

2.8 Relevante Normen und Richtlinien

Um die Planung und Ausführung von Tunnelvortrieben zu vereinheitlichen/regulieren gibt es viele Regelwerke. Einige dieser gelten in Österreich, andere haben europaweite Gültigkeit. Die Normen und Richtlinien werden in gewissen Intervallen überarbeitet. Durch diese Vorgehensweise kann unter anderem sichergestellt werden, dass die stetige Weiterentwicklung der Bauverfahren bzw. Materialien nicht durch normative Hindernisse verhindert wird. Im Folgenden werden die wichtigsten Vertreter der zu beachtenden Werke festgehalten:

- CEN
 - ÖNORM EN 1997-1: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln
 - ÖNORM EN 14487: Spritzbeton - Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität
 - ÖNORM EN 14488: Prüfung von Spritzbeton - Teil 1: Probenahme von Frisch- und Festbeton
- ASI
 - ÖNORM B 2203-1: Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm - Teil 1: Zyklischer Vortrieb
 - ÖNORM B 2203-2: Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm - Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb
 - ÖNORM B 4710-1: Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1)
- ÖBV
 - Richtlinie Faserbeton
 - Richtlinie Spritzbeton
 - Richtlinie Tunnelabdichtung

⁵³Vgl. [20] Girmscheid, S. 644 ff.

⁵⁴Vgl. [21] Goger, S. 250 ff.

- Richtlinie Tunnelentwässerung
- FSV
 - RVS 09.01.22: Tunnelquerschnitte
 - RVS 08.50.01: Bohrungen UT
 - RVS 08.42.01: Ausbruchsarbeiten UT
 - RVS 08.43.01: Stützmaßnahmen UT
 - RVS 09.01.43: Brandschutz auf Untertagebaustellen
- ÖGG
 - Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauwerken

Kapitel 3

Das zentraleuropäische Innenschalensystem

Die Herstellung von Tunnelbauwerken ist sehr aufwändig und kostenintensiv. Aus diesem Grund müssen die fertigen Konstrukte eine hohe Lebensdauer aufweisen. Es ergeben sich somit hohe Ansprüche an die Dauerhaftigkeit der einzelnen Bestandteile und des Gesamtkomplexes.

International kommen verschiedenste Innenschalensysteme zum Einsatz. Im Zuge dieser Diplomarbeit werden in diesem und den zwei folgenden Kapiteln einige dieser Varianten beschrieben und im Anschluss verglichen. Zuerst werden die Normenlandschaft und zu beachtende Richtlinien aufgezeigt. In den anschließenden Unterkapiteln werden die Innenschalenkonstruktion und die Abdichtung erklärt. Weiters werden die elektrischen Einrichtungen, die Brandschutzvorkehrungen und die Instandhaltungsmaßnahmen behandelt, bevor es abschließend zu einer ausführlichen Beschreibung des Bauablaufs kommt.

Im gegenständlichen Kapitel wird die in Mitteleuropa zumeist eingesetzte Innenschalenkonstruktion beleuchtet. Diese besteht aus einer Ortbetonschale und einer Abdichtungsschicht, die zwischen der Außen- und Innenschale verbaut wird. Der Einbau erfolgt im Regelfall nach Abschluss der Vortriebsarbeiten. Nur unter großen Zusatzaufwendungen ist ein früherer Einbau der Innenschale möglich – beispielhaft ist ein umfangreicher Umbau der Belüftung und Wasserhaltung unumgänglich.

Das System der Ortbetoninnenschale wird in vielen Ländern Mitteleuropas und auch außerhalb dieser Region eingesetzt. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden allerdings lediglich die in Österreich zu beachtenden Regelwerke sowie Richtlinien berücksichtigt.

3.1 Normative Anforderungen und Richtlinien

Wie schon im Kap. 2.8 beschrieben, wird durch die Einführung von Normen und Richtlinien eine Vereinheitlichung und geregelte Ausführung der Bauwerke sichergestellt. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden in diesem Unterkapitel lediglich die wichtigsten in Österreich zu befolgenden Regelwerke aufgezählt.

Die Normen des Comité Européen de Normalisation (CEN) und die jeweiligen nationalen Anhänge bilden die Grundlage. Weiter werden seitens dem Austrian Standards International Institut (ASI) einzuhaltende Regelwerke veröffentlicht. Zusätzlich zu den europäischen und österreichischen Normen werden seitens der Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV, ehemals Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik bzw. ÖVBB) und der Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV) Richtlinien veröffentlicht. Für den Tunnelbau in Österreich gilt es folgende Dokumente zu beachten:

- CEN
 - ÖNORM EN 206-1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität von Beton
 - ÖNORM EN 13491: Beschreibung der Eigenschaften von geosynthetischen Dichtungsbahnen für den Einsatz in Tunnelbauwerken

- ÖNORM EN 13501: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten
- ÖNORM EN 1992: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken
- ÖNORM EN ISO 15874-1: Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Warm- und Kaltwasserinstallation – Polypropylen (PP)
- ASI
 - ÖNORM B 4710-1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton
 - ÖNORM B 2211: Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonarbeiten – Werksvertragsnorm
 - ÖNORM B 197-1: Zement, Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien
 - ÖNORM B 3800-4: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen
- ÖBV
 - Richtlinie Innenschalenbeton
 - Richtlinie Faserbeton
 - Richtlinie Tunnelentwässerung
 - Richtlinie Tunnelabdichtung
 - Richtlinie Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauten aus Beton
 - Richtlinie Bewertung und Behebung von Fehlstellen in Tunnelinnenschalen
- FSV
 - RVS 08.45.01: Abdichtungen UT
 - RVS 09.01.22: Tunnelquerschnitte
 - RVS 09.01.23: Innenausbau
 - RVS 09.01.43: Innenschalenbeton
 - RVS 09.01.45: Baulicher Brandschutz in Straßentunnel
 - RVS 09.01.52: Brandschutz und Rettung auf Untertagebaustellen
 - RVS 09.02.22: Tunnelausrüstung
 - RVS 09.02.41: Tunnelbeleuchtung
 - RVS 09.04.11: Erhaltung und Betrieb
 - RVS 13.03.31 Straßentunnel – Baulich konstruktive Teile
 - RVS 13.03.41: Straßentunnel – Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen
 - RVS 13.04.22: Straßentunnel in geschlossener Bauweise

3.2 Geotechnische und hydrogeologische Gegebenheiten

Wie schon im vorherigen Unterkapitel werden auch in diesem lediglich die in Österreich vorliegenden Gegebenheiten beleuchtet. Markant ist der Anteil des alpinen Gebirgssystems. Bestehend aus Gesteinen der Europäischen und Afrikanischen Platten, bilden die Ostalpen aufgrund der Plattentektonik einen mehrphasigen Gebirgskomplex. Die Gesteinsserien wurden aufgefaltet und übereinander geschoben. Durch diese Phänomene kam es zur Bildung einer Vielzahl an Störungszonen. Am Beispiel der sogenannten Tauernfenster lassen sich die Gebirgsbildungsphasen gut erkennen – durch Erosionerscheinungen kam es zur Freilegung tiefliegender Schichten und zur Bildung einiger Becken. Um die Alpen liegt die von Sedimentkörpern geprägte Molassezone. Weiter findet man im Norden des Alpenlandes die sogenannte böhmische Masse. In dieser spiegelt sich eine Kombination aus sehr harten Granit- und Gneiskörpern wieder.⁵⁵

Zusammenfassend findet man eine große Bandbreite an Gesteinen und Gebirgskörpern mit unterschiedlichster Festigkeit vor. Um den technischen und wirtschaftlichen Erfolg der Tunnelbauprojekte garantieren zu können, müssen die komplexen Zusammenhänge bzw. Interaktionen zwischen den Bauwerk und dem umgebenden Gebirge verstanden und in weiterer Folge bestmöglich genutzt werden. Aufgrund der vielfältigen Anforderungen hat sich das, in diesem Kapitel beschriebene, massive Innenschalensystem entwickelt.

3.3 Innenschalenkonstruktion

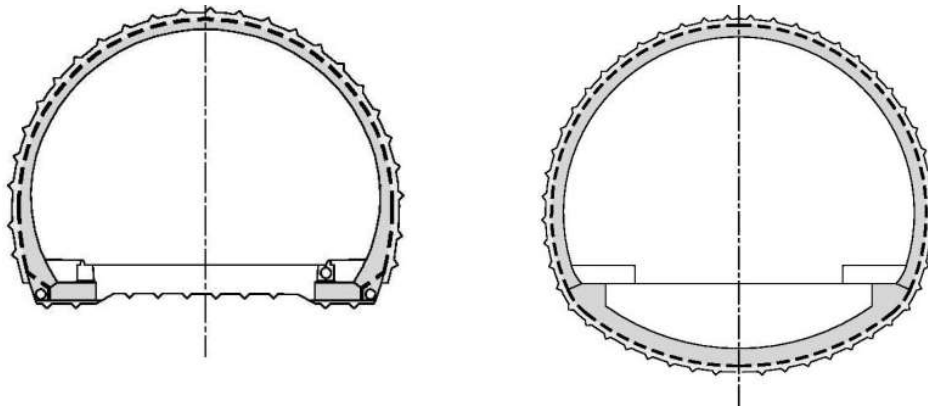


Abb. 3.1: Hufeisenprofil für standfesten (links) und Profil mit Sohlgewölbe für gebrächen Baugrund (rechts) (Quelle: *Richtlinie Tunnelabdichtung* [29], S. 17)

Die im Kap. 2.5 beschriebene Außenschale aus Spritzbeton übernimmt die vorübergehende Sicherung des Ausbruchsquerschnitts. Im Regelfall werden im Nachgang an die Vortriebsarbeiten eine zusätzliche Spritzbetonhaut, der sogenannte Abdichtungsträger sowie eine Abdichtung und ein zusätzlicher Ortbetonnenausbau eingebracht. Diese Bauteile sollen die Dauerhaftigkeit des Gesamtbauwerkes sicherstellen.

Gemäß der RVS 09.01.23 [14] ist die Innenschale in Ortbetonbauweise auszuführen. Lediglich bei Querschlägen, Verbindungen ins Freie und in Sonderfällen darf eine Spritzbetoninnenschale verbaut werden.⁵⁶

⁵⁵Vgl. [44] Töllmann, S. 1 ff.

⁵⁶Vgl. [14] FSV, S. 6

In der nachfolgenden Aufgliederung werden zunächst die unterschiedlichen Querschnittsprofile vorgestellt, bevor auf die verschiedenen Konstruktionsvarianten dieser Profile eingegangen wird. Im Anschluss werden die Aufbauten der einzelnen Querschnittsteile genauer vorgestellt.

Profiltypen

Grundsätzlich werden zwei Typen an Profilen unterschieden – diese sind in Abb. 3.1 dargestellt. In Bereichen mit geringer statischer Beanspruchung bzw. bei guten geologischen Verhältnissen ist oftmals ein sogenanntes Hufeisenprofil ausreichend. Um die Standsicherheit bei größeren Belastungen bzw. in geologisch schlechteren Zonen gewährleisten zu können, muss ein sogenanntes Sohlgewölbe verbaut werden. Im Zuge der Vortriebsarbeiten erhält man durch den Einbau der Ausrundung die statisch günstige Form eines Ringes. Die strichlierten Linien in Abb. 3.1 stellen die Abdichtungsbahnen dar. Durch die Ausbildung des Gewölbes wird eine Weiterführung der Abdichtung in die Sohle ermöglicht – es ergibt sich ein geschlossener Dichtring. Allerdings wird dadurch eine Vergrößerung des Ausbruchsquerschnitts unumgänglich. Weiter ist dieser Mehrausbruch wieder mit Beton zu verfüllen. Um wirtschaftlich zu arbeiten, sind Profiländerungen in wechselnden geologischen Verhältnissen erforderlich. Um die Dauerhaftigkeit sicherstellen zu können, ist vor allem den Übergangsbereichen im Zuge der Profilwechsel besondere Aufmerksamkeit zu schenken.⁵⁷

Ausführungsvarianten

Die Ortbetonschale wird nach statischer Erfordernis dimensioniert und kann bewehrt oder auch unbewehrt ausgeführt werden. Zusätzlich wird in Systeme mit oder ohne einer Abdichtung unterteilt. In Abhängigkeit der vorherrschenden Grundwasserverhältnisse sind verschiedene Abdichtungssysteme einzusetzen.⁵⁸ Diese werden in Kap. 3.4 beschrieben. Alternativ zum Einsatz einer Abdichtung kann eine wasserundurchlässige Innenschale zur Ausführung kommen.⁵⁹

Bei Systemen mit Abdichtung kann in ein- und zweischalige Konstruktionen unterteilt werden. Die einschalige Variante kommt nur in Sonderfällen zur Anwendung. Dabei wird auf die SpC-Außenschale eine weitere Lage Stahlfaserspritzbeton mit abdichtender Funktion aufgebracht. Bei der zweischaligen Konstruktion wird bewusst auf den Verbund zwischen Innen- und Außenschale verzichtet. Durch die Einlage von Trennlagen wird die Verzahnung der beiden Bauteile minimiert.⁶⁰

Aufbau im Gewölbebereich

Das Gewölbe beinhaltet den Ulmen-, Kämpfer- und Firstbereich. In Abb. 3.2 sind die Bestandteile dieses Bereiches in einem Schnitt dargestellt. Im Folgenden ist der Aufbau beschrieben, wobei bergseitig begonnen wird.

Die Kombination aus der Außenschale und den Stützmitteln (siehe Kap. 2.5) stellt die direkte Verbindung zum anstehenden Baugrund dar. Innerhalb liegt der sogenannte Abdichtungsträger. Er besteht aus einer wenige Zentimeter dicken Spritzbetonschicht und stellt den Schutzpolster für die später eingebrachten Folien, Fließe, Dichtungsbahnen etc. dar. Durch den Abdichtungsträger werden aus der Außenschale ragende Bauteile wie z.B. Ankerköpfe abgedeckt. Somit wird eine Beschädigung der angrenzenden geotextilen Schutzschicht und Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) vermieden. Diese beiden Baustoffe dienen der in Kap. 3.4 beschriebenen Abdichtung und Entwässerung. Das abschließende Bauteil stellt der Gewölbebeton, also die eigentlich sichtbare In-

⁵⁷ Vgl. [29] ÖBV, S. 6 f.

⁵⁸ Vgl. [1] Adam, S. 103

⁵⁹ Vgl. [28] ÖBV, S. 2

⁶⁰ Vgl. [21] Goger, S. 289 f.

nenschale, dar. Deren Mindestdicke ist in Abhängigkeit der maßgebenden Belastungskombination festzulegen und kann über 50 cm betragen.⁶¹

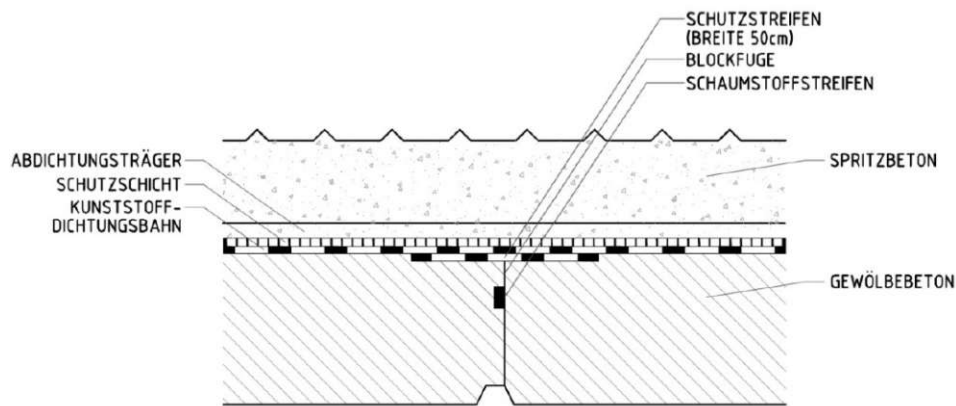


Abb. 3.2: Schnittdetail des Blockfugenbereichs im Gewölbe druckwasserentlasteter Tunnel (Quelle: *Richtlinie Tunnelabdichtung* [29], S. 19)

In Abb. 3.3 wird der Übergangsbereich zwischen zwei Gewölbeblöcken detailliert dargestellt. Die zwei massiven Betonbauteile der Innenschale werden zeitlich getrennt hergestellt. Aus diesem Grund wird einerseits ein Schutzstreifen, andererseits ein Schaumstoffstreifen, erforderlich. Ersterer besteht aus dem gleichen Material wie die KDB und schützt diese vor lokalen Überbelastungen durch die Stirnschalung des Schalwagens. Der Schaumstoffstreifen verhindert das Auslaufen von Material im Zuge der Firstspaltverpressung (Vgl. Kap. 3.8). Letztere ist durchzuführen, weil es im Zuge der Betonierarbeiten zur Hohlrumbildung zwischen der KDB und der Ortbetonschale kommen kann.⁶²

Bodenaufbau

In Straßentunneln ist der Einsatz von offenporigem Asphalt gemäß RVS 08.16.01 [13] nicht erlaubt. Im Regelfall ist eine Betondecke auszuführen, welche in Abhängigkeit der Bemessungsnormwechsel zu dimensionieren ist. Der RVS 09.01.23 [14] kann die zu benutzende Bemessungstabelle eingesehen werden. Die Betondecke ist auf einem entwässerten und ausreichend tragfähigem Untergrund herzustellen. Im Falle einer offenen Sohle muss diese zumindest eine Stärke von 30 cm aufweisen. Im Falle eines vorhandenen Sohlgewölbes oder einer Sohlplatte darf dieses Maß auf 20 cm verringert werden.⁶³

Zwischendecke

Soll eine Zwischendecke verbaut werden, ist im Zuge der Gewölbeherstellung eine Konsole für die spätere Auflage mitzubetonieren. Letztere wird mithilfe von Elastomerlagern aufgelagert. Dadurch entstehen Räumlichkeiten, die zur Be- und Entlüftung genutzt werden können. Um dies zu ermöglichen, sind Leckagen zu vermeiden – wobei den Fugen besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist. Alle Fugen müssen mit dauerelastischen Abdichtungsbändern abgedeckt werden. Diese Bänder dienen demnach lediglich dem Verhindern von Verlusten – sie haben demnach keine weiteren Anforderungen im Bezug auf Brandschutz oder etwaige Überbelastungen zu erfüllen.⁶⁴

⁶¹ Vgl. [29] ÖBV, S. 9 ff.

⁶² Vgl. [29] ÖBV, S. 93

⁶³ Vgl. [14] FSV, S. 3 ff.

⁶⁴ Vgl. [14] FSV, S. 6 ff.



- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| 1. Schaumstoffstreifen | 3. Vorläuferblock Innenschale |
| 2. KDB | 4. Schutzstreifen |

Abb. 3.3: Detailbereich einer Blockfuge in einem österreichischen Tunnel (Quelle: Eigene Aufnahme)

3.4 Beherrschung von Berg-, Grund-, Sicker- und Fahrbahnwässern

Die Wasserhaltung im Fahrbereich und die Beherrschung von Grund-, Sicker- und Bergwässern stellen sowohl im Bauzustand als auch beim späteren Betrieb komplexe Aufgaben dar. Zunächst wird die Abdichtung beschrieben, danach die Bauteile und Prinzipien der Entwässerungssysteme und abschließend die Fassung der Fahrbahnwässer.

3.4.1 Abdichtung

Grundsätzlich unterscheidet man druckwasserhaltende und drainierte Systeme. Erstere kommen zum Einsatz, wenn der in situ Wasserhaushalt nicht gestört werden soll oder die Ableitung der zuströmenden Wässer nicht wirtschaftlich ist. Alternativ kommt die sogenannte Regenschirmabdichtung, die im alpinen Raum zumeist verbaute Variante, zum Einsatz. Die Fassung und kontrollierte Ableitung der an der Außenschale anstehenden Wässer wird dabei verfolgt.⁶⁵

Im Folgenden werden diese beiden wesentlichen Varianten der Tunnelabdichtung beschrieben.

Druckwasserhaltende Ausführung

Wie in Abb. 3.4 dargestellt, kann entweder mit wasserundurchlässigem Beton, Rundumabdichtungen oder einer Kombination aus beidem gearbeitet werden. Bei Wasserdrücken über 3 bar

⁶⁵Vgl. [1] Adam, S. 104 ff.

empfeht sich eine Folieneinlage und eine bewehrte Innenschale. Der Einsatz von Stahlfaserbewehrung ohne herkömmlichen Stabstahl ist bei geringen Wasserdrücken möglich - bei höheren hydrostatischen Belastungen können Stahlfasern lediglich als Zusatz zum Stabstahl/zur Mattenbewehrung eingesetzt werden. Weiter ist die sorgfältige Fugenabdichtung beim Einsatz von wasserundurchlässigem Beton essentiell. Der richtige Einbau von Fugenbändern oder Stahlblechen ist zu kontrollieren.⁶⁶

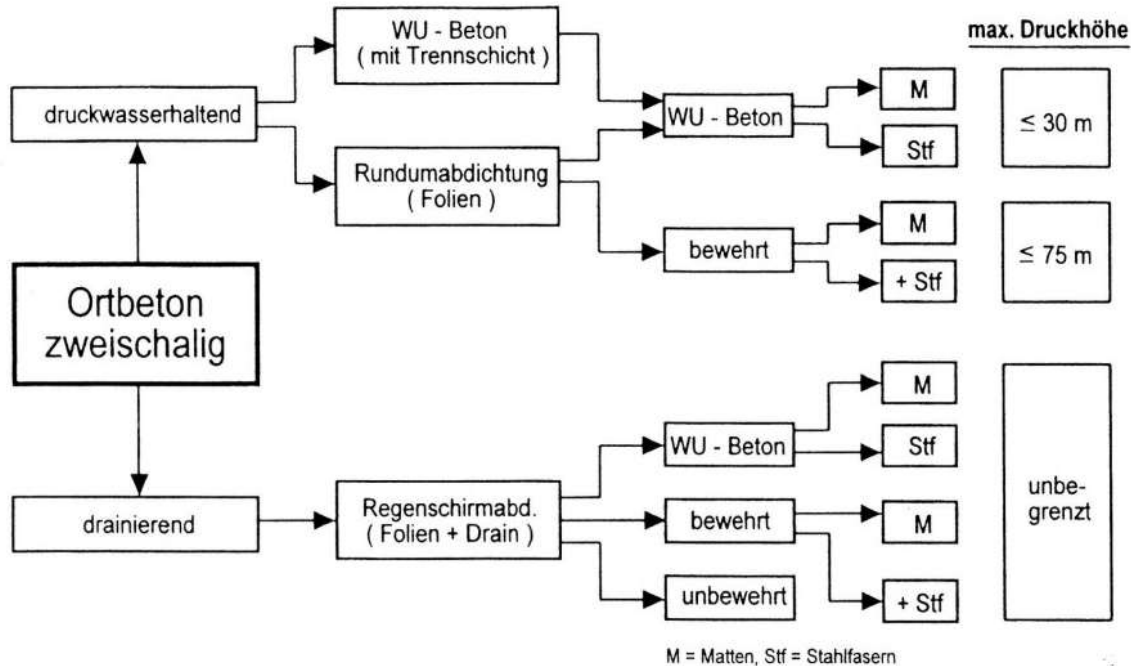


Abb. 3.4: Unterschiedliche Ausführungsvarianten einer zweischaligen Konstruktion aus Spritzbetonaußen- und Ortbetoninnenschale (Quelle: Goger [21], S. 290)

Die Ortbetoninnenschale ist auf den resultierenden Wasserdruck zu bemessen. Bei hohen Wasserdrücken werden die wirkenden Kräfte zu groß - daher ist die druckwasserhaltende Ausführungsvariante nur bei Bauwerken mit geringer Überlagerung bzw. kleinen Wasserdrücken wirtschaftlich ausführbar. Beim Bau von tiefliegenden Tunneln kommen im Regelfall, die im Folgenden beschrieben, drucklose Abdichtungen zur Anwendung.⁶⁷

Regenschirmprinzip

Beim Regenschirmprinzip wird die Abdichtung im Gegensatz zur Rundumabdichtung nicht in die Sohle weitergeführt, sondern endet am unteren Ende des Gewölbes bei der Ulmendrainage. Dies ist in Abb. 3.7 dargestellt. Um einen Druckaufbau zu vermeiden, werden zusickernde Wässer abgeleitet. Andernfalls würde die Belastung auf die Innenschale stark anwachsen und zu etwaigen Schäden führen.⁶⁸

Die Abdichtung wird durch das Verlegen der KDB erreicht. Zusätzlich wird dadurch die Verzahnung zwischen Innen- und Außenschale minimiert. Gemäß der *Richtlinie Tunnelabdichtung* [29] muss sie eine Dicke von mindestens 2 mm und eine gewisse Robustheit gegenüber Zugbeanspruchungen, Quetschungen und Faltenbildung aufweisen. Zur Signalisierung von Schadstellen muss

⁶⁶Vgl. [21] Goger, S. 284 ff.

⁶⁷Vgl. [1] Adam, S. 106

⁶⁸Vgl. [1] Adam, S. 104

die KDB an der dem Hohlraum zugewandten Seite über eine helle Signalschicht verfügen. Eine einfache Detektion etwaiger Fehlstellen wird somit durch den optischen Kontrast gegenüber den tiefliegenden Schichten ermöglicht.⁶⁹

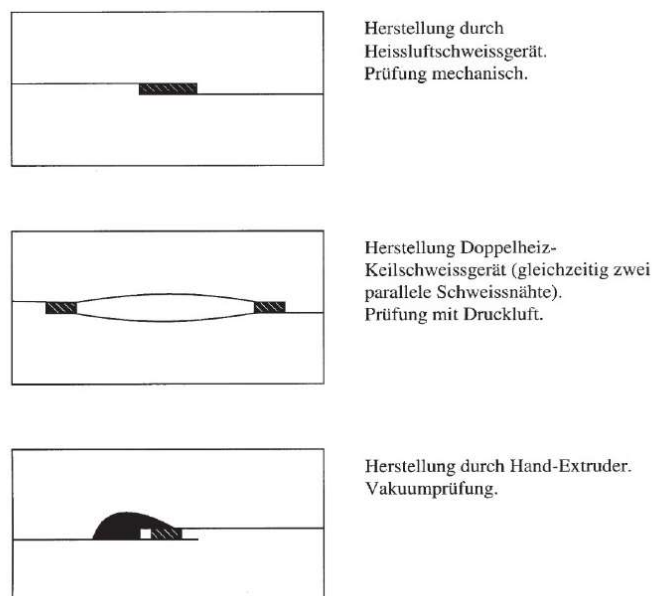


Abb. 3.5: Verschiedene Schweißverbindungen und die jeweils durchzuführenden Dichtheitsprüfverfahren (Quelle: Girmscheid [20], S. 394)

Um die Dichtheit der Konstruktion garantieren zu können, ist eine adäquate Verbindung der einzelnen Bahnen erforderlich. Die zuerst lose verlegten Bahnen werden mit Doppelnähten miteinander verschweißt und deren Unversehrtheit ist im Zuge von Prüfungen nachzuweisen. In Abb. 3.5 sind einige Ausführungen von Schweißnähten und deren jeweilige Kontrollverfahren ersichtlich. Die Unversehrtheit von Doppelschweißnähten ist somit durch die Ausführung von Druckluftprüfungen zu testen. Um die langjährige Nutzungsdauer sicherstellen zu können, sind diese mit höchster Sorgfalt durchzuführen.⁷⁰

Aufgrund der Barrierewirkung der Abdichtung und der geforderten Verhinderung des Druckaufbaus muss bergseitig eine Entwässerungsschicht, die wiederum Teil eines komplexen Entwässerungssystems ist, verbaut werden. Letzteres wird im anschließenden Unterkapitel beschrieben.

3.4.2 Entwässerung

In druckentlasteten Querschnitten sind Entwässerungssysteme einzusetzen. Diese setzen sich aus einem primären und sekundären Teil zusammen. Ersterer beinhaltet laut der Definition in der *Richtlinie Tunnelentwässerung* [38] alle jene Elemente, die im Betriebszustand nicht mehr zugänglich bzw. erreichbar sind. All jene Rohre und Schächte, die für die Instandhaltung zugänglich sind, bilden das sekundäre Entwässerungssystem.⁷¹

Primäres System

Das Bergwasser tritt über kleine Risse bzw. Löcher im Spritzbeton oder durch bewusst angeordnete Entwässerungsbohrungen in den Tunnel ein und fließt dem geotextilen Schutzvlies bis zur

⁶⁹Vgl. [29] ÖBV, S. 11

⁷⁰Vgl. [20] Girmscheid, S. 392 ff.

⁷¹Vgl. [38] ÖVBB, S. 3

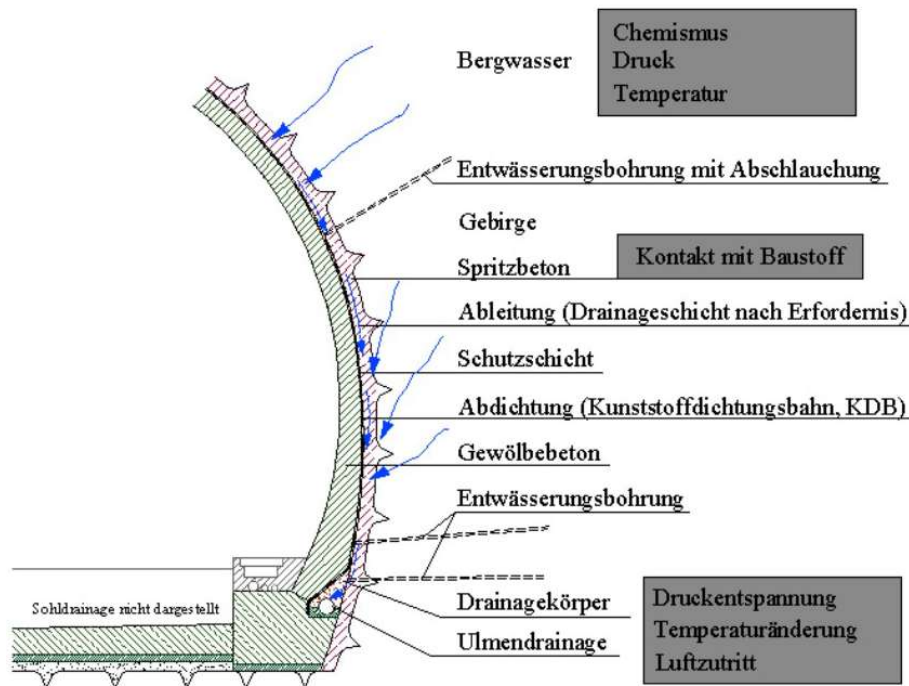


Abb. 3.6: Der Weg der zutretenden Wässer in die Ulmendrainage (Quelle: *Richtlinie Tunnelentwässerung* [38] S.5)

Ulmendrainage entlang (Siehe Abb. 3.6). Dieses wird zwischen dem Abdichtungsträger und der KDB eingebaut und gleicht die verbliebenen Ungleichmäßigkeiten aus, vermindert die bergseitig entstehenden Belastungen auf die Abdichtung und verfügt weiter über eine gewisse hydraulische Leistungsfähigkeit. Sie muss gewisse Anforderungen gemäß der *Richtlinie Tunnelabdichtung* [29] erfüllen und in der Kalotte ein Mindestflächengewicht von 500 g/m^2 aufweisen. Geringe Mengen an Wasser können abeleitet werden, ohne dass es zu einem Druckanstieg kommt. Im Falle größerer lokaler Wasserzutritte sind Abschlauchungen zu bevorzugen – bei flächigen Zutritten können Drainageschichten aus Noppenbahnen verbaut werden.⁷²

Durch den Kontakt der Bergwässer mit der Außenschale und durch die Druckentlastung kommt es zu einer Störung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts und daraus folgend oftmals zu Versinterungen. Der Chemismus, die Wassertemperatur und deren Änderung haben ebenfalls großen Einfluss auf diese Vorgänge. In Abb. 3.6 sind diese Einflussfaktoren in den grauen Kästchen dargestellt. Um den chemischen Betonangriff und Ablagerungen zu verhindern, sind Versinterungen bestmöglich einzudämmen. Folglich sind zum einen schon in frühen Planungsphasen und auch während der Ausführung Wasserproben zu entnehmen. Diese werden in weiterer Folge von Fachpersonal untersucht und auf Grundlage der Ergebnisse können geeignete Gegenmaßnahmen, wie z.B. der Einbau von Härtestabilisatoren, getroffen werden.⁷³

Das Bergwasser tritt am Ende des Geotextils in die Sickerpackung ein. Diese besteht im Regelfall aus Einkornbeton – Gesteinskörnern mit einheitlicher Größe wird eine geringe Menge an Zement und Wasser beigemischt. Es entsteht eine gebundene tragfähige Schicht mit drainagierender Wirkung. An der tiefsten Stelle der Sickerpackung fließt das Wasser durch die Einlaufschlitze der ebendort situierten Teilsickerrohre. Diese Rohre, zumeist aus Polypropylen, werden von der aus Beton bestehenden Teilummantelung umgeben. Somit wird eine Unterströmung der Ul-

⁷²Vgl. [29] ÖBV, S. 10 f.

⁷³Vgl. [38] ÖVBB, S. 7 ff.

mendrainagerohre verhindert. Betrachtet man den Fluss des Wassers, kann man diesen Zeitpunkt des Abflusses in die Drainagerohre als Austritt aus dem primären und Eintritt in das sekundäre System bezeichnen. In Abb. 3.7 kann dieser Bereich eingesehen werden.⁷⁴

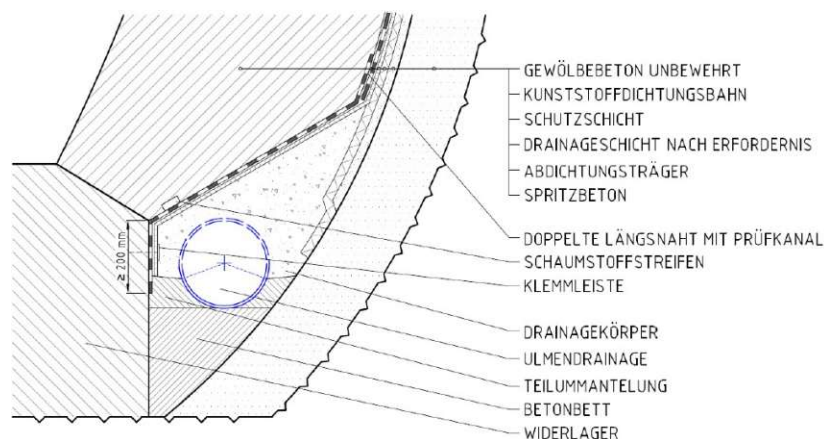


Abb. 3.7: Bereich der Ulmendrainage eines druckwasserentlasteten Gewölbes mit KDB und offener Sohle (Quelle: *Richtlinie Tunnelabdichtung* [29] S.21)

Sekundäres System

Ulmendrainage, Rohrleitungen für Sohl- und Tragschichtdrainage, Quersammler, Bergwassersammelleitung und die erforderlichen Schächte bilden das sekundäre Entwässerungssystem. Der wichtigste Planungsgrundsatz muss eine möglichst klare und einfache Konzeption sein. Durch etwaige Versinterungen, Schäden, oder unnötige Verwirbelungen wird der Fluss gestört, wodurch wiederum neue Ablagerungen entstehen. Eine zügige Strömung in gut gefüllten Rohren ist anzustreben. Um die Versinterungsneigung, die in der Ulmendrainage am Größten ist, einzudämmen, ist die Ableitung der Wässer in der Ulmendrainage zu bevorzugen. Erst bei großen Wassermengen soll ein Abfluss über Quersammler in die Bergwassersammelleitung passieren. Dies wird durch die Anordnung von Überläufen in den Schachtbereichen erreicht. Liegt der Wasserstand unterhalb dieser Überläufe, verbleibt sämtliches Wasser in der Ulmendrainage.⁷⁵

3.4.3 Fahrbahnwässer

Gemäß der *RVS 09.01.23 Innenausbau* [14] hat die Ableitung der Berg- und Fahrbahnwässer in Straßentunneln getrennt zu erfolgen. Die Fassung kann kontinuierlich über Schlitzrinnen oder punktuell über Einzeleinläufe passieren. Da eine deckellose Fahrbahn angestrebt wird, ist die kontinuierliche Fassung zu favorisieren. Das System ist auf eine Abflusskapazität von 100 l/s auszulegen, wobei diese innerhalb von 200 m Tunnellänge aufgenommen werden müssen. Durch diese Forderung werden sowohl Mindestabmessungen für die Schlitzrinnen als auch für den Durchmesser der folgenden Rohrleitungen definiert. Im Falle geringerer Zutritte kann es aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit somit zu Ablagerungen kommen. Um diese später beheben zu können sind in Abständen von maximal 100 m Putz- und Spülschächte zu verbauen.⁷⁶

Die Fahrbahnwässer werden obertage einer Gewässerschutzanlage zugeführt. Für Notfälle (z.B. Tankwagenunfall) müssen diese gem. *RVS 09.04.11 Erhaltung und Betrieb* [18] über eine

⁷⁴Vgl. [1] Adam, S. 106

⁷⁵Vgl. [38] ÖVBB, S. 18 f.

⁷⁶Vgl. [14] FSV, S. 11 f.

Auffangreserve von mindestens 50 m³ verfügen. Weiter ist im Zuge von Tunnelwäschen besondere Achtsamkeit geboten. Nach Abschluss der Reinigungsarbeiten im Tunnel ist das Becken ehest zu entleeren.⁷⁷

Die eben beschriebenen Mindestabmessungen sind in den Richtlinien festgelegt. Allerdings können in den projektspezifischen wasserrechtlichen Bescheiden stets höhere Anforderungen gestellt werden.

3.5 Elektrische Einrichtungen und Einbauten

In vielen Straßentunneln werden Zwischendecken verbaut – deren Einsatz bringt einige Vorteile mit sich. Belüftungssysteme sowie diverse Brandschutzmaßnahmen können darin installiert werden. In der Betondecke werden Ausnehmungen, welche wiederum mit Belüftungsgittern versehen sind, verbaut. Durch diese kann die Frischluft in den Fahrraum eintreten. Analog wird die Absaugung verschmutzter Luft ermöglicht. Um beide Vorgänge unabhängig voneinander durchführen zu können, werden in den Bereichen über Zwischendecke zumeist Trennwände installiert – es entsteht somit ein Frisch- und Abluftbereich. Oberhalb der Betonfertigteildecke ergibt sich zusätzlicher Raum für technische und elektrische Installationen und im Falle etwaiger erforderlicher Wartungsarbeiten können diese, ohne eine Behinderung des laufenden Betriebs, durchgeführt werden. Alternativ kann die Leitungsführung auch in den Randwegen von Statten gehen.⁷⁸

3.6 Brandschutz

In Tunnelbauwerken ist Brandereignissen aufgrund der oftmals hohen Brandlasten besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Aus diesem Grund wurde seitens der Österreichischen Bautechnik Vereinigung die *Richtlinie Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton* [26] veröffentlicht.

In diesem Kapitel wird zunächst ein wichtiger Eingangswert für die Tragwerksbemessung im Brandfall beschreiben. In weiterer Folge werden einige wichtige Vertreter der, während dem Bau- und Betriebszeitraum, einzuhaltenden Brandschutzmaßnahmen angeführt, bevor abschließend die, die Fluchtmöglichkeiten betreffenden, Erfordernisse behandelt werden.

Beim Brand etwaiger gefährlicher Güter oder Treibstoffe sind Temperaturbelastungen zu erwarten, die übliche Einheitstemperaturkurve (ETK) übersteigen. Die ETK stellt bei der Tragwerksbemessung im Brandfall (Heißbemessung) eine wichtige Grundlage dar. Aufgrund der schnellen Temperaturanstiege (z.B. im Falle eines Benzinbrands) bei Bränden in Tunneln kann die ETK nicht verwendet werden. Es müssen die, in der *RVS 09.01.45 Baulicher Brandschutz in Straßentunnel* [17] angeführten, Temperatur-Zeit Kurven als Eingangswerte für die Heißbemessung herangezogen werden.⁷⁹

Diese hohen Temperaturbelastungen stellen bereits im Zuge des Tunnelbaus eine große Gefahr dar. Eine wichtige Maßnahme zur Verhinderung eben dieser stellt das Verbot von benzinbetriebenen Arbeitsmaschinen dar. Weiter ist bei allen Bauprozessen auf die Minimierung etwaiger Brandlasten zu achten. Beispielhaft werden die Abdichtungsarbeiten genannt. Im Zuge dieser darf gemäß der *Richtlinie Tunnelabdichtung* [29] untertage lediglich eine Kleinmenge im Tunnel für den unmittelbaren Einbau gelagert werden. Fluchtwege sind stets freizuhalten und die Abdichtungsverlegung darf nur einen gewissen Vorlauf gegenüber der nachfolgenden Gewölbebetonage aufweisen.

⁷⁷Vgl. [18] FSV, S. 4

⁷⁸Vgl. [28] ÖBV, S. 74

⁷⁹Vgl. [26] ÖBV, S. 6

In Ausnahmefällen können diese Forderungen durch den Einbau von Brandschneisen umgangen werden. Jedenfalls ist der Unternehmer verpflichtet, die Sicherheit der Untertagebelegschaft in jeder Situation gewährleisten zu können.⁸⁰

Im Falle einer Brandeinwirkung kommt es zur Änderung der Temperaturen im Gewölbebeton. Folglich entstehen sogenannte Temperaturspannungen. Das Ausmaß ebendieser wird von der Stärke der Einwirkung, der Restfeuchte im Inneren des Bauteils und der Betondruckfestigkeit bestimmt. Es kommt zu Entwässerungs- und Verdampfungsprozessen und zum Aufbau von Dampfdrücken. Steigen die Temperaturspannungen zu stark an, kommt es zu explosionsartigen Abplatzungen des Betons. In weiterer Folge werden tiefliegendere Betonschichten freigelegt und der Kreislauf beginnt von Vorne. Dies führt zur problematischen Abnahme der Betondeckung bzw. etwaigen Freilegung des Bewehrungsstahls. Zur Minimierung der Abplatzungen wird in der *Richtlinie Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton* [26] im Falle der Erfordernis der erhöhten Brandbeständigkeit der Einsatz von Polypropylenfasern vorgeschrieben. Diese sind wenige Millimeter lang, weisen einen Durchmesser von kleiner 20 Mikrometer auf und werden im Zuge der Betonherstellung beigemischt. Im Brandfall verkleben die Fasern miteinander, es kommt zur Klumpenbildung und somit erhöht sich der Zusammenhalt der Gesamtmatrix.⁸¹

Analog zum Betongewölbe müssen auch die restlichen Bauteile gewisse Brandschutzanforderungen erfüllen. Zum Beispiel ist für die Zwischendecke die Brandwiderstandsklasse R 90 festgelegt. Weiter ist ein Durchschlagen der Flammen im Entwässerungssystem durch den Einbau von Trennbauteilen oder Siphonen zu verhindern.⁸²

In der *EN 13501* [9] sind die Anforderungen an das Brandverhalten der Fahrbahn festgelegt. Beispielhaft wird hierbei die Mindestanforderung der Deckschichte mit Klasse A2_f deklariert.⁸³

All die beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Brandbeständigkeit und zur Verhinderung der Brandausbreitung dienen in erster Linie dem Personenschutz. Unter anderem wird das Ziel der Verlängerung des Zeitraums, in dem eine Flucht möglich ist, angepriesen. Letztere kann durch Querschläge, die in gewissen Abständen zu verbauen sind, von Statten gehen. Durch diese Stollenbauwerke wird die zweite Röhre erreicht. Alternativ wird in manchen Bauwerken ein Fluchtkorridor errichtet – der durch eine Zwischenwand, welche unter anderem auf den Anprall eines Fahrzeuges zu bemessen ist, vom Fahrbereich getrennt wird. Je nach Ausführungsvariante kann sich für Zwischenwände ein erhöhter Anspruch an die Brandbeständigkeit (BBG) ergeben.⁸⁴

3.7 Dauerhaftigkeit und Instandhaltung

Die Zeit von Planungsbeginn bis Inbetriebnahme von Tunnelbauwerken übertrifft all jene von Hochbauten etc. im Regelfall um ein Vielfaches. Es handelt sich um komplexe und sehr kostenintensive Bauwerke. Weiter ist die Sanierung von Fehlstellen bzw. die Erneuerung von einzelnen Bestandteilen des Gesamtbauwerks zumeist mit großem Aufwand verbunden. Im Bezug auf Sanierungen ist man aufgrund des einzuhaltenden Lichtraumprofils ebenfalls limitiert. Aus diesen Gründen wird für Tunnelbauwerke eine lange Nutzungsdauer von z.B. 150 Jahren angesetzt. Eine sorgfältige Planung und Ausführung bilden somit unumgängliche Grundsteine für einen erfolgreichen langjährigen Betrieb. Um die Dauerhaftigkeit des Gesamtprojekts realisieren zu können, müssen alle verbauten Einzelbestandteile eine dementsprechende Lebensdauer aufweisen oder einfach ersetzbar sein (z.B. elektrische Einrichtungen). Dieses Unterkapitel ist den normativen

⁸⁰Vgl. [20] Girmscheid, S. 396

⁸¹Vgl. [28] ÖBV, S. 23

⁸²Vgl. [14] FSV, S. 10 ff.

⁸³Vgl. [15] FSV, S. 2

⁸⁴Vgl. [28] ÖBV, S. 74

Vorgaben sowie den zu treffenden Maßnahmen im Bezug auf die Dauerhaftigkeit, Erhaltung und Erneuerung gewidmet.

Straßentunnel sind gemäß der RVS 09.01.23 [14] mit einem hellen und reflektierenden Anstrich zu versehen. Dieser ist bei einem Gewölbequerschnitt bis mindestens 4 m über die Oberkante des Seitenstreifens zu ziehen. Bei Querschnitten mit Zwischendecken ist der Anstrich bis zu deren Unterkante vorzusehen. Der Anstrich schützt vor Korrosion – die dünne Schicht erschwert den Eintrag von Sauerstoff und Salzen (Winterdienst) in das Stahlbetontragwerk. Durch regelmäßigen Anstrich kann somit die Lebensdauer des Tunnels verlängert, eine Verbesserung der Frost-Tausalz-Beständigkeit erreicht und die Notwendigkeit von Sanierungen auf ein Minimum beschränkt werden. Weiter wird durch die helle und reflektierende Farbe die Wirkung der Tunnel- und Fahrzeugbeleuchtung verstärkt – es kommt zu einer Verbesserung der Lesbarkeit der Straßenschilder. Somit hat der Straßentunnelanstrich Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und die Sicherheit erhöhende Zwecke.⁸⁵

Zur Sicherstellung des wirtschaftlichen Betriebs sind regelmäßige Reinigungen durchzuführen. Die Intervalle sind an den Verschmutzungsgrad anzupassen. Neben der Fahrbahnreinigung ist vor allem auf die Sauberkeit des Wandanstrichs zu achten. Verschmutzungen an eben diesem führen zu einem herabgesetzten Sicherheitsgefühl der Benutzer zufolge der geringeren Reflexion und Helligkeit im Bauwerk. Aus selbigem Grund sind etwaige Verschmutzungen an der Tunnelbeleuchtung zu entfernen bzw. schadhafte Einrichtungen zeitnah auszutauschen. Die Unversehrtheit dieser Mittel ist periodisch mit Leuchtdichtekameras zu überprüfen.⁸⁶

Einen weiteren wichtigen Teil der Instandhaltung bildet die Aufrechterhaltung der intakten Wasserhaltungseinrichtungen bei druckwasserentlasteten Querschnitten. Die Abdichtung kann nur unter großem Aufwand erneuert werden. Daher soll diese mindestens über die gesamte Nutzungsdauer des Bauwerks funktionsfähig sein.⁸⁷

Die Instandhaltungsmaßnahmen können lediglich am sekundären Entwässerungssystem durchgeführt werden. Um eine frühzeitige Verschmutzung vorzubeugen, müssen die Wartungsarbeiten schon während der Bauzeit begonnen werden. Gemäß der *Richtlinie Tunnelentwässerung* [38] ist ein sogenanntes Instandhaltungsbuch für die Tunnelentwässerung zu führen. Darin werden einerseits die zu führenden Reinigungsmaßnahmen definiert und deren Durchführung in weiterer Folge dokumentiert. Prinzipiell werden Spülungen mit niedrigen Druckstufen als vorbeugende Maßnahmen durchgeführt. Reichen diese nicht aus kommen korrigierende Verfahren (Hochdruckspülung oder mechanische Reinigung) zur Anwendung. Sollten diese Instandhaltungsmaßnahmen ihre Zwecke nicht erfüllen, müssen Instandsetzungsmaßnahmen eingeleitet werden.⁸⁸

All diese beispielhaften Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Dauerhaftigkeit der komplexen Bauwerke bilden ein solides Grundgerüst. Zusätzlich ist die Zahl der Frühschäden durch die Erfahrungen der letzten Jahrhunderte massiv zurückgegangen. Weiter wurden die Baumaterialien sowie die Methoden der Gebirgsstabilisierung laufend weiterentwickelt. Allerdings lassen sich, wie bei allen Bauwerken, gelegentliche Mängel nicht vermeiden.⁸⁹

In solchen Fällen ist es wichtig das Schadensbild präzise zu untersuchen, um auf dessen Ursache schließen zu können. Folglich können geeignete Maßnahmen zur Behebung der vorhandenen und Verhinderung etwaiger zukünftiger Schäden getroffen werden. Um diesen Prozess zu vereinheitlichen, wurde die *Richtlinie Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen* [36] veröffentlicht. Das Regelwerk sieht zunächst die Durchführung einer Kategorisierung vorhandener

⁸⁵ Vgl. [14] FSV, S. 11

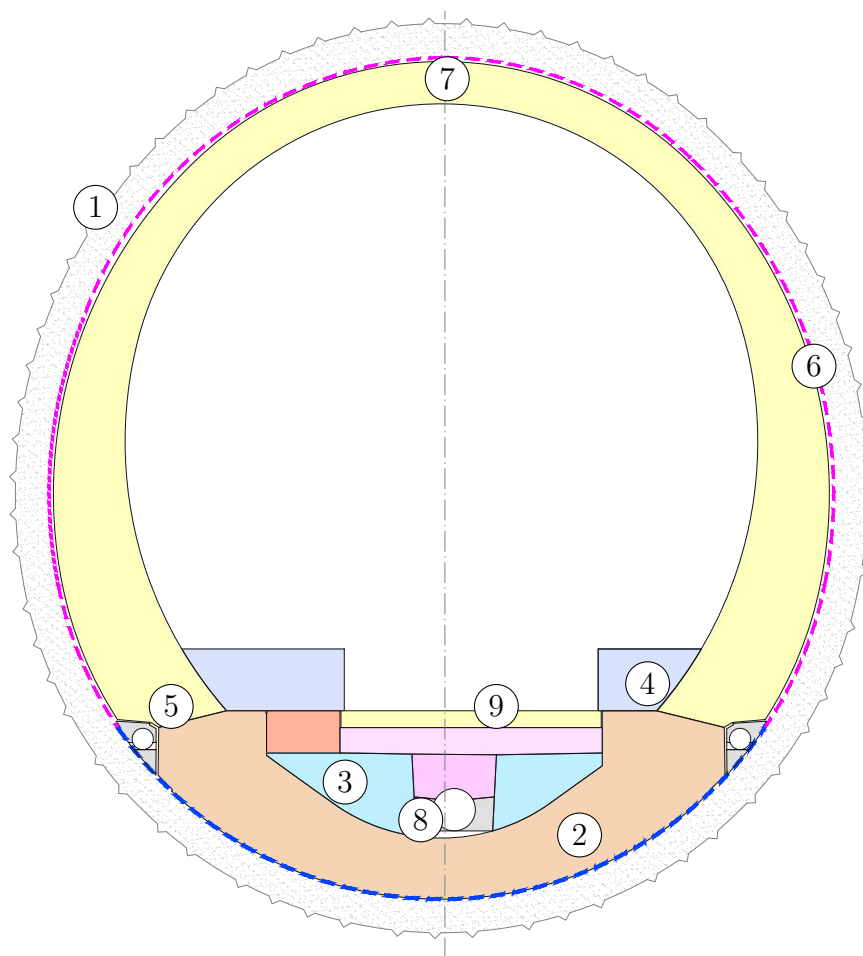
⁸⁶ Vgl. [18] FSV, S. 3 f.

⁸⁷ Vgl. [29] ÖBV, S. 47

⁸⁸ Vgl. [38] ÖVBB, S. 37 f.

⁸⁹ Vgl. [25] Müller, S. 795

Fehlstellen vor – in Abhängigkeit dieser Einstufungen sind in weiterer Folge klar definierte Maßnahmen zu setzen.⁹⁰



- | | | |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1. Außenschale + Abdichtungsträger | 4. Widerlager/Kicker | 7. Innenschalengewölbe |
| 2. Sohlgewölbe | 5. Ulmendrainage | 8. Hauptentwässerung |
| 3. Sohlfüllbeton | 6. Regenschirmabdichtung | 9. Fahrbahn |

Abb. 3.8: Schematische Darstellung der Arbeitsabfolge im Zuge des Innenausbaus (Quelle: Eigene Darstellung)

Weitere Problemstellungen, denen lediglich mit Instandsetzungsmaßnahmen entgegen getreten werden kann, sind undichte Fugen oder Risse. Diese sind nachträglich zu verschließen. Für die Verpressarbeiten können zementbasierte Materialien, Acrylatgele, Silikatharze bzw. Silikatschäume, Polyurethan- oder Epoxidharze eingesetzt werden. Die Fugen/Risse werden schräg

⁹⁰Vgl. [36] ÖVBB, S. 3 ff.

angebohrt, anschließend Packer versetzt und über diese kann im Nachgang das Injektionsgut präzise eingebracht werden.⁹¹

3.8 Bauablauf

In diesem Kapitel werden die zur Herstellung des Innenausbaus erforderlichen Arbeitsschritte, Gerätschaften und Arbeitsmittel ausführlich beschrieben. Beispielhaft wird die Herstellung der Innenschalenvariante mit Sohlgewölbe eines druckwasserentlasteten Querschnitts Schritt für Schritt beschrieben – kommt ein Hufeisenprofil zur Ausführung, ändert sich der Ablauf nur geringfügig. Bei druckwasserhaltenden Querschnitten ergeben sich unter Anderem erhöhte Anforderungen an die Ebenheit des Abdichtungsträgers. Abb. 3.8 sowie die Fotos von einer österreichischen Baustelle sind von einem Eisenbahnquerschnitt, der Bauablauf im Falle eines Straßentunnels ist allerdings ident – es ändert sich lediglich die Form der Widerlager, die als erhöhte Randwege eingesetzt werden (siehe Abb. 3.6).

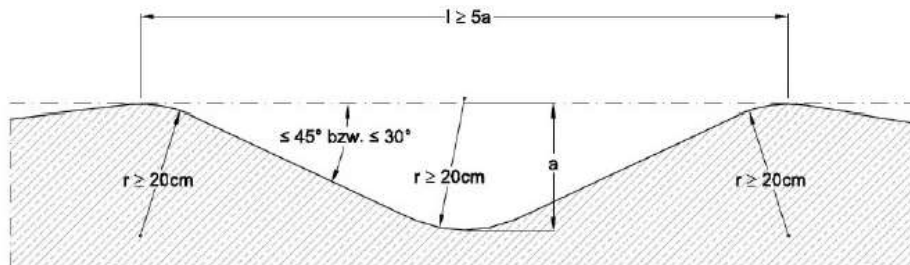


Abb. 3.9: Zulässige Unebenheiten des Abdichtungsträger bei druckwasserentlasteten Querschnitten (Quelle: *Richtlinie Tunnelabdichtung* [29] S.35)

Abdichtungsträger

Um die Unversehrtheit der KDB sicherstellen zu können, muss die Oberfläche der Spritzbetonaußenschale eine gewisse Ebenheit aufweisen. Weiter könnten aus dem Beton ragende Teile wie Ankerplatten oder -köpfe die Abdichtung durchstoßen und zu Leckagen führen. Aus diesem Grund müssen vor Beginn der Innenschalenarbeiten alle herausragende Bauteile und Unebenheiten mit einer dünnen Spritzbetonhaut, dem sogenannten Abdichtungsträger, versiegelt werden. Um den Verbund zur Außenschale herzustellen, ist der bestehende Spritzbeton einer Hochdruckreinigung zu unterziehen. Anschließend kann der feine Spritzbeton mit dem Manipulator aufgebracht werden. Dabei sind die in Abb. 3.9 abgebildeten Toleranzen einzuhalten. Der einzusetzende Spritzbeton hat die Mindestgüte SpC 20/25, das maximale Größtkorn GK8 und ein reduziertes Versinterungspotenzial aufzuweisen.⁹²

Sohlgewölbe und Sohlfüllbeton

Sind die Arbeiten am Abdichtungsträger fertiggestellt, wird mit den Arbeiten in der Sohle begonnen. Als erster Schritt muss die, für die Vortriebsarbeiten, interimistisch aufgeschüttete Fahrbahn ausgehoben werden. Dadurch wird die Außenschale im Strossen und Sohlbereich freigelegt. In manchen Fällen wird anschließend eine Trennfolie in der Sohle verlegt (vorwiegend bei druckwasserhaltenden Querschnitten). Um zu große Ungleichmäßigkeiten in der Außenschale auszugleichen, hat sich die Betonage einer Sauberkeitsschicht bewährt. Somit kann ein gleichmäßiger Untergrund

⁹¹Vgl. [27] ÖBV, S. 11 ff.

⁹²Vgl. [29] ÖBV, S. 35 f.

hergestellt und etwaige Schäden an der Trennfolie verhindert werden. Letztere verhindert eine Haftung des Sohlgewölbes an der Außenschale bzw. der Sauberkeitsschicht. Im Zuge all dieser Arbeiten ist stets darauf zu achten, dass sich an keiner Stelle ein Unterprofil einstellt, andernfalls kann die geforderte Betondeckung in bewehrten Sohlblöcken nicht sichergestellt werden. Die nächsten Arbeitsschritte beinhalten etwaige Bewehrungsarbeiten und die anschließende Betonage des Sohlgewölbes bzw. des Sohlfüllbetons. Hierbei müssen zwei Herstellungsvarianten unterschieden werden.

Ist aufgrund der Tunnelstatik eine bewehrte Sohle auszuführen, muss zwischen bewehrtem Sohlgewölbe und unbewehrtem Sohlfüllbeton unterschieden werden. Diese beiden Bauteile sind aus bautechnischen Gründen zeitlich getrennt voneinander herzustellen und in Abb. 3.8 ocker- bzw. türkisfarben eingezeichnet. Um aufwendige Schalungsarbeiten zu umgehen, werden Sohlgewölbe oftmals unter Zuhilfenahme sogenannter Sohlschalwägen hergestellt. Dieser Schalwagen stützt sich auf einer Seite auf dem bereits hergestellten Beton ab, auf der anderen Seite erfolgt die Aufstellung auf der Außenschale. Um dies zu ermöglichen, ist im Zuge der Bewehrungsarbeiten eine Lücke freizuhalten, welche wiederum vor der Betonage des nächsten Blocks zu verschließen ist. Dieser Arbeitsschritt wird Lückenschluss genannt.⁹³

Wird in der Sohle keine Bewehrung benötigt, wird das gesamte Bauteil als Sohlfüllbeton bezeichnet. Aus baubetrieblicher Sicht ist die stark verkürzte Bauzeit gegenüber der zuvor beschriebenen Variante zu nennen.⁹⁴



Abb. 3.10: Widerlager und gebundene Sickerpackung auf einer österreichischen Baustelle (Quelle: Eigene Aufnahme)

Widerlager

Nach dem Abschluss der Arbeiten im Sohlbereich kann mit den Arbeiten an den Widerlagern begonnen werden. Diese werden auch Kicker genannt und bilden das Fundament für den Gewölbebeton und den -schalwagen.⁹⁵ Um die großen Lasten aufnehmen zu können, müssen diese Bauteile im Regelfall bewehrt ausgeführt werden. Baubetriebliche Optimierungen der Bewehrungs- und Betonagearbeiten sind hierbei anzustreben. Um die Leistung im Zuge der Betonagearbeiten

⁹³Vgl. [1] Adam, S. 108

⁹⁴Vgl. [28] ÖBV, S. 87

⁹⁵Vgl. [3] Bauverlag

hochhalten zu können, ist ein dementsprechender Vorlauf bzw. eine Forcierung der Bewehrungsarbeiten unumgänglich. Formgebend ist oftmals die spätere Nutzung des Widerlagers. Dieses kann zum Beispiel im Betrieb einen erhöhten Randweg bilden. In der *Richtlinie Innenschalenbeton* [28] können verschiedenste Ausführungsformen der Widerlager eingesehen werden. Nach dem Abschluss der Widerlagerherstellung beginnen die Arbeiten an der Ulmendrainage.⁹⁶

Ulmendrainage inkl. Sickerpackung

Die Drainagerohre sollen möglichst geradlinig und mit gleichmäßigem Gefälle verlegt werden. Um dies sicherzustellen wird zunächst eine Betonbettung hergestellt. Folglich kommt es zum Einbau der Rohre sowie der Teilummantelung. Letztere ermöglicht den kontrollierten Zufluss zu den Schlitzten der Teilsickerrohre und fixiert die Drainage in der Lage. Um ein Aufschwimmen der Polypropylenrohre im Zuge der Betonage zu verhindern, sind diese entsprechend zu sichern. In der *Richtlinie Tunnelentwässerung* [38] sind Spezifikationen bezüglich dem zu verwendenden Zement und Zuschlag festgelegt.⁹⁷

Die Abdeckung der Drainagerohre erfolgt durch den Einbau des Drainagekörpers. Dieser kann, je nach Erfordernis, in gebundener oder ungebundener Form ausgeführt werden. Die gebundene Ausführung ist im Regelfall aufgrund der Formstabilität und den daraus folgenden Vorteilen im Zuge der Instandhaltungsmaßnahmen zu bevorzugen. Für die zementgebundene Sickerpackung werden in der *Richtlinie Tunnelentwässerung* [38] eine geringe Bindemittelmenge von max. 80 kg/m³ und eine Zugabewassermenge von rund 40 l/m³ empfohlen. Der Transport zum Einbauort kann mittels Fahrmischer von Statten gehen. Allerdings ist Vorsicht geboten. Einerseits ist der Fahrmischer im Voraus gründlich zu reinigen, andererseits sind die Mischzeiten auf ein Minimum zu beschränken. Andernfalls kann es zu Beschädigungen an den Mischfahrzeugen kommen. Ist im Zuge des Transportweges ein Schachtbauwerk inbegriffen, darf eine etwaig vorhandene Betonfalleitung nicht für den Transport der Sickerpackung verwendet werden – Entmischungen sowie Beschädigungen der Leitungen wären die Folge.⁹⁸



Abb. 3.11: Montage der geotextilen Schutzschicht sowie der KDB mittels Rondellen (Quelle: Eigene Aufnahme)

⁹⁶Vgl. [28] ÖBV, S. 87

⁹⁷Vgl. [38] ÖVBB, S. 23

⁹⁸Vgl. [38] ÖVBB, S. 20

Abdichtung

Die Abdichtungsarbeiten im Gewölbebereich bilden den nächsten Schritt. Um diese einerseits schnellstmöglich und andererseits unter Einhaltung aller erforderlichen Maßnahmen bezüglich der Arbeitssicherheit vollziehen zu können, kommt ein sogenannter Abdichtungswagen zum Einsatz. Weiter sind diese Arbeiten mit höchster Sorgfalt auszuführen, weil die Abdichtung zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr zugänglich ist. Um Wassersäcke hinter der KDB zu verhindern, sind bei größeren lokalen Wasserzutritten Abschlauchungen vorzusehen. Weiter hat vor Einbau der KDB der Einbau etwaig erforderlicher Flächendrainagen sowie einer geotextilen Schutzschicht zu erfolgen. Das Schutzvlies ist mit einer Mindestüberlappung von 10 cm eng an dem Abdichtungsträger anliegend anzuordnen. Um dies zu erreichen, sind die Rondellen an den Tiefstellen des Abdichtungsträgers zu befestigen. Diese können im Zuge der späteren Abdichtungsmaßnahmen als Montagehilfe herangezogen werden. Dieser Arbeitsschritt ist in Abb. 3.11 dargestellt. Die KDB hat im Firstbereich mit mindestens 3 Stück Befestigungselementen/m² und an den Kämpfern sowie an den Ulmen mit 2 Stück/m² zu erfolgen. Der Firstbereich ist in diesem Fall mit einem Öffnungswinkel von 120° definiert. Die Befestigung an sich erfolgt durch Anschweißen der KDB an den zuvor montierten Rondellen. Wie in Abb. 3.12 eingesehen werden kann, sind durch die spezielle Befestigungsmethode keine Durchdringungen der KDB erforderlich.⁹⁹

Die Abdichtungsarbeiten werden durch den Einbau des Schutzstreifens im Bereich der Blockfugen abgeschlossen. Dieser wird für die anschließende Gewölbebetonage benötigt (Vgl. Kap 3.3).

Gewölbe

Gemäß der *RVS 09.01.43 Konstruktive Ausführung Innenschalenbeton* [16] ist der Einbau des Gewölbebetons frühestens erlaubt, wenn die Verformungsgeschwindigkeit der Außenschale maximal 4 mm pro Monat beträgt. Allerdings können in quelfähigem Gebirge Zusatzmaßnahmen erforderlich werden.¹⁰⁰

Die Betonzusammensetzung spielt bei der Innenschalenherstellung eine entscheidende Rolle. Aus baubetrieblicher Sicht wird ein früher Ausschalzeitpunkt angepriesen. Um dies zu ermöglichen, ist eine rasche Festigkeitsentwicklung durch hohe Temperaturen im Bauteil erforderlich. Dieser Umstand fördert allerdings die Rissbildung, welche zu verhindern ist. Zusätzlich zur Betonzusammensetzung spielt auch die Frischbetontemperatur eine wesentliche Rolle. Aus Erfahrungswerten haben sich 13 – 18 °C als ideal herauskristallisiert. Bei höheren Frischbetontemperaturen nimmt die Rissbildung zu, bei Geringeren verlangsamt sich die Festigkeitsentwicklung vehement. Weiter ist die Gesamtwassermenge durch entsprechende Nachbehandlung gering zu halten – dadurch können Schwindspannungen eingedämmt werden.¹⁰¹

Falls erforderlich, ist zunächst die Bewehrung zu verlegen. Dies ist in den meisten Fällen nur unter der Zuhilfenahme eines Bewehrungswagens wirtschaftlich zu bewerkstelligen. Um die anschließende Betonage mithilfe des Gewölbeschalwagens zu ermöglichen, ist analog zur Vorgehensweise in der Sohle eine Lücke freizuhalten. Im Falle einer gut koordinierten Bauabwicklung ist es möglich, täglich einen Gewölbeblock zu betonieren. Die erforderliche Ausschalfrist beträgt im Regelfall 12 Stunden. Ist diese abgelaufen, kann die Schalung gesenkt werden sowie die Reinigung und Ölung der Schalhaut erfolgen. Während diesen Arbeiten kann weiter die Nachbehandlung des frisch ausgeschalteten Betonblocks erfolgen. Die letzten Schritte vor dem abermaligen Start der Betonage sind der Aufbau der Stirnschalung sowie das lagerichtige Einrichten des Schalwagens. In Abb. 3.12 kann ein Schalwagen inklusive der Stirnschalung, welcher auf einer österreichischen Baustelle im Einsatz war, eingesehen werden. In den meisten Fällen wird mit zwei Wägen gear-

⁹⁹Vgl. [29] ÖBV, S. 74 f.

¹⁰⁰Vgl. [16] FSV, S. 13

¹⁰¹Vgl. [28] ÖBV, S. 9



Abb. 3.12: Vorläufergewölbeschalwagen zur Herstellung von Gewölbeblöcken mit 12,5 Metern Länge (Quelle: Eigene Aufnahme)

beitet, wobei einer als Vorläufer mit Stirnschalungen und einer zur Betonage der Lückenblöcke als sogenannter Nachläufer eingesetzt wird. Die eingesetzten Maschinen weisen eine gerade Schalhaut auf. Aus diesem Grund ergibt sich in Falle eines Bogens eine marginal polygonale Innenschalenform. In Abb. 3.13 kann der Baufortschritt nach abgeschlossener Betonage der Vorläuferblöcke eingesehen werden.¹⁰²

Der Einbau des Betons erfolgt über Verteilermastpumpen und Betonverteiler oder durch händisches Umschlagen in Füllstützen. Um zu starke hydrostatische Belastungen auf die Schalhaut zu verhindern, ist die Betoniergeschwindigkeit zu begrenzen. Weiter ist eine gleichmäßige Betonspiegeldifferenz auf beiden Seiten einzuhalten. Die Verdichtung des Betons erfolgt über hohlraumseitig situierte Schalungsrüttler und ist in bestimmten Intervallen durchzuführen. Die Betonage der Firstkappe ist möglichst satt herzustellen. Um dies zu ermöglichen werden zumeist kurze Stahlrohre, Spione genannt, eingesetzt. Diese sind im Firstbereich des Schalwagens montiert und ermöglichen die Einsicht in den Füllstand oberhalb des Schalwagens. Weiter kann über die dadurch entstehende Löcher im Firstbereich der Firstspalt verpresst werden. Dieser Arbeitsschritt passiert nach Abschluss der Gewölbearbeiten. Der verbleibende Spalt zwischen Gewölbebeton und Abdichtung wird dabei verpresst.¹⁰³

¹⁰²Vgl. [1] Adam, S. 109

¹⁰³Vgl. [28] ÖBV, S. 57



Abb. 3.13: Massive Ortbetoninnenschale nach Fertigstellung der Vorläuferblöcke (Quelle: Eigene Aufnahme)

Entwässerung, Fahrbahnaufbau, Zwischendecke, etc.

Nach erfolgter Gewölbebetonage kann mit den Arbeiten an der Bergwassersammelleitung, der Fahrbahntwässerung, sowie dem Fahrbahnaufbau begonnen werden. Weiter kann, falls vorgesehen, die Zwischendecke auf die vorgesehenen Konsolen im Kämpferbereich aufgelagert werden. Abschließend erfolgen die finalen elektrischen Einrichtungen, der Ausbau der Querschläge und die Ulmenbeschichtung.

3.9 Zusammenfassung des zentraleuropäischen Innenschalensystems

Die geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten im Alpenraum bringen große Herausforderungen für den Tunnelbau mit sich. Störungszonen, anstehende Bergwasserdrücke und druckhaftes Gebirge erschweren den Bauablauf und erfordern einen umfangreichen Ausbau. Dieser Umstand führt zu verhältnismäßig geringen Vortriebsleistungen und bringt hohe Kosten mit sich. Die Innenschale wird zumeist nach Abschluss der Vortriebsarbeiten unter Zuhilfenahme sogenannter

Schalwägen eingebaut. Je nach statischer Erfordernis wird sie bewehrt oder unbewehrt ausgeführt. Oftmals wird eine Zwischendecke eingezogen, die im Betrieb einige Vorteile mit sich bringt.

Allerdings wird in einigen Regionen der Alpen standfestes Gebirge vorgefunden – ebendort ist es möglich hohe Vortriebsgeschwindigkeiten zu erzielen. Weiter stellt sich eine ausreichend hohe Sicherheit schon durch den Einbau eines geringen Ausbaus ein. Es tut sich die Frage auf, ob eine derart massive Innenschalenkonstruktion in diesen Regionen erforderlich ist. Die massive Ortbetoninnenschale ist jedoch in den Regelwerken verankert.

Kapitel 4

Die schwedische Vorgehensweise beim Tunnelinnenausbau

In diesem Kapitel wird die in vielen schwedischen Tunneln verbaute, im Vergleich zu dem in Mitteleuropa bekannten System stark konträre, Innenschalenkonstruktion vorgestellt. Aus diesem Grund wird bewusst mit vielen schematischen Darstellungen und Fotos gearbeitet. Diese stammen von einer Straßentunnelbaustelle in Schweden, welche im Rahmen dieser Diplomarbeit besucht wurde.

4.1 Normative Anforderungen und Richtlinien

Schweden ist Mitglied der Europäischen Union. Aus diesem Grund sind die Regelwerke, die seitens des in Brüssel stationierten Comité Européen de Normalisation veröffentlicht werden, zu befolgen. Darunter fällt der Eurocode 7 (*ÖNORM EN 1997-1* [35]) in dem die Bemessung in der Geotechnik geregelt wird. Den Spritzbeton betreffend sind unter anderem die *EN 14487* [11] und die *EN 14488* [12] zu beachten. Die europäischen Normen, in denen die relevantesten Branschutzhemen behandelt werden, sind in Kap. 4.7 genau behandelt.

Seitens dem schwedischen Zentralamt für Infrastruktur, der Trafikverket, werden Regelungen für den Bau von Infrastrukturprojekten veröffentlicht. Hier ist vor allem das Regelwerk *Trafikverkets tekniska råd Bro* [47] Tunnel als zentrales Werk für den Tunnelbau hervorzuheben.

4.2 Geotechnische und hydrogeologische Gegebenheiten

In Schweden trifft man im Zuge des Tunnelbaus zumeist sehr harte Gesteinsformationen an. Die durch den Vortrieb entstehenden Verschiebungen fallen dementsprechend sehr gering aus. Zum Beispiel findet man im Raum Stockholm ideale Verhältnisse für den Bau von Untertagebauwerken vor.¹⁰⁴ Größtenteils liegen Granit- und Gneisformationen mit über 100 MPa einaxialer Druckfestigkeit vor.

4.3 Besonderheiten der Vortriebsarbeiten in Schweden

Dem Vortrieb vorausgehend werden bei Erfordernis systematische Injektionen durchgeführt. Mit diesen sollen einerseits Wasserzutritte eingedämmt, andererseits etwaige Grundwasserspiegelveränderungen verhindert werden. Wie in Kap. 4.2 beschrieben, wird in großen Teilen Schwedens hartes Gebirge angetroffen. Diese Formationen können wirtschaftlich lediglich mit Sprengvortrieb durchörtert werden (Vgl. Kap. 2.4). Abschlagslängen von bis zu fünf Meter sind keine Seltenheit. Auf der in den folgenden Kapiteln beschriebenen Baustelle ergaben sich aufgrund des über 250 m² großen, aufzufahrenden Querschnitts große Abraumkubaturen von über 1000 m³ pro Abschlag.

¹⁰⁴Vgl. [40] Persson



Abb. 4.1: Mit Stahlfaserspritzbeton gesicherte Ulme und mittels Gewindestangen abgehängter Abdichtungsschirm (Quelle: Eigene Aufnahme)

In solchen Fällen wirken sich die Schutterung sowie die Bohrgeschwindigkeit maßgebend auf die Vortriebsgeschwindigkeit aus.¹⁰⁵

Aufgrund der stabilen Baugrundverhältnisse muss der Ausbau nur gering ausfallen. Zumeist kommt es lediglich zu einer Sicherung mit Spritzbeton und einer Systemankerung. Für die Sicherungsarbeiten wird in vielen Fällen Stahlfaserspritzbeton verwendet. Durch den Einsatz dieses Spezialproduktes kann der Arbeitsschritt des Bewehrungseinbaus umgangen werden.¹⁰⁶

In Abb. 4.1 kann eine mit Stahlfaserspritzbeton gesicherte Ulme eingesehen werden. Man erkennt, dass ein profiltreuer Vortrieb beim Einsatz der, in Kap. 4.4 dargestellten, speziellen Innenschalenbauweise nicht erforderlich ist. Zusätzlich kann das abgebaute Gestein im Regelfall als Zuschlagsstoff für die Betonherstellung verwendet werden. Etwaige hohe Kosten für die Entsorgung des Ausbruchsmaterials entfallen somit.¹⁰⁷

4.4 Innenschalenkonstruktion

Aufgrund der in Kap. 4.2 beschriebenen geologischen bzw. hydrogeologischen Gegebenheiten sind die Belastungen auf den Ausbau gering. Es ergeben sich sehr geringe Verschiebungen, da die Kombination einer SpC-Außenschale mit einer Systemankerung einen ausreichend großen Ausbauwiderstand ausübt. Es stellt sich früh der Zustand einer ausreichend hohen Standsicherheit ein – somit muss die Innenschale keine statische Funktion übernehmen.

In Abb. 4.2 und Abb. 4.5 kann der Querschnitt eines beispielhaften Straßentunnels in Schweden eingesehen werden. Wie man erkennen kann, ist die Innenschale grob in zwei Teile zu trennen.

¹⁰⁵Vgl. [21] Goger, S. 70

¹⁰⁶Vgl. [1] Adam, S. 95

¹⁰⁷Vgl. [21] Goger, S. 264

Die seitliche Abgrenzung wird mit vertikalen Fertigteilwänden realisiert. An der Decke wird eine dünne Firstkonstruktion verbaut.



Abb. 4.2: Fertiger Innenschalenrohbau inkl. Deckenelementen zur Beleuchtungs- und Bewetterungsinstitution (Quelle: Eigene Aufnahme)

Um die in Kap. 4.5 beschriebene partielle Abdichtung gegen Bergwasser über die ganze Abwicklung der Innenschale sicherstellen zu können, ist dem Übergangsbereich zwischen diesen beiden Elementen besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Allerdings ist aufgrund der in Kap. 4.8 beschriebenen Gründe ein kraftschlüssiger Verbund zu verhindern. Beim Auftragen der Spritzbetonschicht sind die Wandelemente daher mit einer Folie abzudecken (siehe Abb. 4.7). Im Allgemeinen ist ein kräftschlüssiger Verbund der Wandsegmente sowohl untereinander als auch zu anderen Bauteilen zu verhindern. Eine Ausnahme bilden die Gewindestangen und Felsanker zur Lagesicherung der Decke und der Fertigteile.¹⁰⁸

An der in Fahrtrichtung rechten Seite werden die Betonelemente mit einem gewissen Abstand zur Ulme platziert (siehe Abb. 4.5). Dadurch entsteht der in Kap. 4.6 genauer beschriebene Installationskorridor. Dieser kann in Abhängigkeit der Ausbaustufe verschiedene Funktionen erfüllen:

- Fluchtweg
- Fuß-/Radweg (bei kürzeren Tunnelbauwerken zur Flussunterquerung eingesetzt)
- Leitungsführung:
 - Elektrik
 - Löschwasser
 - Bergwasser
 - Schmutzwässer
- Kombinationen obiger Punkte

¹⁰⁸Vgl. [45] Trafikverket, S. 9

Im Folgenden werden der Aufbau im Firstbereich und die seitlichen Bauteile der Innenschalenkonstruktion genauer erläutert.

Firstkonstruktion

Die Deckenkonstruktion wird mit Hilfe vieler im Berg vermörtelter Gewindestangen an der Tunnelfirste befestigt. Die Mindestmenge an Aufhängungen ergibt sich einerseits aus der statischen Erfordernis und andererseits sind diese notwendig, um eine bestmögliche Sichelform der Innenschale verwirklichen zu können. Letztere ist für die Sicherstellung der Wasserableitung erforderlich.

Die stabförmigen Elemente halten die Innenschalenkonstruktion in Position und müssen die entstehenden Lasten abtragen können. Die Stangen werden in zuvor abgebohrte Löcher eingebracht und in weiterer Folge wird der Ringraum mit Zementmörtel verfüllt – andernfalls kann der erforderliche Verbund zwischen Gewindestange und Gebirge nicht hergestellt werden. Freie Stahllängen sind zu vermeiden. Aus diesem Grund stellen die Elemente sogenannte Verpresspfähle dar (gem. EN 1997-1 [35]). Die erforderliche Einbindelänge ergibt sich aus der statischen Erfordernis. Die Art und Güte sowie der Durchmesser des Ankermediums, die Gebirgs- oder Bodenfestigkeit, die vorherrschenden Wasserverhältnisse und die Belastung sind hierbei die bestimmenden Parameter. Eine Mindesteinbindelänge von 50 cm ist immer einzuhalten. Das Funktionsprinzip der auf Zug beanspruchten Verpresspfähle kann in Abb. 2.8 eingesehen werden. Sowohl die Gewindestangen als auch das eingesetzte Verpressgut müssen hohe Anforderungen im Bezug auf die Dauerhaftigkeit erfüllen. Diese sind in den Kapiteln 4.7 und 4.8 angeführt.

Die Firstkonstruktion gliedert sich in zwei Schichten. Bergseitig liegt eine wenige Millimeter dicke Kunststoffolie. Sie dient der Bergwasserableitung und wird in Kap. 4.5 ausführlich beschrieben. Die Folie wird fahrbahnseitig von einer, mit Polypropylenfasern bestückten und einlagig bewehrten, Spritzbetonschicht abgedeckt. Diese ist aus folgenden Gründen unumgänglich:¹⁰⁹

- Steinschlagschutz
- Aufrechterhaltung der Formtreue der gesamten Firstkonstruktion
 - Realisierung der geforderten Biegesteifigkeit
 - Verhinderung bergseitiger Wasserlackenbildung
 - Sicherstellung der Widerstandsfähigkeit im Brandfall
- Ermöglichung kleinerer Montagen (Verkehrskameras, ...)
- Gefühl der Sicherheit für den Nutzer (Mentale Komponente)

Damit der frisch aufgetragene Spritzbeton an der Firste haftet, wird die Abdichtungsfolie mit einer Armierung, an der dem Fahrbereich zugewandten Seite, versehen. Zusätzlich kommt es durch den Einbau der Baustahlgitterlage zur Eindämmung etwaiger Abplatzungen. Es sind, sowohl zwischen Folie und Bewehrung, als auch zum Fahrbereich hin Betondeckungen einzuhalten. Erstere hat den Schutz der Abdichtung als Hintergrund, zweite ist für den Korrosionsschutz erforderlich. Die Dicke der Spritzbetonschicht ergibt sich somit nicht aus statischen, sondern aus Gründen der Dauerhaftigkeit. Alle geforderten Expositions- und Korrosivitätsklassen sind in TRVK Bro 11 [47] Anlage 5 festgehalten. Um die Anforderungen im Bezug auf den Brandschutz erfüllen zu können, ist der Spritzbeton mit Kunststofffasern zu versehen (siehe Kap. 4.7). Da die Spritzbetonhaut die finale Oberfläche im Fahrbereich darstellt, ist deren Ebenheit besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Die maximale Abweichung auf einer Messstrecke von zwei Metern ist mit 75 mm festgelegt.¹¹⁰

¹⁰⁹Vgl. [45] Trafikverket, S. 12

¹¹⁰Vgl. [45] Trafikverket, S. 9 f.

Wandelemente

Betonfertigteilwände bilden die seitliche Begrenzung des Verkehrsbereichs. Die Elemente werden mit Hilfe kleiner Felsanker (= Verpresspfähle; analog zu den in Kap. 4.4 beschriebenen Gewindestangen) in Position gehalten. Bei dem Beispielprojekt in Schweden sind zufolge Eigenlast und veränderlicher sowie außergewöhnlicher Einwirkungen pro Wandsegment je zwei vertikale und horizontale Ankerungen erforderlich.¹¹¹



- | | |
|---|--|
| 1. Anker (Lagesicherung der Wandelemente) | 3. Gewindestange (Lagesicherung der Folie) |
| 2. Wandbildende Fertigteilsegmente | 4. Tunnelabdichtung |

Abb. 4.3: Flucht- und Instandhaltungskorridor in einem schwedischen Tunnel (Quelle: Eigene Aufnahme)

In Abb. 4.3 sind diese Befestigungselemente dargestellt. Die Wände werden sozusagen in den Tunnel gehängt. Um einem etwaigen Schwingen der Elemente entgegenzuwirken, werden diese an der einen Ulme in vorgefertigte Fundamente eingestellt und an der anderen Ulme in den Randweg integriert. Diese Fundamente können in Abb. 4.1 eingesehen werden.

4.5 Adaptiertes Regenschirmprinzip mit partieller Abdichtung

Das Dichtungskonzept, welches eine spezielle Ausführungsart des Regenschirmprinzips darstellt, gliedert sich in zwei Punkte. Einerseits zielt die Vorabdichtung mittels Injektionen auf ein Verschließen des Porenraums (Lockergestein) bzw. der Klüfte (Fels) ab. Der Wasserandrang in den Tunnel wird durch diese Vorkehrungen stark reduziert. Diese Vorabdichtungsmaßnahmen sind kostspielig und der erwünschte Erfolg kann, wie bei allen Spezialtiefbauverfahren, nicht in 100 Prozent der Fälle sichergestellt werden. Weiter muss der ausgebrochene Tunnel als großer Drainagekörper betrachtet werden. Durch diese Umstände kommt es oftmals bei zuvor komplett

¹¹¹Vgl. [45] Trafikverket, S. 7

trockenen Tunneln und Stollen, erst nach einigen Jahren während des Betriebs zu unerwünschten Wasserinfiltrationen.¹¹²

Um die Dauerhaftigkeit über die gesamte Nutzungsdauer sicherzustellen, ist die Ausbildung einer Hauptabdichtung unumgänglich. Diese wird durch wenige Millimeter dicke Isolierfolien verwirklicht und im Rahmen der Innenschalenarbeiten eingebaut. Die umfangreichen Anforderungen sind in der *EN 13491* [8] festgehalten. Um eine ideale Wasserableitung zu garantieren, weist diese bergseitig eine glatte Oberfläche auf. Auf der Innenseite (Fahrbahnseitig) ist eine Armierung aufgeklebt. Es ergibt sich eine raue Oberfläche – die Haftverbundwirkung mit dem Spritzbeton wird verbessert.

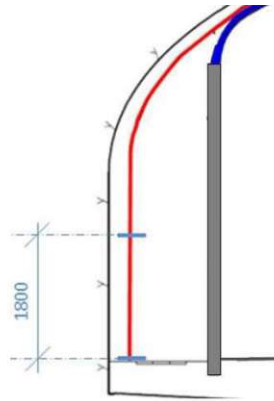


Abb. 4.4: Schematische Darstellung der Führung der Abdichtungsfolie inkl. Wartungsöffnung (Quelle: Trafikverket [45])

Um die Dichtigkeit der Konstruktion garantieren zu können, ist eine adäquate Verbindung der einzelnen Bahnen unumgänglich. Die zuerst lose verlegten Bahnen werden mit Doppelnähten miteinander verschweißt. Die Unversehrtheit muss im Zuge von Prüfungen nachgewiesen werden. In Abb. 3.5 sind einige Ausführungen von Schweißnähten und deren jeweiligen Prüfungsverfahren ersichtlich. Für die Doppelschweißnaht ist somit eine Druckluftprüfung durchzuführen.¹¹³

Zur Sicherstellung der Dichtigkeit werden die einzelnen Folien, wie schon in Kap. 3.4 beschrieben, mit Doppelschweißnähten verbunden und anschließend geprüft. Da eine lange Nutzungsdauer angezielt wird und Instandhaltungsmaßnahmen im Tunnelbau großen Aufwand, Verkehrsumlegungen oder sogar vorübergehende Sperren mit sich bringen, sind sowohl der Einbau der Folienbahnen sowie die anschließenden Prüfungen mit größter Sorgfalt durchzuführen.

Etwaige zutretende Bergwässer fließen über die, in Abb. 4.4 in rot dargestellte, Abdichtungsfolie zu den Ulmenbereichen. Sie versickern in den geschütteten Boden und laufen in weiterer Folge in den, in Abb. 4.5 abgebildeten, Sammelkanal. Dieser befindet sich an der tiefsten Stelle des Ausbruchprofils. In den Tunnel zuströmende Wässer (z.B. infolge von Regenfällen) oder aus den Fahrzeugen austretende Flüssigkeiten werden in, an den Ulmen geführten, Abwasserleitungen gesammelt und von diesen in gewissen Abständen ebenfalls in den tiefer liegenden Sammelkanal eingeleitet. In Abhängigkeit der Trassierung des Bauwerks ist eventuell eine Pumpanlage, mit der der Abtransport der Wässer aus dem Bauwerk bewerkstelligt wird, erforderlich. Vor der Einleitung in die Vorflut muss eine Gewässerschutzanlage vorgeschaltet sein – in dieser wird durch laufende Messungen eine etwaige Verschmutzung festgestellt und in weiterer Folge können erforderliche Reinigungsverfahren durchgeführt werden.¹¹⁴

¹¹²Vgl. [20] Girmscheid, S. 373

¹¹³Vgl. [20] Girmscheid, S. 392 ff.

¹¹⁴Vgl. [46] Trafikverket, S. 16 f.

4.6 Elektrische Einrichtungen und Einbauten

Direkt unterhalb des Instandhaltungskorridors befindet sich der Kabelkollektor. Diese Situierung ermöglicht kleinere Wartungsarbeiten unter Aufrechterhaltung des laufenden Betriebs. Alle geplanten Elektroinstallationen werden in diesem Kollektor integriert. Sollten im Zuge des Betriebs zusätzliche Leitungen erforderlich sein, können diese im Nachgang in den oberen Bereichen des Instandhaltungskorridors angebracht werden.

Im Falle notwendiger kleiner Montagen an der Decke ist eine Durchdringung der Dachbahn durch etwaige Befestigungsmittel jedenfalls zu verhindern. Die Spritzbetondecke muss die Lasten dieser Montagen (z.B. Kameras o.Ä.) abtragen können. Im Falle des Beispielprojektes sind diese Einbauten auf all jene mit wenigen Kilogramm an Masse limitiert. Lüftungsgeräte, Verkehrsschilder bzw. jegliche weiteren Installationen mit größerer Masse dürfen nicht in der SpC-Schicht befestigt werden. Sie müssen folglich an Betonsegmente, welche wiederum im Gebirge zu verankern sind, montiert werden. Letztere sind in Abb. 4.2 dargestellt. Der Übergang zwischen diesen Ortbetonbauteilen und der Deckenkonstruktion ist wasserdicht auszuführen.¹¹⁵

4.7 Brandschutz

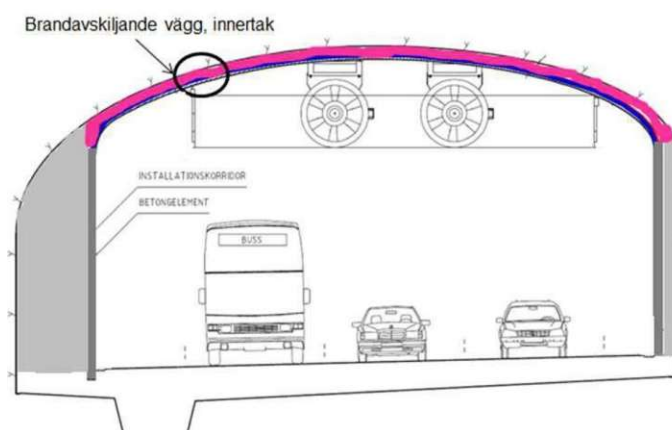


Abb. 4.5: Innenschalenvariante mit abgehängter Abdichtung und vom Fahrraum getrennten Installationskorridor (Quelle: Trafikverket [45])

Für Betonbauwerke bildet, wie in Kap. 4.1 beschrieben, die europäische Norm *EN 1992-1-2* [33] das grundlegende Regelwerk für die Brandbemessung von Beton- und Spritzbetonkonstruktionen. Laut dem schwedischen, nationalen Dokument der *EN 1363-2* [10] sind alle Bereiche in Tunnelbauwerken auf ein 180 Minuten andauerndes Brandereignis zu bemessen. Die anzusetzende Brandlast kann selbigem Werk entnommen werden.

Die hohen Temperaturen bei Brandereignissen können zu Abplatzungen des Betons führen. Um diesem Umstand entgegenzuwirken, ist die Spritzbetonkonstruktion, auf der dem Fahrbereich zugewandten Seite, mit Polypropylenfasern zu versehen. Pro Kubikmeter Beton müssen mindestens 1,5 kg Fasern mit nachgewiesenen Eigenschaften zur Verhinderung der Explosionspaltung enthalten sein. Im Vorfeld der Baumaßnahme sind Spaltversuche durchzuführen.¹¹⁶

¹¹⁵Vgl. [45] Trafikverket, S. 10 ff.

¹¹⁶Vgl. [45] Trafikverket, S. 8

Die Abdichtungsfolie muss gemäß der Klassifizierungsnorm *EN 13501* [9] die Brandklasse D-s2,d1 beziehungsweise die Brandklasse E erfüllen. Die genauen Anforderungen der jeweiligen Klassen können im Regelwerk nachgelesen werden.

Durch den Einbau von Brandtrennwänden kann der Freiraum zwischen der Spritzbetondecke und der Außenschale verschlossen werden. Diese Bauteile sind in Abb. 4.5 in pinker Farbe angedeutet. Sie müssen die Anforderungen der Brandschutzklasse EI 60 erfüllen. Um die Tragfähigkeit bei Bränden in diesen Bereichen aufrecht erhalten zu können, muss der Ankermörtel, mit dem die Gewindestangen im Fels verankert sind, ebenfalls einer 60 minütigen Feuereinwirkung standhalten.¹¹⁷

4.8 Dauerhaftigkeit und Instandhaltung

Soll ein langjähriger Betrieb des Bauwerks ermöglicht werden, sind Instandhaltungsarbeiten in regelmäßigen Intervallen durchzuführen. Der vom Fahrweg getrennte Korridor bietet die Möglichkeit, diese Arbeiten durchzuführen, ohne den laufenden Betrieb zu stören.

Eines der wichtigsten Elemente der Gesamtkonstruktion stellt die Abdichtungsfolie dar. Um diese bergseitig auf ihre Unversehrtheit prüfen zu können werden Instandhaltungsfenster vorgesehen. Diese sind in 25 Meter Abständen einzubauen und haben eine Mindestgröße aufzuweisen.¹¹⁸ Das vertikale Mindestausmaß dieser Öffnungen ist in Abb. 4.4 angedeutet.

Wie in Kap. 4.4 beschrieben, sind die First- und Wandkonstruktion ohne statischen Verbund herzustellen. Dies bringt bei erforderlichen Instandsetzungen der Wandelemente immense Vorteile. Kommt es durch einen Anprall oder ein Brandereignis zu einer Beschädigung eines Fertigteils, kann dieses durch Lösen der Ankerverschraubungen innerhalb kürzester Zeit ausgetauscht werden.

Bergwasser kann in den Spalt zwischen der Außenschale und der Firstkonstruktion eintreten – in diesem Bereich befinden sich die Gewindestangen sowie deren Verschraubungen. Um die Dauerhaftigkeit eben dieser garantieren zu können, müssen sie aus nichtrostendem Stahl bestehen. Diese Bauteile sind den, in der Norm *EN 1993-1-4* [34] Anhang A, beschriebenen Korrosionsprüfungen zu unterziehen.¹¹⁹

4.9 Bauablauf

Im Anschluss an die Vortriebsarbeiten (Siehe Kap. 4.3) wird mit den Arbeiten an der Innenschale begonnen. Zu Beginn werden die notwendigen Vorkehrungen für die zu verankernden Ortbetonbauteile getroffen. Es werden Löcher durch den Spritzbeton in das Gebirge gebohrt, die Gewindestangen einbracht und der ringförmige Hohlraum verpresst.

Nach dem Verstreichen der Aushärtezeit des Verpressguts, kann mit den Montagearbeiten der Abdichtung begonnen werden. Mithilfe tellerförmiger Scheiben wird diese in der gewünschten Position gehalten. Um die Stangen durch die Folie führen zu können, muss diese durchlöchert werden. Allerdings darf dabei die Funktion der reibungslosen Wasserableitung nicht verloren gehen. Das Durchdringen von Wassertropfen wird mit, an den Scheiben befestigten, Gummiabdichtungen verhindert. Aufgrund der speziellen Befestigungsart entsteht ein für dieses System charakteristischer Spalt zwischen der Außenschale und der Abdichtung.

In weiterer Folge werden die Schritte zur Herstellung der seitlichen Wandkonstruktion gesetzt. Wie in Abb. 4.5 eingesehen werden kann, wird in Fahrtrichtung rechts ein Randweg ausgeführt (Installationskorridor). Dessen Funktionen sind in Kap. 4.8 beschrieben. Durch die unterschiedliche

¹¹⁷Vgl. [45] Trafikverket, S. 12

¹¹⁸Vgl. [45] Trafikverket, S. 12

¹¹⁹Vgl. [47] Trafikverket, Abschnitt E2.2.1.5

Ausführung der ulmennahen Bauteile ergeben sich verschiedene Bauabläufe. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Zu Beginn werden die Löcher, in die im Anschluss die Gewindestangen für die Fixierung der Wandelemente eingebracht werden, abgebohrt. Anschließend wird der entstandene Ringraum mit Zementmörtel verpresst.

Im nächsten Schritt kommt es zur Herstellung des Planums und dem ersten Teil der Randwegherstellung. Dieser besteht aus dem Schalungsbau (inkl. der Ausnehmung für den Kabelkollektor), den Bewehrungsarbeiten, dem Einheben des Kabelkollektors und der anschließenden Betonage. Nachdem die Aushärtezeit vorüber ist, können die Fertigteilwände mit Hilfe des Erektors (siehe Abb. 4.6) versetzt werden. Diese werden durch das Anziehen der Befestigungselemente in deren Lage fixiert. Im letzten Arbeitsschritt wird der Spalt zwischen Randweg und Wandelement sowie der Gehwegaufbau betoniert. Ein Verbund zwischen dem bestehenden vertikalen Bauteil und dem frischen Beton wird durch die Befestigung einer Folie vermieden (Vgl. Kap. 4.8).

Zur Optimierung des Bauablaufes kann das Einblasen der Kabel in erzwungenen Stillstandszeiten (z.B. Aushärtezeit) erledigt werden. Weiter sind aus selbigem Grund auch die Befestigungselemente der Fertigteilwände zusammen mit all jenen der Hauptabdichtung herzustellen.



Abb. 4.6: Erektor zur Manipulation der Wandelemente (Quelle: Eigene Aufnahme)

An der gegenüberliegenden Ulme beginnt man mit der ebenfalls mit den Arbeitsschritten der Gewindestangenbefestigung, sowie der Herstellung eines Arbeitsplanums. Im Anschluss werden kleine L-förmige Fertigteile mittels Stapler versetzt. Diese stellen die Fundamente für die später darauf aufgesetzten Wandelemente dar. Die kleinen, in Abb. 4.1 abgebildeten, Fertigteile werden durch anschließende Betonage des freien Raumes zur Außenschale hin befestigt. Nach der Aushärtezeit können die Wandelemente versetzt werden. Abschließend wird die Lagesicherung vollzogen.

Im Zuge der nächsten Arbeitsschritte wird die Deckenkonstruktion hergestellt. Eine Bewehrungslage wird fahrbahnseitig montiert. Aus folgenden Gründen ist dabei lediglich Mattenware einzusetzen:

- Erforderliche Einheitlichkeit der Stababstände zufolge der statischen Erfordernis und zur Sicherstellung des Haftverbundes zwischen dem Spritzbeton und dem Baustahl
- Deutlich schnellerer Einbau gegenüber Stabstahl
- Minimierung der Anzahl an erforderlichen Gewindestangen zur Fixierung



Abb. 4.7: Folienabdeckung der Fertigteilwände und im Firstbereich fixierte Bewehrung (Quelle: Eigene Aufnahme)

Die Matten werden gemeinsam mit den im Anschluss aufgezählten Produkten in folgender Reihenfolge auf die Gewindestangen geschraubt (Reihenfolge von Außen nach Innen):

1. Mutter
2. Verkantungsschutz (Stahlverteiler + Gummiring)
3. Scheibe + Schaumstoffaufsatz
4. Hauptabdichtungsfolie
5. Scheibe + Schaumstoffaufsatz
6. Abstandhalter aus Kunststoff
7. Bewehrungsmatte
8. X-förmiger Baustahl
9. Mutter

Nachdem die Mutter (Punkt 9) aufgeschraubt wurde, ist der Überstand der Gewindestange abzuschneiden. Im Umgang mit diesen spitzen Baumaterialien ist darauf zu achten, dass die Sicherheit der Arbeiter und Angestellten in allen Bauzuständen erhalten bleibt.

Bevor mit den anstehenden Spritzbetonarbeiten begonnen werden kann, sind die Fertigteilwände durch eine Folienabdeckung zu schützen. Dies hat mehrere Hintergründe. Es muss verhindert werden, dass es zu einem Verbund der gespritzten Firste und den Fertigteilen kommt. Weiter ist aus optischen Gründen eine Verschmutzung der Elemente zu verhindern.

Sind die Abdeckungsarbeiten abgeschlossen, kann mit dem Auftrag des, mit Polypropylenfasern bestückten, Spritzbetons begonnen werden. Zuzufolge der in Kap. 4.3 beschriebenen vorausseilenden Injektionen ergeben sich relativ trockene Baugrundverhältnisse. Dies erleichtert die Herstellung einer temporären Fahrsohle und somit kann für den Spritzbetonauftrag der in Abb. 4.8 dargestellte, auf einen LKW aufgebaute, Manipulator eingesetzt werden. Dieser bringt gegenüber den während der Vortriebsarbeiten eingesetzten Spritzbetonmanipulatoren folgende Vorteile mit sich:



Abb. 4.8: Spritzbetonmanipulatoraufbau auf einem LKW (Quelle: Eigene Aufnahme)

- Straßenzulassung – Einfacher Transport zwischen den Einsatzorten bzw. Baustellen
- Hohe Fahrgeschwindigkeiten
- Modularer Aufbau je nach Erfordernis
- Kostengünstigere Instandhaltung aufgrund des herkömmlichen Fahrwerks

Mit der Applikation des, mit Polypropylenfasern bestückten, Spritzbetons werden die Arbeiten an der Innenschalenkonstruktion abgeschlossen. In weiterer Folge kommt es zum Einbau der Beleuchtungsmittel und Lüftungsanlagen. Diese werden an den, in Kap. 4.6 beschriebenen, Ortbetonelementen im Firstbereich befestigt.

Bei Regenereignissen kann es zum Wassereintrag an den Portalen kommen. Um diese Wässer kontrolliert ableiten zu können sind Einbauten im Sohlbereich vorzusehen, bevor im Anschluss der Fahrbahnaufbau sowie der finale Innenausbau (Kennzeichnung Fluchtwege, Beschichtungen, usw.) eingebaut werden kann.

4.10 Zusammenfassung des schwedischen Innenschalensystems

Das im Zuge des Tunnelbaus in Schweden anzutreffende Gebirge ist im Regelfall als standfest zu beschreiben. Im Zuge der Vortriebsarbeiten sind große Abschlagslängen und ein Vollausruch alltäglich. Weiter kann das zu schutternde Material oftmals wiederverwendet werden. Ein etwaiger Mehrausbruch bringt folglich nicht zwingend eine Kostenerhöhung mit sich. Hohen Leistungen im Sprengvortrieb und einem geringen Ausbau steht somit grundsätzlich nichts im Wege. Durch vorausseilende Gebirgsinjektionen kommt es weiter zur Eindämmung der Bergwasserzutritte.

Aus all diesen Gründen ist zumeist eine dünne Innenschalenkonstruktion ohne statischer Funktion ausreichend. Das abgehängte Spritzbetongewölbe hat lediglich abdichtende und den Brandschutz betreffende Aufgaben zu erfüllen. Um irreparable Schäden an der SpC-Konstruktion zu verhindern, werden austauschbare Fertigteilwände an den Fahrbahnrandern platziert.

Kapitel 5

Die norwegische Vorgehensweise beim Tunnelinnenausbau

In Norwegen wird, im Bezug auf den Tunnelbau, zumeist eine sehr günstige Baugrundsituation vorgefunden. Dieser zumeist sehr harte Sprengfels wird in Kap. 5.2 ausführlich beschrieben. Ein zusätzlicher Ausbau mittels Spritzbeton und Stützmitteln erhöht die Standsicherheit weiter. Folglich hat die Innenschalenkonstruktion keine statische Funktion zu erfüllen – sie wird lediglich für brandschutz-, frostschutz- und abdichtungstechnische Anforderungen benötigt. Die zu erfüllenden Aufgaben der Innenschale sind somit analog zu all jenen des schwedischen Innenausbau. Im Laufe der Zeit haben sich Systeme entwickelt, die jenem in Kap. 4.4 beschriebenen sehr ähnlich sind. Um Wiederholungen der Inhalte dieses Kapitels zu vermeiden, werden vorwiegend die Differenzen gegenüber dem zuvor beschriebenen System behandelt.

5.1 Normative Anforderungen und Richtlinien

Die norwegische Bevölkerung hat sich in zwei Volksabstimmungen, die in den Jahren 1972 und 1994 stattgefunden haben, jeweils mehrheitlich gegen einen Beitritt zur Europäischen Union (EU) entschieden. Allerdings ist der skandinavische Staat Teil des Europäischen Wirtschaftsraumes (EWR) und pflegt somit enge wirtschaftliche Beziehungen zur EU. Um die Zusammenarbeit, den freien Warenverkehr und die Vereinheitlichung der Regelwerke sicherzustellen, wurden die Normen des CEN übernommen. Somit gelten die, in Kap. 3.1 angeführten, wichtigsten Vertreter der tunnelbauspezifischen europäischen Normen auch in Norwegen.¹²⁰

Zusätzlich zu den Regelwerken des CEN werden seitens der norwegischen Straßenverwaltungsbehörde, Statens Vegvesen, Richtlinien und Standards für den Bau und die Instandhaltung der Straßeninfrastruktur veröffentlicht. Diese umfassen Aspekte wie den Entwurf, die einzuhalten- de Sicherheit, mögliche Ausführungsvarianten und die einzuhaltenden Qualitätsanforderungen. Beispielhaft werden die wichtigsten Vertreter genannt:¹²¹

- N500 Straßentunnel: Planung und Entwurf von Straßentunneln
- R510 Wasser- und Frostschutz in Tunneln: Anforderungen und Bemessungsregeln für die Abschirmung von Frost und Wasser
- V520 Tunnelführung: Ergänzende Anleitungen und Empfehlungen zu den im Handbuch N500 gestellten Anforderungen

Eine der erforderlichen Grundlagen für die Verfassung und laufende Adaptierung der geotechnischen Richtlinien ist die Geologie – im Falle eines fast ausschließlich guten Baugrunds kann z.B. ein geringeres Ausmaß für den aufzubringenden Mindestausbau festgelegt werden. Die

¹²⁰Vgl. [7] EFTA-Sekretariat, S. 1

¹²¹Vgl. [42] Statens Vegvesen Norwegian Public Roads Administration

vorliegenden geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse sind in dem anschließenden Teil erläutert.

5.2 Geotechnische und hydrogeologische Gegebenheiten

Im Norden Europas befindet sich eine ausgedehnte kontinentale Platte, deren westlicher Teil das sogenannte Grundgebirge der Länder Norwegen, Schweden und Finnland darstellt. Aus diesem Grund weisen die Länder sehr ähnliche geologische Formationen auf. Wie schon eingehend beschrieben, erweisen sich die vorliegenden Verhältnisse als günstig für Bau von Tunnelbauwerken. Im südlichen Teil des skandinavischen Landes werden vorwiegend Granite mit hohen Druckfestigkeiten vorgefunden. Im zentralen Gebiet liegt das sogenannte kaledonische Gebirge. Es handelt sich um ein Gebirge, das aufgrund des Zerfalls des Urkontinents Pangäa und der folgenden Näherung des Krustenstücks Gondwana, vom Süden her, entstanden ist. Durch die Kollision dieser beiden Komplexe kam es zu Zerreibungen und Brüchen, die sowohl in Norwegen als auch im schwedischen Raum um das Gebiet Schonen vorgefunden werden.¹²² Im Norden des Landes trifft man auf eiszeitliche Hinterlassenschaften in Form von Sandsteinen, Tilliten usw. Die Ablagerungsgesteine stellen keinen idealen Sprengfels dar und können die Vortriebsarbeiten erschweren. Allerdings ist dieses Gebiet kaum besiedelt – die Bevölkerungsdichte liegt bei kleiner fünf Einwohnern pro Quadratkilometer. Somit ist der Fokus für den Ausbau bzw. die Erhaltung der Verkehrsinfrastruktur nicht auf diese Region gerichtet.¹²³

5.3 Besonderheiten der Vortriebsarbeiten in Norwegen

Dem Vortrieb vorausgehend sind Erkundungsbohrungen zur Detektion von Störungszonen und Bergwässern durchzuführen. Diesen Bohrungen ist vor allem bei Untertagebauwerken besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Auf deren Basis wird entschieden, ob weitere Maßnahmen wie zusätzliche Bohrungen, Ortsbrustanker etc. zu setzen sind. Zur Eindämmung etwaiger Bergwässer können vorausgehende Injektionen mit Gütern auf zementöser Basis durchgeführt werden (Vgl. Kap. 4.3). Weiter können dadurch Grundwasserabsenkungen und damit einhergehende Setzungen, die wiederum zu Schäden an Gebäuden etc. führen würden, verhindert werden.¹²⁴

Die vorwiegend vorliegenden, harten Felsformationen in norwegischen Untertagebauwerken werden im Regelfall mit Sprengvortrieb aufgeföhren (Vgl. Kap. 5.2). Aufwändige Ankerungen oder Gitterbögen kommen nur in seltenen Fällen zum Einsatz. Zur Vereinheitlichung dieser etwaigen Sicherungsmaßnahmen wurde seitens der norwegischen Straßenbaubehörde eine Tabelle veröffentlicht, in der die zu verwendenden Sicherungsmaßnahmen in Abhängigkeit des Q-Wertes festgelegt sind. Auf Grundlage deren Ausmaßes werden Schutzklassen definiert.¹²⁵

Der Q-Wert kann für die Gebirgsklassifikation verwendet und mithilfe des Q-System ermittelt werden. Letzteres wurde 1974 seitens Barton [2] veröffentlicht und unter anderem vom norwegischen geotechnischen Institut (NGI) stetig weiterentwickelt. Die Formeln hinter dieser Berechnung sind empirischer Natur – die einfließenden Parameter wurden zufolge der gewonnenen Erfahrungen von tausenden Beispielen bestehender Tunnel festgelegt.¹²⁶

¹²²Vgl. [5] Bräunlich

¹²³Vgl. [19] Gea Norvegica UNESCO Global Geopark

¹²⁴Vgl. [49] Vegdirektoratet, S. 46 f.

¹²⁵Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 39

¹²⁶Vgl. [22] Holter

5.4 Innenschalenkonstruktion

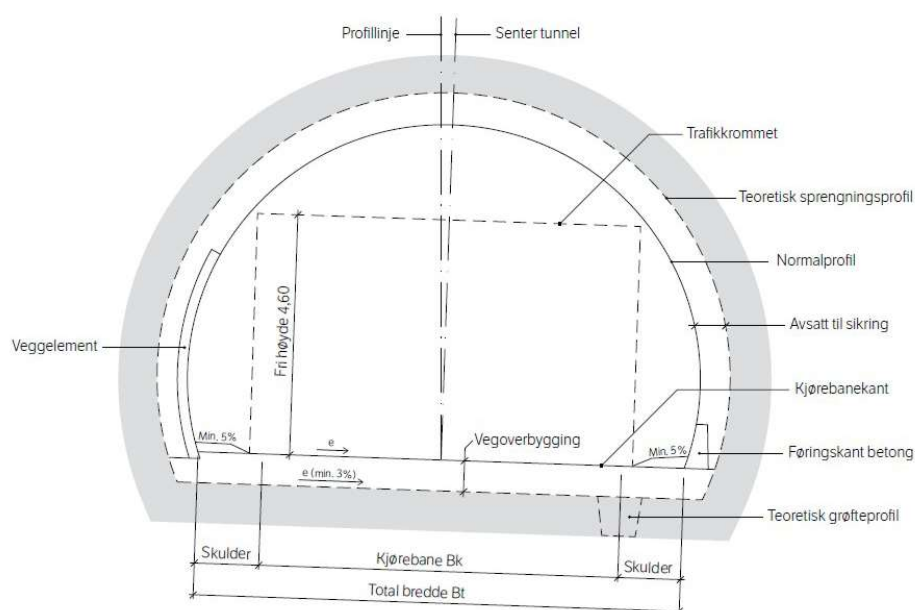


Abb. 5.1: Schematischer Tunnelquerschnitt zur Gegenüberstellung der möglichen Ausführungsvarianten mit Wandelementen oder Leitkanten (Quelle: Vegdirektoratet [48], S. 17)

Aufgrund der, in den Regelwerken der norwegischen Verkehrsbehörde, festgelegten Tunnelprofile, gibt es strikte Vorgaben, wie die Querschnittsgestaltung zu erfolgen hat. Das zu verwendende Tunnelprofil, sowie die Anzahl der erforderlichen Tunnelröhren, wird aufgrund der vorliegenden Bemessungsklasse festgelegt. In Tab. 5.1 kann dieser Zusammenhang eingesehen werden. Weiter sind sämtliche Abmessungen, wie zum Beispiel die Fahrbahnbreite, für jedes Tunnelprofil vorgegeben. Manche Parameter, wie das Quergefälle der Fahrbahn, gelten für alle Profile. Wie in Abb. 5.1 eingesehen werden kann, ist zur Sicherstellung einer funktionierenden Regenwasserableitung ein Mindestquergefälle von 3 Prozent vorzusehen.¹²⁷

Tab. 5.1: Zu verwendendes Tunnelprofil in Abhängigkeit der vorgegebenen Bemessungsklasse (Quelle: Vegdirektoratet [48], S. 18)

Bemessungsklasse	KFZ/24h	max. Geschwindigkeit	Tunnelprofil
H1	< 12.000	60 km/h	T9,5
H2	< 4.000	90 km/h	T9,5
H3	< 6.000	80 km/h	T9,5
H4	4.000 - 6.000	80 km/h	T10,5
H5	6.000 - 12.000	90 km/h	T12,5
H6	> 12.000	60 km/h	2x T9,5
H7	> 12.000	80 km/h	2x T9,5
Autobahn	> 12.000	110 km/h	2x T10,5

Zufolge der, in Kap. 5.2 beschriebenen, geologischen günstigen Baugrundverhältnisse, hat die Innenschale im Regelfall keine statische Funktion zu erfüllen. Zumeist wird die Abdichtung mittels Gewindestangen abgehängt und anschließend mit Spritzbeton oder Fertigteilen versiegelt.

¹²⁷Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 18 f.

Tab. 5.2: Anwendungsgrenzen der unterschiedlichen Innenschalen- bzw. Frostschutzvarianten (Quelle: Vegdirektoratet [48], S. 18)

Wasser-/Frostschutz	Frostmenge	< 6.000 KFZ/24h	> 6.000 KFZ/24h	Dämmung
SpC-Gewölbe	< 8.000 h°C	X		-
SpC-Gewölbe	> 8.000 h°C	X		PE-Platten
Betonelementgewölbe	< 8.000 h°C		X	-
Betonelementgewölbe	> 8.000 h°C		X	XPS-Platten
Frostringgewölbe	für alle		X	-
Frostringportal	für alle	X	X	-

In diesen Fällen wird die Innenschale somit lediglich in das Gebirge gehängt und kann keine Belastungen aufnehmen. Eine Ausnahme bildet das sogenannte kontaktgegossene Wasser- und Frostschutzgewölbe aus Ortbeton. Dieses wird im Folgenden vorgestellt, bevor anschließend die drei weiteren Systeme, die den Großteil aller Projekte abdecken, beschrieben werden. Tab. 5.2 bildet die Entscheidungsgrundlage zur Auswahl der Innenschalenvariante.¹²⁸

Kontaktgegossenes Frost- und Wasserschutzgewölbe Wie in Abb. 5.2 eingesehen werden kann, ähnelt das im norwegischen Regelwerk *Tunnelführung Handbuch V520* [49] eingebettete Ortbetonsystem dem in Mitteleuropa zur Ausführung kommenden. Im Norden Europas wird es vorwiegend für den Einsatz in der mit Salzwasser angereicherten Zone bei Unterwassertunneln empfohlen. Da jegliche Stahlelemente bei dieser Innenschalenvariante versiegelt sind, verfügt dieses System über eine ausgeprägte Korrosionsbeständigkeit. Weiter ergibt sich ein guter Schutz gegen anstehendes Wasser und Frost.¹²⁹

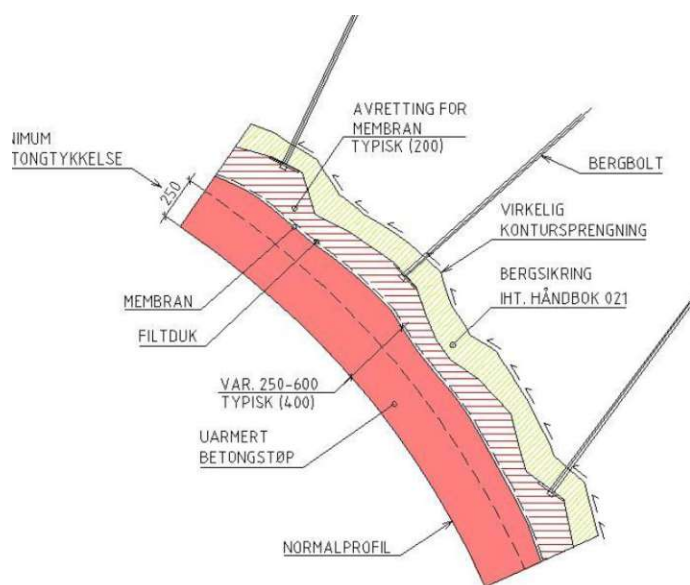


Abb. 5.2: Schematische Darstellung eines Wasser- und Frostschutzgewölbes inklusive Membranabdichtung (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 76)

Im Regelfall kommt allerdings keine Ortbetoninnenschale, sondern eine der im Folgenden beschriebenen Varianten aus Spritzbeton oder Fertigteilen zur Ausführung.

¹²⁸Vgl. [49] Vegdirektoratet, S. 77

¹²⁹Vgl. [49] Vegdirektoratet, S. 76

SpC-Gewölbe mit Leitkante/Wandelement Wie schon zu Beginn dieses Kapitels angeführt, kann aufgrund der ohnehin hohen Standsicherheit der Felsformationen zumeist auf eine massive Stahlbetonkonstruktion verzichtet werden. Daher wird all jenen Tunnelbauwerken, durch die gemäß der im Zuge der Planung festzuliegenden Projektierungsverkehrsstärke weniger als 6.000 KFZ/24h fahren werden, ein Spritzbetongewölbe verbaut.¹³⁰

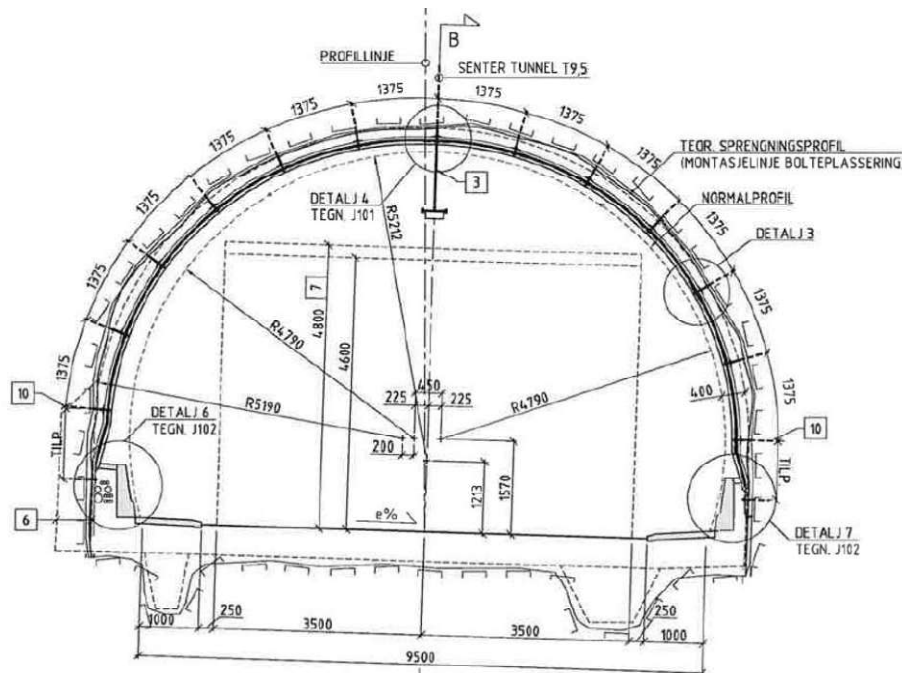


Abb. 5.3: Skizzenhafte Darstellung eines PE-Gewölbes mit einer Spritzbetonschicht und Betonleitkante, Profil T9,5 (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 73)

Wie in Abb. 5.11 eingesehen werden kann, ist die Abdichtung mittels Gewindestangen abgehängt und anschließend fahrbahnseitig durch das Auftragen einer wenige Zentimeter dicken und einlagig bewehrten Spritzbetonhaut versiegelt. Durch die Betonschicht erhöht sich die Biegesteifigkeit und Robustheit der Konstruktion. Der auf die Abdichtungsfolie aufgetragene Spritzbeton muss im Falle einer Stahlfaserverstärkung eine Dicke von 60 mm bzw. ohne Faserverstärkung 80 mm aufweisen. Da im Regelfall eine Lage Baustahlgitter eingelegt wird, ist weiter auf die Einhaltung der Betondeckung zu achten. Der Beton ist mit Polypropylenfasern zu versehen, damit er die brandschutztechnischen Anforderungen erfüllt. In Kap. 5.7 wird diese Thematik ausführlich betrachtet. Um die Decke bzw. das Gewölbe in der Lage zu fixieren, wird dieses über Bolzen im Gebirge verankert. Deren Verankerungslänge hat mindestens 50 cm aufzuweisen und der Ankerraster ist mit 1,2 x 1,2 Metern festgelegt. Bei einer Abweichung muss die Konstruktion separat genehmigt werden.¹³¹

Im Falle eines Anpralls durch ein KFZ an die dünne Konstruktion könnte diese beschädigt werden. Um diesem Umstand entgegenzuwirken, werden fahrbahnseitig Betonfertigteile platziert. Diese werden entweder als Leitkante oder Wandelement ausgeführt und sind schematisch in Abb. 5.1 dargestellt. Falls es im Zuge eines Aufpralls zu Beschädigungen an den Fertigteilen kommt, können diese ohne großen Aufwand ersetzt werden.¹³²

¹³⁰Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 18

¹³¹Vgl. [50] Vegdirektoratet, S. 32 f.

¹³²Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 54

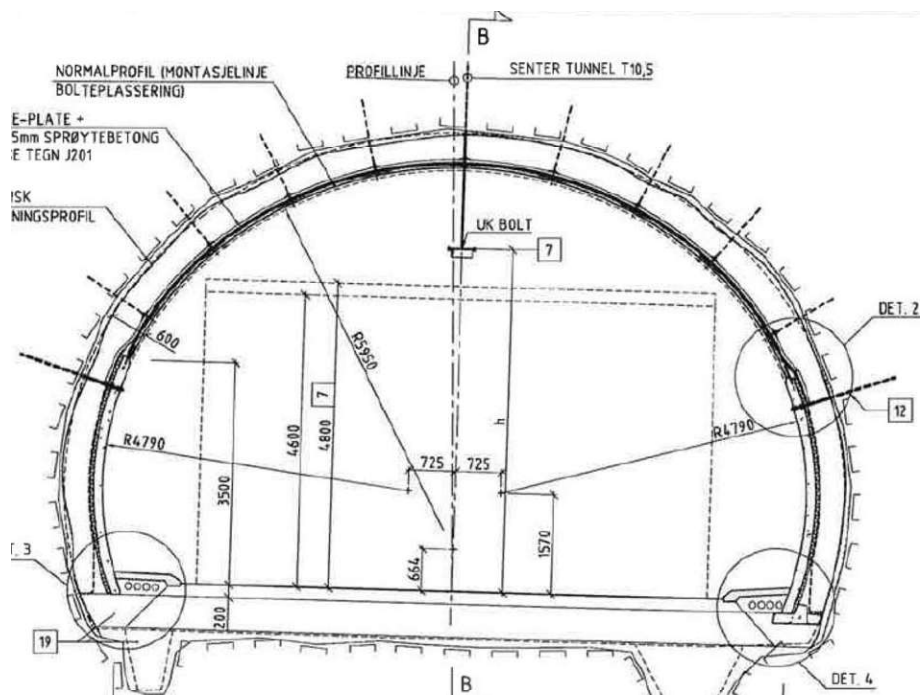


Abb. 5.4: Skizzenhafte Darstellung eines PE-Gewölbes mit Spritzbetonschicht und Wandelementen, Profil T10,5 (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 74)

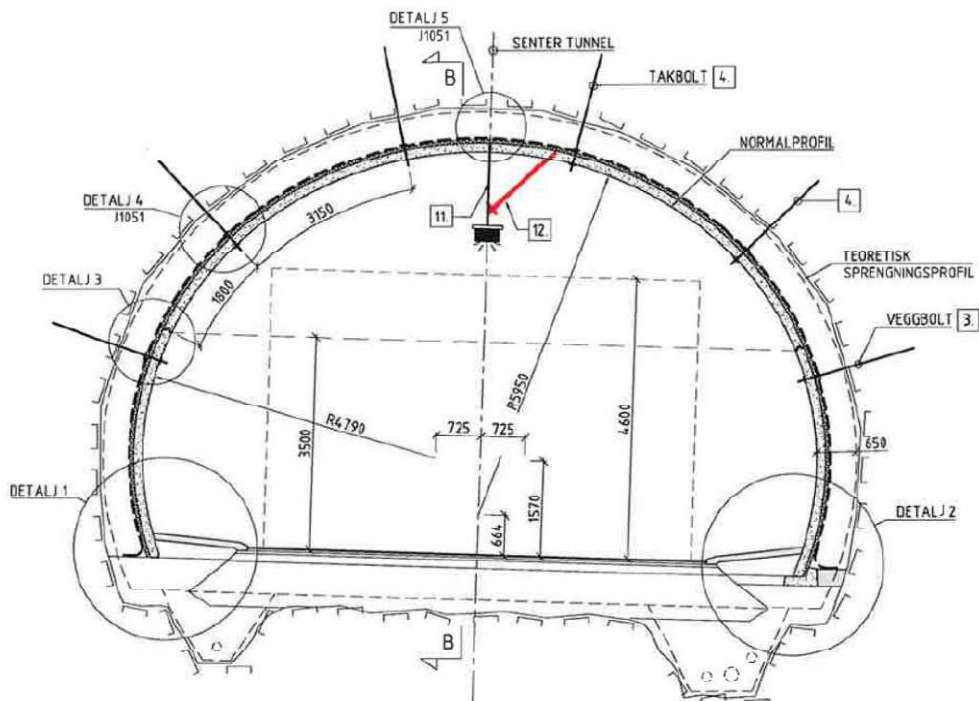


Abb. 5.5: Skizzenhafte Darstellung eines vollkommen mit Fertigteilen verkleideten Gewölbes, Profil T10,5 (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 74)

Die Elementgröße in Längsrichtung ist den Kurvenradien des Tunnels anzupassen. Kommen Wandelemente zum Einsatz, muss deren vertikale Krümmung, sowie all jene der Abdichtung, dem Tunnelprofil entsprechen. Um Beschädigungen an der Membrandecke zu verhindern, müssen die Fertigteile eine Mindesthöhe von 3,5 Meter über der Fahrbahn aufweisen (Siehe Abb. 5.4). Diese Herangehensweise ist der schwedischen Variante am ähnlichsten. Alternativ kann ein Spritzbetongewölbe mit Leitkanten, wiederum mit einer Mindesthöhe von 0,9 Metern, verbaut werden. In Abb. 5.8 kann die spezielle Abdichtungsführung im Bereich der Leitkante eingesehen werden.¹³³

Betonelementgewölbe Die in Abb. 5.5 abgebildete Ausführungsmöglichkeit stellt das sogenannte Betonelementgewölbe dar. Bei dieser entfällt der hohlraumseitig der Abdichtung aufzubringende Spritzbeton – die Tragfähigkeit der Ankerung ist folglich unter anderem auf das Gewicht der Fertigteile zu dimensionieren. Die massivere Konstruktion erlaubt allerdings größere Montagen direkt an den Elementen. Aufwändige Durchdringungen der Abdichtungsbahnen zur Befestigung der Beleuchtung, der Straßenschilder etc. entfallen damit.¹³⁴

5.5 Tunnelabdichtung und Entwässerung



Abb. 5.6: PE-Platten, die unter der Berücksichtigung der vorzusehenden Überlappungsbereiche für die spätere Doppelnahschweißung an den PE-Abdichtungsbahnen befestigt werden (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 80)

Gemäß dem *Straßentunnel Handbuch N500* [48] ist in Tunnelbauwerken ein adäquater Wasser- und Frostschutz vorzusehen. In den Querschnitt eintretende Bergwässer sind durch, dem Vortrieb vorausende, Injektionen in ihrem Ausmaß zu verringern, außerhalb des Fahrtraums über ein Abdichtungsschild abzuleiten, zu fassen und geregelt über das Drainagesystem aus dem Bauwerk zu führen. Das Drainage- sowie das grundsätzliche Abdichtungssystem, das über den Einsatz von

¹³³Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 48

¹³⁴Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 47

PE- oder PP-Bahnen verwirklicht wird, ist analog zu dem in Kap. 4.4 angeführten und wird daher nicht erneut vorgestellt. Im Folgenden wird lediglich auf die verschiedenen Ausführungsvarianten, in Abhängigkeit der jeweiligen Frosteinwirkungen, eingegangen.¹³⁵

Ab einer Frostmenge von 8.000 h°C ist der Einbau isolierender Schichten zur Verhinderung der Eiszapfen- bzw. Glatteisbildung durchzuführen (Siehe Tab. 5.2). Zumeist kommen Spritzbetongewölbe oder -decken zum Einsatz. In diesem Fall stellen PE-Schaumplatten das ideale Frostschutzmaterial dar – diese können in Abb. 5.6 eingesehen werden. Bei nicht allzu hohen Frostmengen erfüllen sie sowohl die Frostschutz- als auch die Dichtheitsanforderungen. Durch das fahrraumseitige Aufbringen der Spritzbetonschicht werden diese feuerfest gemacht. Kommen hingegen Betonelementgewölbe zum Einsatz, werden Platten aus extrudiertem Polystyrol in Kombination mit einer abdichtenden Polypropylenmembran verbaut.¹³⁶

Die lokale Frostmenge, die statistisch gesehen einmal in 10 Jahren auftritt, stellt den Eingangssparamerter für die Frostschutzbemessung dar. Auf deren Grundlage ergibt sich der einzuhaltende Wärmedurchgangskoeffizient. In Tab. 5.2 kann eingesehen werden, welche Konstruktionsvarianten für die am Standort des zu errichtenden Bauwerks festgelegte Frostmenge in Frage kommen. Die unterschiedlichen Varianten wurden im Kap. 5.4 vorgestellt.¹³⁷

Betrachtet man die letzte Zeile der Tabelle wird klar, dass den Portalbereichen besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist. Aufgrund der hohen Frostgefahr in Portalnähe werden sie im Regelfall als kontaktgegossene Wasser- und Frostringewölbe mit einer Membran ausgeführt. Diese Ausführungsvariante ist in Abb. 5.7 dargestellt.¹³⁸

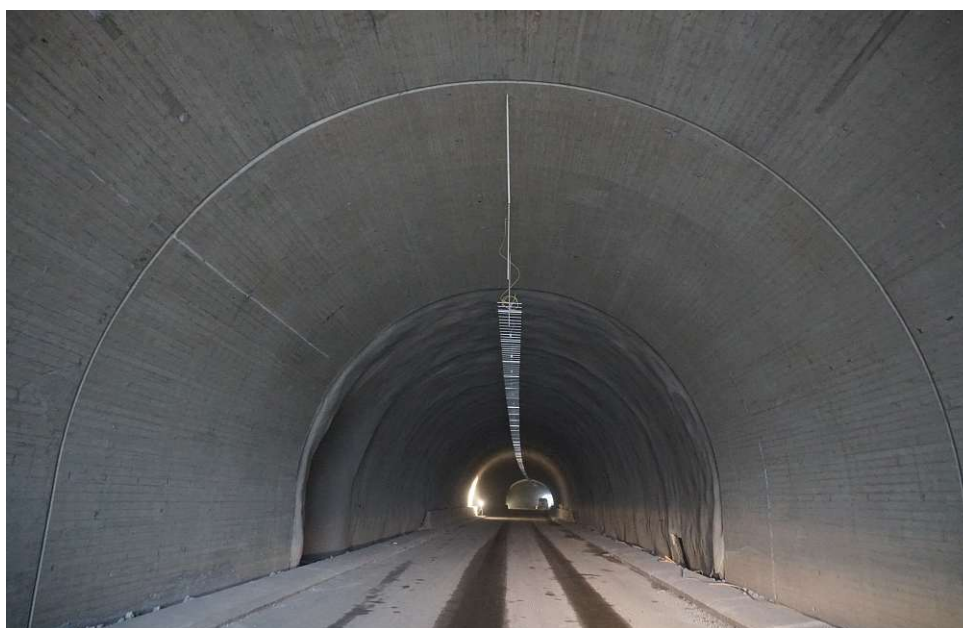


Abb. 5.7: Kontaktgeformtes Frostringewölbe im Portalbereich eines norwegischen Tunnels (Quelle: Mag. Ing. Stegic Jurica)

¹³⁵ Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 43

¹³⁶ Vgl. [49] Vegdirektoratet, S. 75

¹³⁷ Vgl. [50] Vegdirektoratet, S. 13 ff.

¹³⁸ Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 16

5.6 Elektrische Einrichtungen, Einbauten

Aufgrund der unterschiedlichen Ausbildungen der Seitenwände ergeben sich verschiedene Räumlichkeiten, in denen die elektrischen Leitungen untergebracht werden können. In Abb. 5.8 kann die Situierung im Falle der Leitkantenbauweise eingesehen werden. Um Beschädigungen an der Abdichtungsstruktur zufolge eines Anpralls zu verhindern, muss die Leitkante von der Abdichtung abgerückt werden. Somit entsteht ein Spalt, der ideal für die Leitungsführung genutzt werden kann.

Werden hingegen Wandelemente eingesetzt, ergibt sich dieser Spalt nicht. Folglich werden die Leitungen im Regelfall unter dem Rangweg verbaut. Diese Variante ist in Abb. 5.4 dargestellt.

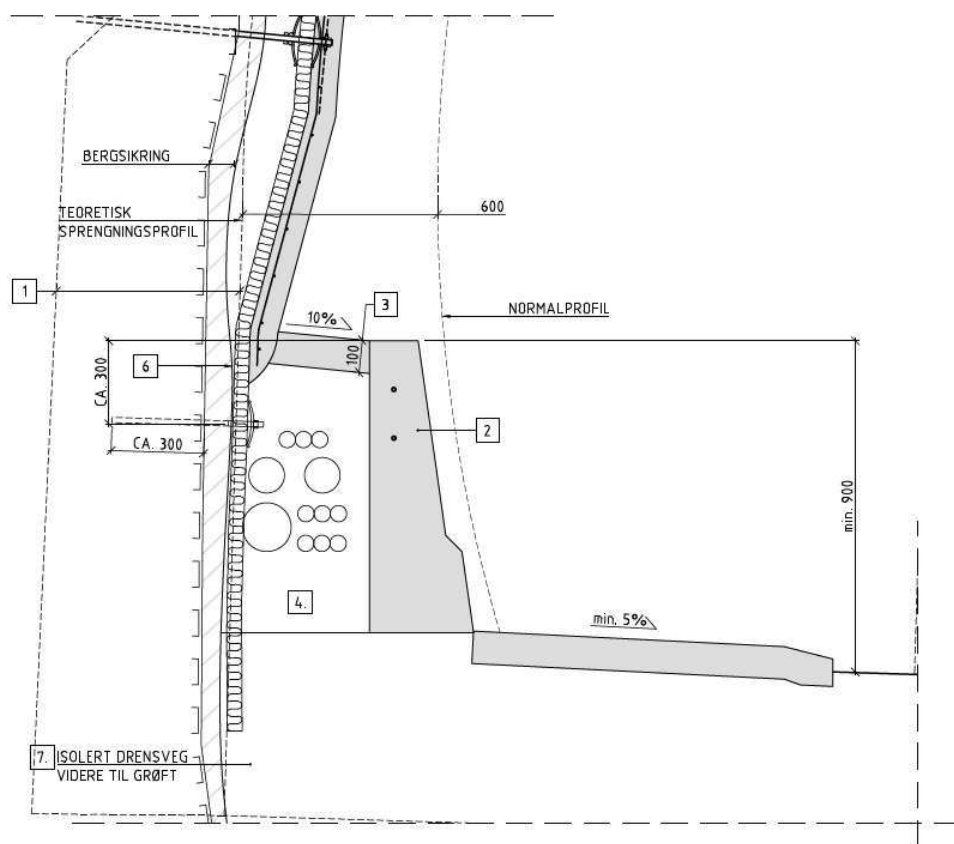


Abb. 5.8: Detailbereich der linken Ulme: Ausführungsvariante mit Betonleitkante und Installationsebene (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 79)

In Abhängigkeit der zur Ausführung kommenden Innenschalenvariante unterscheiden sich auch die Befestigungsmöglichkeiten der Fahrraumbeleuchtung. Im Fall eines Spritzbetongewölbes ist diese direkt ins Gebirge zu verankern (Siehe Abb. 5.3) – kommt ein Betonelementgewölbe zur Ausführung ist dies nicht erforderlich. Kleinere Montagen an den Fertigteilen sind möglich – lediglich massive Bauteile (Lüfter etc.) müssen ins Gebirge verankert werden.¹³⁹

Um den Verkehrsteilnehmern in Notsituationen oder bei technischen Problemen die Alarmierung zu ermöglichen, sind einerseits eine Notstromanlage zur Aufrechterhaltung der wichtigsten Einrichtungen sowie Nischen mit Notruftelefonen vorzusehen. Die Örtlichkeit eben dieser muss schon im Planungsstadium festgelegt werden, denn die Nischen werden im Zuge der Vortriebs-

¹³⁹Vgl. [49] Vegdirektoratet, S. 79

arbeiten mitaufgefahren. Neben den schon zuvor behandelten Leitungen für die elektrischen Einrichtungen sind Löschwasserleitungen vorzusehen. Ein Maximalabstand von 200 Metern zwischen zwei Hydranten ist einzuhalten.¹⁴⁰

5.7 Brandschutz

Zur Abschottung der brennbaren Dämmstoffe bzw. Folien werden diese fahrraumseitig mit Beton versiegelt. Allerdings neigt dieser im Falle extremer Temperatureinwirkungen zu Abplatzungen. Um diesem Umstand entgegenzuwirken ist der Spritzbeton bzw. sind die Betonfertigteile mit Polypropylenfasern zu versehen. Deren Effekt wird in Kap. 3.6 beschrieben.¹⁴¹

Da die Abdichtung eine sehr lange Strecke aus brennbarem Material bildet, muss die Brandausbreitung durch den Einbau von Schotts verhindert werden – in Abb. 5.9 ist eine mögliche Ausführungsvariante dieser Barrieren dargestellt. Zugänge zu Querschlägen, Technikräumen und anderen Fluchtwegen sind ebenfalls abzuschirmen und als separate Brandabschnitte auszuführen.¹⁴²

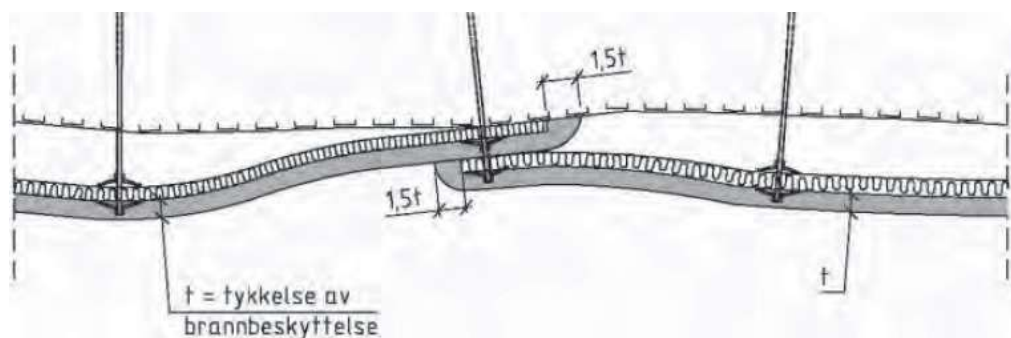


Abb. 5.9: Beispielhafte Ausbildungsvariante eines Dichtschotts zur Verhinderung der Brandausbreitung (Quelle: Vegdirektoratet [50], S. 22)

Im Falle eines Brandes oder anderen Notfällen muss den Verkehrsteilnehmern eine Fluchtmöglichkeit geboten werden. Im Falle zweiröhriger Tunnel sind alle 250 Meter Querschläge zu verbauen. Die Trennwände zu diesen Notwegen haben einen Feuerwiderstand von mindestens REI 120 aufzuweisen. Kommt lediglich eine Röhre zur Ausführung, sind extra auszubrechende Fluchtunnel oder Notfallräumlichkeiten in Betracht zu ziehen. Weiter ist das Lüftungssystem umkehrbar und ausreichend groß zu dimensionieren, damit der Brandrauch aus dem Tunnel transportiert und den Flüchtenden dadurch eine bestmögliche Sicht geboten wird.¹⁴³

Durch die spezielle Situierung der Kabel hinter der Leitkante oder unter den Randwegen werden diese vom Fahrraum getrennt. Dadurch wird einerseits die Brandgefahr gesenkt, andererseits können Schäden durch Kollision und das Eindringen von Wässern verhindert werden. Damit es im Falle etwaiger Leckagen nicht sofort zu Ausfällen der elektrischen Geräte kommt, müssen diese zumindest die Schutzart IP65 aufweisen. Diese Schutzart bezeichnet die sogenannte *ingress protection*, also die Widerstandsfähigkeit gegen das Eindringen etwaiger Fremdkörper von außen. Die Klassifizierung wurde seitens der Internationalen Elektrotechnischen Kommission festgelegt

¹⁴⁰Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 30

¹⁴¹Vgl. [50] Vegdirektoratet, S. 23

¹⁴²Vgl. [49] Vegdirektoratet, S. 37

¹⁴³Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 23

und bedeutet im konkreten Fall, dass die Geräte staubdicht und spritzwasserfest auszuführen sind.¹⁴⁴

5.8 Dauerhaftigkeit und Instandhaltung

Der Bau von Tunnelbauwerken nimmt großen Aufwand in Anspruch – damit sich dieser lohnt, ist eine gewisse Nutzungsdauer sicherzustellen. Für die einzelnen Bauteile ist der Einsatzzeitraum in Norwegen wie folgt festgelegt:¹⁴⁵

- 100 Jahre für unzugängliche und massive Bauteile (Entwässerungssystem, Betonfertigteile, etc.)
- 50 Jahre für das Abdichtungssystem sowie die technische Infrastruktur
- 25 Jahre für die technischen Anlagen



Abb. 5.10: Speziell für die Herstellung kurzer Ankerbohrungen konzipiertes Hochleistungsgerät (Quelle: Mag. Ing. Stegic Jurica)

Um die Dauerhaftigkeit des Abdichtungskomplexes sicherzustellen, sind einige Vorkehrungen zu treffen. All die, für die Aufhängung über die Gewindestangen erforderlichen, Durchdringungen der Dichtungsbahnen müssen wasserdicht sein. Um dies sicherzustellen, werden Dichtheitsprüfungen an eben diesen durchgeführt. Im Zuge dieser wird lokal ein Wasserdruck von 0,1 bar über einen Zeitraum von 24 Stunden aufgebracht. Die Gewindestangen müssen aus nichtrostendem oder korrosionsgeschütztem Stahl bestehen. Dieser Korrosionsschutz kann durch eine Feuerverzinkung oder Pulverbeschichtung verwirklicht werden. Bei Unterwassertunneln in der Salzwasserzone ist eine Verzinkung mit anschließender Epoxidharzbeschichtung erforderlich. Sollte es im Zuge des

¹⁴⁴Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 59

¹⁴⁵Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 9

Einbaus zu Beschädigungen an der Beschichtung kommen, ist diese erneut herzustellen bzw. die betroffenen Bauteile auszutauschen.¹⁴⁶

Um aufwändige Sanierungen zu verhindern, werden in regelmäßigen Abständen visuelle Kontrollen und kleinere Wartungsarbeiten durchgeführt. Zusätzlich ist der Tunnel Reinigungen zu unterziehen. Um Schäden im Zuge der Arbeiten mit Hochdruckreinigern zu verhindern, müssen alle Bauteile beständig gegenüber den entstehenden Belastungen sein. Um die zeitliche Entwicklung etwaiger Schadensbilder verfolgen zu können, sind auftretende Verfärbungen der Oberflächen, Leckagestellen, Risse, Sprünge, Abplatzungen, welche im Zuge der optischen Kontrollen erkannt werden, zu dokumentieren.¹⁴⁷

5.9 Bauablauf

Da der Bauablauf annähernd ident zu jenem des schwedischen Systems ist und dieser in Kap. 4.9 ausführlich beschrieben ist, wird dieser im gegenständlichen Kapitel lediglich zusammengefasst.



Abb. 5.11: Innenschalenkonstruktion vor dem Auftrag der fahrbahnseitigen Spritzbetonhaut auf einer Baustelle in Norwegen (Quelle: Mag. Ing. Stegie Jurica)

Im Anschluss an die Vortriebsarbeiten werden zuerst die Löcher für die Aufhängung des Abdichtungsschirmes abgebohrt. Das in Abb. 5.10 dargestellte Bohrgerät, wurde speziell für diese Aufgaben entwickelt und laufend optimiert – somit kann ein möglichst rascher Baufortschritt verwirklicht werden. In weiterer Folge werden die Gewindestangen eingebracht und unter Zuhilfenahme eines Abdichtungswagens die PE-Folie angebracht. Nach Abschluss dieser Arbeiten sieht das Bauwerk wie in Abb. 5.11 aus.

¹⁴⁶Vgl. [48] Vegdirektoratet, S. 46

¹⁴⁷Vgl. [50] Vegdirektoratet, S. 25

In Abhängigkeit der Ausführungsvariante folgt entweder der Einbau des Fertigteil-element- oder des Spritzbetongewölbes. Anschließend werden die Leitungen sowie die Randwege und Wandelemente bzw. Leitkanten montiert. Vor der Inbetriebnahme erfolgen die letzten Installationen (Beleuchtung, Fluchtwegbeschilderung, Straßenschilder etc.), Markierungen sowie der finale Bodenaufbau. Ein Tunnel, in dem ein Spritzbetongewölbe mit Leitkante verbaut wurde, kann in Abb. 5.12 eingesehen werden.



Abb. 5.12: Spritzbetongewölbe mit Leitkante nach Fertigstellung (Quelle: Mausol [24])

5.10 Zusammenfassung der norwegischen Innenschalensysteme

Zur Versiegelung des vorwiegend standfesten Gebirges in Norwegen ist eine dünne Faserspritzbetonaußenschale ausreichend. Ankerungen zur Sicherung einzelner Blöcke werden nur bei Erfordernis eingebaut. Eine massive Innenschale ist zufolge der Tunnelstatik nicht nötig. Der Innenausbau hat somit nur den Brandschutz sowie die Abdichtung gegen Frost und Wasser betreffende Funktionen.

In Abhängigkeit der Verkehrsstärke und der lokalen Frostmenge kommen unterschiedliche Ausführungsvarianten zum Einsatz. Im Falle großer Frosteinwirkungen und im Portalbereich sind kontaktgegossene Frost- und Wasserschutzgewölbe zu verbauen. In hochfrequentierten Straßentunneln werden Betonelementgewölbe mit einer bergseitig montierten Abdichtung abgehängt. Bei Erfordernis ist eine zusätzliche Dämmung vorzusehen. In Bauwerken, in denen eine geringe Verkehrsstärke erwartet wird, kommt eine mit Spritzbeton versiegelte Abdichtung mit etwaiger Dämmung zum Einsatz. In Tab. 5.2 kann eine übersichtliche Matrix eingesehen werden, die die Entscheidungsgrundlage für die zu verbauende Innenschalenvariante darstellt.

Kapitel 6

Vergleich und Anwendbarkeit der Ausbauvarianten

In diesem Kapitel werden die ausführlich beschriebenen Innenschalenvarianten verglichen. Um ebendiesen möglichst übersichtlich zu gestalten, kommt es zuerst zu einer Erläuterung der verschiedenen Herangehensweisen, wobei jeweils auf bestimmte Teilaspekte eingegangen wird. Anschließend werden eben diese gegenübergestellt. Im Zuge dessen werden etwaige Ersparnisse oder erforderliche Mehraufwände einzelner Varianten aufgezeigt.

Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Betrachtung der Anwendbarkeit der skandinavischen Systeme in Österreich. Diese umfasst sowohl geologische als auch technische und wirtschaftliche Aspekte, die zuerst im Zuge des Vergleichs aufgezeigt worden sind. Den Abschluss dieses Abschnitts bilden normative Hindernisse, die die Ausführung der skandinavischen Innenschalensysteme in Österreich erschweren.

6.1 Aspektspezifische Erläuterung der Innenschalenvarianten

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Anforderungen und Lösungsansätze für verschiedene Aspekte angeführt. Zuerst werden all jene Punkte betrachtet, die vorwiegend die Vortriebsarbeiten betreffen. Allerdings ist hierbei eine klare Trennung nicht möglich. Die durchzuführenden Maßnahmen im Zuge der Vortriebsarbeiten hängen stark von der anschließend verbauten Innenschale ab.

Im Anschluss werden Abdichtung, Dauerhaftigkeit, Brandschutz, Einbauten, etc. behandelt. Im Zuge dieses Kapitels ist eine strikte Trennung nach Bauweise oder Ländern oft nicht sinnvoll – die behandelten Regionen und die zugehörigen Bauweisen werden daher jeweils in den Überschriften betitelt.

6.1.1 Beherrschung der Bergwässer im Zuge der Vortriebsarbeiten

In den Tunnel eintretende Bergwässer erschweren und verlangsamen die Arbeiten. Zusätzlich zu den zu betreibenden Pumpen, Instand zu haltenden Leitungen, etc. können weitere Maßnahmen erforderlich werden, die nicht direkt mit der Wasserhaltung zusammenhängen. Beispielsweise kann es aufgrund der feuchten bzw. nassen Verhältnisse dazu kommen, dass der bei trockenen Verhältnissen funktionsfähige Spritzbeton nicht mehr am Gebirge haftet. Folglich muss eine alternative, zumeist teurere Rezeptur verwendet werden.

Ein weiteres Problem stellen inkompetente und vor allem erosive Gesteinsformationen dar. Aufgrund zu geringer Festigkeiten kann es zur Zerlegung des geologischen Komplexes und folglich zu Instabilitäten der Ortsbrust oder massiven Materialausträgen aus Bohrungen kommen.

Aufgrund all der genannten Gründe wird ein Vortrieb unter möglichst trockenen Verhältnissen angestrebt. Zielführend können einerseits die Durchlässigkeit vermindernde Arbeitsvorgänge

(abdichtende Wirkung), die Festigkeit des Gesamtkomplexes erhöhende Prozesse oder druckentlastende Maßnahmen sein. Im Folgenden werden die Herangehensweisen, die sich in Mitteleuropa und Skandinavien grundlegend unterscheiden, dargestellt.

Mitteleuropa Treten im Zuge der zur Vorauserkundung eingesetzten Bohrung größere Wasserzutritte auf, ergibt sich die Erfordernis zusätzlicher Maßnahmen zur Sicherstellung eines sicheren Vortriebs. Werden diese nicht durchgeführt, können rasch Erosionserscheinungen auftreten. Oftmals kommen 20–30 Meter lange Entlastungsbohrungen zur Anwendung. Große Wasserzutritte aus der Ortsbrust und Laibung werden dadurch verhindert – es kommt zur konzentrierten Ableitung über die vorseilenden Bohrungen. Diese Variante stellt die schnellste und wirtschaftlichste Methode zur Verhinderung nicht beherrschbarer Wasserzutritte im Vortrieb dar. Ist eine Senkung des Wasserspiegels nicht erlaubt oder könnte es zum Beispiel bei innerstädtischen Projekten zu Schäden an Gebäuden kommen, muss auf Alternativlösungen zurückgegriffen werden. In diesem Zusammenhang sind Injektionen, Vereisungen und weitere Verfahren des Spezialtiefbaus anwendbar.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Verhinderung aufwändiger gebirgsverbessernder oder abdichtender Maßnahmen an erster Stelle steht – allerdings ist jede Problemstellung einer ausführlichen Betrachtung zu unterziehen und auf deren Grundlage sind situationsbedingte Entscheidungen zu treffen.

Skandinavien Wie in Kap. 4.2 und Kap. 5.2 beschrieben, trifft man im Norden Europas vorwiegend Hartgestein mit hohen Festigkeiten an. Diese weisen gegenüber weicheren Gebirgsbereichen im Regelfall größere Klüfte auf. Die Öffnungsweite der Klüfte geht gem. Louis [23] allerdings mit dem Quadrat in die Berechnung der Durchlässigkeit ein. Da folglich der skandinavische Baugrund oftmals stark durchlässig ist, würden druckentlastende Fassungen zu weitreichenden Senkungen des Grundwasserspiegels führen. In wasserführenden Bereichen sind aus diesem Grund, dem Vortrieb vorseilende Injektionen mit abdichtender Wirkung vorzusehen.¹⁴⁸

6.1.2 Verwendung und Entsorgung des Ausbruchmaterials

Durch die Vortriebsarbeiten kommt es zum Anfall immenser Kubaturen an Ausbruchmaterial. Die Entsorgung bzw. Deponierung dieser Großmengen bringt hohe Kosten mit sich – eine Wiederverwendung wird daher in den letzten Jahrzehnten immer öfter angestrebt. Im Regelfall wird eine Verwendung als Zuschlag für die Betonherstellung angestrebt. Um dies zu ermöglichen, ist allerdings die Eignung des Materials für eben diese Zwecke zu untersuchen. Bei manchen Projekten kann es weiter für etwaige Verfüllungen und zur Renaturierung genutzt werden.

Mitteleuropa Beispielweise wurde in Österreich die *Richtlinie Verwendung von Tunnelausbruch* [30] zur Vereinheitlichung und klaren Regelung dieser Thematik eingeführt. Soll es zur Nutzung als Zuschlagskörnung kommen, müssen folglich die im Regelwerk beschriebenen Anforderungen erfüllt werden.

Für die Eignung als Zuschlag ist Gestein mit einer unter anderem ausreichenden Festigkeit einzusetzen – diese Forderung stellt in den gestörten Gebirgsbereichen des Alpenlandes eine unüberwindbare Hürde dar. Eine Wiederverwendung ist somit auf Projekte, welche durch gute Geologie führen, begrenzt.

Da es folglich zu kostenintensiven Entsorgungen des Ausbruchmaterials kommt, ist auf eine möglichst geringe anfallende Kubatur zu achten. Der Querschnitt ist somit so klein wie

¹⁴⁸Vgl. [23] Louis

möglich, lediglich so groß wie nötig, auszubrechen. Sollte es zu einem Mehrausbruch kommen, führt dies zu einem weiteren Problem. Bei der in Kap. 3.3 beschriebenen Konstruktion gibt es keinen Spalt zwischen Innen- und Außenschale. Somit ist ein etwaiges Überprofil wieder mit Beton zu verfüllen.

Skandinavien In den meisten Fällen ermöglicht die skandinavische Geologie eine Wiederverwendung des Tunnelausbruchs. Weiter wird die Innenschalenkonstruktion über Gewindestangen abgehängt – es kommt zur Ausbildung eines Spalts zwischen dem Spritz- und Ortbeton. Folglich ist im Zuge der Vortriebsarbeiten lediglich auf die Einhaltung des Mindestprofils zu achten. Ein eventueller Mehrausbruch ist nicht zu verfüllen.

6.1.3 Druckwasserhaltende und statische Aufgaben der Konstruktion

Die Innenschalenkonstruktion hat einige Funktionen. Diese umfassen den Brandschutz, die Abdichtung gegenüber bergseitig zutretenden Wässern etc. Ist es statisch erforderlich, kann sie als tragendes Bauwerk konzipiert werden. Im Falle geringer Bergwasserdrücke ist weiter eine druckwasserhaltende Ausführung möglich. Im Folgenden werden die Anforderungen in den jeweiligen Regionen beschrieben.

Mitteleuropa Die massive Ortbetonkonstruktion übernimmt eine statische Funktion. Um wirtschaftlich zu arbeiten und einen raschen Bauablauf sicherzustellen wird versucht, die Außenschale lediglich in jener Stärke aufzuspritzen, die zur Einhaltung sicherer Verhältnisse während des Bauzustandes notwendig ist. Durch den späteren Einbau der Ortbetoninnenschale wird der Sicherheitsfaktor erhöht. Soll aus Umweltschutz- oder technischen Gründen kein Bergwasser in den Querschnitt zufließen, ist es möglich, eine druckwasserhaltende Innenschale auszuführen – im Regelfall kommt es allerdings zum Einbau einer druckwasserentlasteten Regenschirmabdichtung.

Skandinavien Im Norden Europas hat die Innenschale aufgrund der vorliegenden geologischen Gegebenheiten keine statische Funktion zu erfüllen – sie wird nicht zum Mittragen der Lasten herangezogen. Zur Erlangung dauerhaft sicherer Verhältnisse sind eine dünne Außenschale und bei Erfordernis Ankerungen vorzusehen. Lediglich im Falle eines kontaktgegossenen Wasser- und Frostschtzgewölbes wäre eine Kraftübertragung möglich.

Die Ausführung einer Rundumabdichtung zur Verwirklichung einer druckwasserhaltenden Variante wird nicht angestrebt. Weiter würde die dünne fahrtraumseitige situierte Betonschicht die einwirkenden Kräfte ohnehin nicht aufnehmen können. Um den Eingriff auf die Grundwassersituation so gering wie möglich zu gestalten, werden vorauseilende Injektionen zur Abdichtung des Baugrunds durchgeführt.

6.1.4 Positionierung und Montage der Abdichtung

Um einen sicheren Betrieb zu ermöglichen, sind Bergwasserzutritte in den Fahrraum zu vermeiden. Dafür werden abdichtende Folienbahnen außerhalb der Innenschalenkonstruktion verbaut. Die je nach Konstruktionsvariante variierende Positionierung und Montage der Folie wird im Folgenden erläutert.

Mitteleuropa Aufgrund der oftmaligen statischen Erfordernis der Innenschale muss diese direkt an die Außenschale angrenzen. Dazwischen sind die Abdichtungsbahnen sowie eine geotextile Schutzschicht situiert. Letztere verhindert eine unerwünschte Verzahnung, die zu Zerstörungen der KDB führen könnte. Weiter würden diese Schichten den lokalen Überbelastungen

in Bereichen von Ankerköpfen oder Unebenheiten in der Spritzbetonaußenschale nicht standhalten. Aus diesem Grund bildet der Auftrag des sogenannten Abdichtungsträgers den ersten Schritt der Innenschalenarbeiten. Im Zuge dieser werden die Ankerköpfe eingespritzt und die, in der *Richtlinie Tunnelabdichtung* [29] geforderte, Ebenheit hergestellt.

Anschließend kommt es mittels Rondellen zur Befestigung der geotextilen Schutzschicht in der Außenschale. Diese schalenförmigen Befestigungshilfen ermöglichen die anschließende Montage der Abdichtungsbahnen, ohne dass ebendiese durchdrungen werden muss. Dadurch wird das Risiko von Leckagen minimiert.

Schweden, Norwegen – Abgehängtes Spritzbetongewölbe mit Leitkante oder Wandelement

Da die Innenschale zumeist keine statische Funktion erfüllen muss, wird auf einen direkten Verbund zur Außenschale verzichtet. Folglich wird im Zuge der Vortriebsarbeiten mit großen Abschlagslängen und der Möglichkeit der Wiederverwendung des Ausbruchmaterials dem profilgetreuen Auffahren des Querschnitts wenig Aufmerksamkeit geschenkt.

Die Abdichtung wird gemeinsam mit der hohlraumseitig aufgetragenen Spritzbetonversiegelung durch eine Vielzahl an, im Gebirge einzementierter, Gewindestangen in der gewünschten Position gehalten. Es handelt sich um eine abgehängte Ausführungsvariante. Die aufgrund der Ungenauigkeiten des Ausbruchsprofils stark variierende Distanz zwischen der Abdichtung und der Außenschale bringt allerdings keine besonderen Probleme mit sich. Lediglich die Ausführung von Abschottungen zur Verkleinerung der Brandabschnitte ist vorzunehmen.

Aufgrund der abgehängten Innenschale sind viele Durchdringungen der Abdichtungsbahnen unumgänglich. Weiter sind schwere Einrichtungen wie Lüfter, Straßenschilder etc. im Gebirge zu verankern. Diesen Problembereichen ist sowohl im Zuge der Ausführung als auch bei der späteren Inspektion gesonderte Aufmerksamkeit zu schenken.

Norwegen – Abgehängtes Betonelementgewölbe Die Abdichtung wird analog zur Variante mit Spritzbeton als abgehängte Konstruktion ausgeführt – die schweren Fertigteile sind mittels Anker im Gebirge zu befestigen. Die Durchdringungen der PP-Folienbahnen haben demnach, gegenüber all jenen die bei Spritzbetongewölben notwendig sind, mit marginal größerem Durchmesser auszufallen. Die massiven Fertigteile bieten allerdings die Möglichkeit von Montagen direkt in der Innenschalenkonstruktion und verringern somit das Ausmaß der großflächigen Durchdringungen.

6.1.5 Dauerhaftigkeit und Robustheit

Die Errichtung von Tunnelbauwerken ist zumeist mit großem Aufwand verbunden. Damit sich die hohen Investitionen lohnen, ist eine möglichst lange Nutzungsdauer anzustreben. Während elektronische Einrichtungen nach einigen Jahren ohnehin überholt sind und erneuert werden sollten, müssen nicht austauschbare Betonbauteile sowie unzugängliche Bestandteile der Gesamtkonstruktion eine Lebensdauer von zumindest 100 Jahren aufweisen.

Mitteleuropa Aufgrund der hochkomplexen geologischen Verhältnisse stellen sich die Tunnelbauwerke in der Alpenregion oftmals als sehr kostintensiv heraus. Aus diesem Grund wird in vielen Fällen eine Lebensdauer von bis zu 150 Jahren angestrebt. Um dies zu ermöglichen ist während der Errichtung größte Sorgfalt geboten. Zur Verhinderung bzw. bestmöglichen Eindämmung von Korrosionsvorgängen ist die geforderte Betondeckung einzuhalten und laufend zu kontrollieren.

Um die Funktionstüchtigkeit der Entwässerung aufrecht zu erhalten, sind einerseits Spülungen durchzuführen, andererseits sind Maßnahmen zu setzen, um Versinterungen bestmöglich entgegenzuwirken. Hierbei wird oftmals auf den Einsatz von Härtestabilisatoren zurückgegriffen.

Skandinavien Da die Innenschalenkonstruktion weniger massiv ausfällt und großteils ausgetauscht werden kann, ist gemäß den Regelwerken eine Lebensdauer von 50 Jahren einzuhalten. Lediglich die unzugänglichen Teile des Entwässerungssystems und massive Betonbauten sind auf eine Lebensdauer von 100 Jahren zu dimensionieren.

Die Innenschale ist mittels Gewindestangen im Gebirge verankert. Aufgrund des bergseitig der Abdichtung freigelassenen Spalts, durch den die Stangen führen, sind Maßnahmen zur Verhinderung etwaiger Korrosionserscheinungen an den Stahlbauteilen zu setzen. Dies kann durch den Auftrag von Beschichtungen und durch den Einsatz von nichtrostendem Stahl erreicht werden.

In diesem Zusammenhang ist die Flexibilität der Fertigteilkonstruktionen zu nennen. Kommt es zu Rostbildungen an den Fertigteilen können diese rasch ersetzt werden. Da im Zuge der Außenschale zumeist Faserspritzbeton eingesetzt wird, kann es zu keinen, die Betondeckung betreffenden, Problemstellungen kommen. Lediglich bei der Ausführung eines Spritzbetongewölbes, ist auf die hohlraumseitige Betondeckung zur Verhinderung der Korrosion zu achten. Diese ist im Regelfall aufgrund des geforderten Brandschutzes ohnehin nicht maßgebend.

6.1.6 Brandschutz und Verkehrsunfälle

Brände in Tunnelbauwerken führen oftmals zu enormen Wärmeentwicklungen. Mit diesen gehen große Temperaturspannungen in den Betonbauteilen einher. Aus diesem Grund kann es zu Abplatzungen kommen, die zur Verminderung der Betondeckung führen. Nimmt die Temperatureinwirkung nicht ab, erhitzt sich der freigelegte Beton erneut, es kommt zu erneuten Abplatzungen. Um dieses Phänomen zu verhindern werden dem Frischbeton Polypropylenfasern beigemischt. Durch den Brand schmelzen diese und es kommt zur Klumpenbildung – diese leichte Verklebung reicht aus, um Abplatzungen einzudämmen. Würden diese nicht eingesetzt werden, könnte es weiter zur Freilegung der Bewehrung kommen. Sowohl die Bewehrungsfreilegung als auch die Abnahme der Betondeckung führen zu Korrosionserscheinungen und ebendiese verschlechtern in weiterer Folge die Dauerhaftigkeit des Gesamtbauwerks.¹⁴⁹

Kommt es im Zuge eines Verkehrsunfalls zu einem Anprall eines Fahrzeuges an die Ortbeton- oder Spritzbetonschale, können unter anderem Bauwerksschäden auftreten. Folglich ist eine Instandsetzung durchzuführen. Im Folgenden werden die verschiedenen Lösungsansätze, die in den jeweiligen Regionen zur Ausführung kommen, angeführt.

Mitteleuropa Kommt es zu einer Beeinträchtigung der Betonkonstruktion, hat eine Untersuchung der Resttragfähigkeit zu erfolgen. Diese beinhaltet eine Wiederholung der Tragfähigkeitsbemessung im Brandfall und zusätzlich sind zumeist experimentelle Untersuchungen notwendig. Ist eine Sanierung notwendig, muss diese gemäß der in *Richtlinie Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen* [36] festgelegten Vorgehensweise behoben werden.

Um etwaige Abplatzungen und dadurch folgende Eingriffe in die Gesamtstruktur zu verhindern, wurde die Faserbetonklasse BBG eingeführt – diese ist in der *Richtlinie Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton* [26] verankert

¹⁴⁹Vgl. [28] ÖBV, S. 23

und wird in Kap. 3.6 ausführlich vorgestellt. Zur Sicherstellung der Eignung der Rezeptur ist ein standartisierter Brandversuch durchzuführen.¹⁵⁰

Schweden Aufgrund des Spaltes zwischen der Außenschale und der Abdichtungsschicht ergeben sich besondere Anforderungen an den Brandschutz. Um die Brandausbreitung in diesem Korridor einzudämmen, sind Brandschotts zu verbauen.

Eine zentrale Aufgabe der fahrtraumseitig situierten Spritzbetonschicht ist der Schutz der Abdichtungsbahnen. Da diese nicht feuerfest sind, könnten etwaige Leckagen nicht ausgeschlossen werden. Zur Sicherstellung der Beständigkeit gegenüber der extremen Temperatureinwirkungen wird dieser mit PP-Fasern versehen.

Da bei der im Kap. 4 beschriebenen Bauweise Fertigteilwände zur seitlichen Begrenzung des Fahrbereichs eingesetzt werden, kann es bei Verkehrsunfällen zu einem direkten Anprall an eben diese kommen. Um diese im Falle einer Beschädigung einfach austauschen zu können, wird auf einen kraftschlüssigen Verbund verzichtet. Die Elemente werden entweder auf Fundamente gestellt oder mittels Anker am Gebirge aufgehängt. Somit müssen lediglich die Befestigungen gelöst, das beschädigte Element entfernt und das neue Fertigteil befestigt werden.

Norwegen Die Brandbeständigkeit wird analog zu den anderen Ländern durch die Zugabe der PP-Fasern erlangt. Aufgrund der verschiedenen Innenschalensysteme, die in Norwegen zur Ausführung kommen, ergeben sich bei Beschädigung der, den Fahrraum begrenzenden, Fertigteile ebenfalls unterschiedliche Herangehensweisen.

Beim kontaktgegossenen Wasser- und Frostschtzgewölbe ergibt sich die analoge Problematik wie bei der in Mitteleuropa zur Ausführung kommenden Innenschalenvariante. Ein simpler Tausch etwaiger Fertigteile ist nicht möglich, daher sind Sanierungen unumgänglich.

Bei Tunneln mit Elementgewölbe ist im Falle etwaiger Sanierungen bzw. einem Austausch besonders darauf zu achten, dass es zu keinen Schäden an den umliegenden Fertigteilen kommt. Aufgrund der speziellen Herangehensweise ergibt sich eine gewisse Verspannung des Gewölbes, die den Austausch erschwert.

Werden Leitkanten oder Wandelemente in Kombination mit einem Spritzbetongewölbe verbaut, sind die selben Schritte wie beim schwedischen System zu setzen. Beide Elementtypen werden innerhalb des Gewölbes platziert und verhindern somit etwaige Beschädigungen des Gewölbes.

6.1.7 Einbauten und elektrische Einrichtungen

In Abhängigkeit der Innenschalenvariante ändern sich die Möglichkeiten zur Situierung der Kabelführungen. Wird eine massive Betonschale ausgeführt, können schwere Einbauten direkt im Beton befestigt werden. Andernfalls ist eine Verankerung im Gebirge vorzunehmen. Weiter werden in diesem Kapitel die bauweisenspezifische Bewetterung sowie eventuelle Möglichkeiten einer Brandrauchabsaugung behandelt.

Mitteleuropa In mitteleuropäischen Tunneln wird ab einer Bauwerkslänge von mehreren hundert Metern oftmals eine Zwischendecke vorgesehen. Diese besteht zumeist aus Fertigteilen, die auf Konsolen im Gewölbebeton aufgelagert werden. In der Zwischendecke ergibt sich Raum für Kabelführungen und elektrische Installationen. Weiter wird in eben diese oftmals eine Trennwand eingezogen. Durch die Trennung in zwei separate Zonen ergeben sich ideale

¹⁵⁰Vgl. [26] ÖBV, S. 14 f.

Gegebenheiten für die Tunnelbe- und Entlüftung. Im Brandfall kann eine Absaugung der schädlichen Gase von Statten gehen.

Straßenschilder, Leuchtmittel etc. können direkt in der Betonkonstruktion verankert werden. Verankerungen im Gebirge sind nicht erforderlich.

Die Zwischendecke wird ausreichend massiv dimensioniert, sodass deren Begehbarkeit sichergestellt werden kann. Sollte sich im Zuge der Inspektionen heraus stellen, dass Instandhaltungsmaßnahmen durchzuführen sind, können diese zumeist während dem laufenden Betrieb durchgeführt werden.

Schweden Die elektrischen Leitungen werden im Kabelkollektor untergebracht. Dieser ist im Randweg unter dem Instandhaltungskorridor miteinbetoniert. Um Inspektionen und Arbeiten zu ermöglichen, werden begehbare Schächte vorgesehen.

Sollten im Betriebszustand weitere Leitungsführungen erforderlich werden, sind diese im Instandhaltungskorridor zu situieren. Allerdings ist zu beachten, dass diese an der Seite der Fertigteilelemente platziert werden, um in weiterer Folge die Zugänglichkeit zu den, in einem Abstand von 25 Meter eingebauten, Instandhaltungsfenstern nicht zu beeinträchtigen.

Montagen kleinerer Geräte bis zu einem Gewicht von 15 kg (z.B. Videokameras) dürfen in der SpC-Schale erfolgen. Jegliche größere Montagen sind direkt im Gebirge zu befestigen. In diesen Fällen werden vor Ort Blöcke betoniert, die über Anker ins Gebirge gehängt sind. An eben diesen können in weiterer Folge die Montagen der Einbauten erfolgen.

Norwegen Kommt ein Spritzbetongewölbe mit Leitkante zur Ausführung, können die Leitungen zwischen den Fertigteilen und dem Abdichtungskomplex verlegt werden. Kommen Fertigteilwände zum Einsatz, ist die Kabelführung unter den Straßenschultern zu verlegen. Um die Zugänglichkeit aufrecht zu erhalten, sind Schächte zu platzieren.

Im Bezug auf Montagen ergibt sich bei Spritzbetongewölben die gleiche Problematik wie bei dem zuvor beschriebenen schwedischen System. Bei der Variante mit Betonelementfertigteilen können die Montagen hingegen in der Innenschalen erfolgen – eine Verankerung im Gebirge ist nur in Ausnahmefällen erforderlich.

6.1.8 Profilveränderlichkeit

Bei Querschlägen, Nischen, Abfahrten etc. kommt es zu Abweichungen vom Regelquerschnitt der Streckenröhre. In Abhängigkeit der Bauweise bringen diese Abschnitte einen unterschiedlich großen Mehraufwand in der Herstellung mit sich. In diesem Abschnitt wird ebendieser variantenspezifisch beleuchtet.

Ortbetoninnenschale Um einen rasanten Baufortschritt zu ermöglichen wird mit fahrbaren Schalungen, sogenannten Schalwagen, gearbeitet. Diese werden für das Regelprofil konzipiert. Folglich sind in Bereichen von Querschlägen sogenannte Stummelschalungen einzusetzen. In diesen Bereichen ist weiter sowohl die Bewehrung des Gewölbes als auch die abschließende Betonage sehr herausfordernd.

Ein Wechsel der Fahrstreifenanzahl ist im Falle einer damit einhergehenden Breitenänderung des Bauwerks bei Möglichkeit zu verhindern. Dies würde eine sehr arbeitsaufwändige Verziehung mit sich bringen. Ist zufolge guter geologischer Verhältnisse eine sprunghafte Querschnittsverbreiterung möglich, ist diese zu favorisieren. In diesem Fall ist lediglich eine simple Abschaltung durchzuführen.

Schweden, Norwegen – Spritzbetongewölbe mit Leitkante oder Wandelement Durch den Einsatz einer, mit Spritzbeton versiegelten, abgehängten Innenschalenkonstruktion wird eine einfache Adaptierung möglich. Die Abdichtungsbahnen können nach Erfordernis geformt und montiert werden. Es ist lediglich darauf zu achten, dass es zu keiner bergseitigen Lackenbildung zufolge eines Wasserzutritts durch die Außenschale kommen kann. Aufgrund des anschließend erforderlichen Betonauftrags sind lediglich die geometrischen Vorgaben des Manipulators zu bedenken – dieser Umstand sollte allerdings im Regelfall zu keinerlei Einschränkungen führen.

Norwegen – Betonelementgewölbe Aufgrund der Abhängung der Innenschalenkonstruktion wird gegenüber der Außenschale kein direkter Kontakt hergestellt. Ist ein Querschnittswechsel durchzuführen, kann folglich flexibel reagiert werden. Allerdings ist die Geometrie der Fertigteile an die Abmessungen der Nischen anzupassen – aus diesem Grund ist ein gewisser Planungsvorlauf einzuhalten.

6.1.9 Tabellarische Auflistung

In der anschließend angeführten Tab. 6.1 werden die Ausführungen dieses Abschnitts zusammengefasst. Die aspektsspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze bildet die Grundlage für die nachfolgende direkte Gegenüberstellung.

Tab. 6.1: Aspektsspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze verschiedener Innenschalenvarianten

Innenschalenvariante/Region	Anforderungen/Herangehensweise
<u>Beherrschung der Bergwässer im Zuge der Vortriebsarbeiten</u>	
Mitteleuropa	Konzentrierte Ableitung durch Entlastungsbohrungen, Vorausseilende Injektion, Vereisung
Skandinavien	Vorwiegend vorausseilende Injektionen
<u>Verwendung und Entsorgung des Ausbruchmaterials</u>	
Mitteleuropa	Einführung der <i>Richtlinie Verwendung von Tunnelausbruch</i> [30], Ausbruchsmaterial oftmals nicht zur Wiederverwendung geeignet , Mehrausbruch ist aufgrund der beiden folgenden Gründe gering zu halten: Kostenintensive Deponierung des Ausbruchs, Wiederverfüllung mit SpC erforderlich
Skandinavien	Hartes Gestein zumeist zur Wiederverwendung geeignet,

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. 6.1: Aspektspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze verschiedener Innenschalenvarianten (Fortsetzung)

Innenschalenvariante/Region	Anforderungen/Herangehensweise
	Mehrausbruch ist nicht zu verfüllen
<u>Druckwasserhaltende und statische Aufgaben der Innenschale</u>	
Mitteleuropa	Ortbetoninnenschale hat statische Funktion, Möglichst geringe Außenschalenstärke (Gleichgewichtszustand), Erhöhung der Sicherheit durch Einbau der Innenschale, Druckwasserentlastete bzw. druckwasserhaltende Ausführung möglich
Skandinavien	Innenschale hat aufgrund des standfesten Gebirges keine statische Funktion zu übernehmen, Abgehängte Innenschale kann keine statische Funktion übernehmen, Druckwasserentlastete Ausführung möglich, Druckwasserhaltende Ausführung nicht möglich
<u>Positionierung und Montage der Abdichtung</u>	
Ortbetoninnenschale (Mitteleuropa)	Abdichtungsträger ist herzustellen, Geotextile Schutzschicht und Abdichtung werden direkt an der Außenschale befestigt, Durchdringungsfreie Befestigung der Abdichtung
Abgehängtes Spritzbetongewölbe mit Leitkante oder Wandelement (Schweden, Norwegen)	Kein direkter Kontakt zur Außenschale, Montage mittels Gewindestangen, Viele Durchdringungen der Abdichtung zur Lagefixierung erforderlich, Durchdringungen zur Einbautenbefestigung von Nöten
Abgehängtes Betonelementgewölbe (Norwegen)	Kein direkter Kontakt zur Außenschale, Montage mittels Gewindestangen, Viele Durchdringungen der Abdichtung zur Lagefixierung erforderlich,

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. 6.1: Aspektspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze verschiedener Innenschalenvarianten (Fortsetzung)

Innenschalenvariante/Region	Anforderungen/Herangehensweise
	Keine Durchdringungen zur Einbautenbefestigung von Nöten
	<u>Dauerhaftigkeit und Robustheit</u>
Mitteleuropa	Nutzungsdauer bis 150 Jahre, Umfassende Kontrolle der Betondeckung zur Sicherstellung der Korrosionsbeständigkeit, Einsatz von Härtestabilisatoren und regelmäßige Spülungen um Funktionstüchtigkeit der Entwässerung aufrecht zu erhalten
Skandinavien	100 Jahre Nutzungsdauer für unzugängliche und massive Bauteile, 50 Jahre Nutzungsdauer für Abdichtung, Korrosionsverhinderung durch Beschichtung der Gewindestangen bzw. Einsatz von nichtrostendem Stahl, Keine Betondeckungsproblematik zufolge des Einsatzes von Stahlfaserbeton bei der Außenschale
	<u>Brandschutz und Verkehrsunfälle</u>
Mitteleuropa	Einführung der <i>Richtlinie Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton</i> [26], Beimischung von Polypropylenfasern zur Eindämmung von Betonabplatzungen, Nach Brandereignissen kommt es zur Beurteilung der Resttragfähigkeit (Visuell + Experimentell + Tragfähigkeitsbemessung mit adaptierten Parametern), Einführung der <i>Richtlinie Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen</i> [36] zur Vereinheitlichung des Sanierungskonzepts, Brandversuch als Grundsatzprüfung der Faserbetonklasse BBG, Kein simpler Austausch von Bauteilen möglich
Fortsetzung auf der nächsten Seite	

Tab. 6.1: Aspektspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze verschiedener Innenschalenvarianten (Fortsetzung)

Innenschalenvariante/Region	Anforderungen/Herangehensweise
Schweden	Beimischung von Polypropylenfasern zur Eindämmung von Betonabplatzungen, Verhinderung der Brandausbreitung zwischen Innen- und Außenschale durch Einbau von Schotts, Innenschalenbeton dient dem Schutz der Abdichtung, Austauschbare Wandelemente
Norwegen	Beimischung von Polypropylenfasern zur Eindämmung von Betonabplatzungen, Verhinderung der Brandausbreitung zwischen Innen- und Außenschale durch Einbau von Schotts, Austauschbare Leitkanten bzw. Wandelemente im Falle eines Spritzbetongewölbes, Erschwerter Fertigteilaustausch zufolge der Verspannung im Falle eines Betonelementgewölbes
<u>Einbauten und elektrische Einrichtungen</u>	
Mitteleuropa	Leitungsführung in Zwischendecke, Bewetterung + Brandrauchabsaugung über Zwischendecke, Inspektion + Instandhaltung im Regelfall bei laufendem Betrieb möglich, Verankerung von Einbauten in der Innenschale
Schweden	Kabelkollektor unter Installationskorridor situiert, Kleine Montagen bis 15 kg in Innenschale möglich, Schwerere Einbauten müssen im Gebirge verankert werden
Norwegen	Leitungsführung zwischen Fertigteil und Abdichtung bei SpC-Gewölbe mit Leitkante, Leitungsführung unter Straßenschulter bei SpC-Gewölbe mit Wandelement oder Betonelementgewölbe,
Fortsetzung auf der nächsten Seite	

Tab. 6.1: Aspektspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze verschiedener Innenschalenvarianten (Fortsetzung)

Innenschalenvariante/Region	Anforderungen/Herangehensweise
	SpC-Gewölbe: Befestigung leichter Geräte in der Innenschale und schwerer Einbauten im Gebirge, Betonelementgewölbe: Befestigung leichter und schwerer Einbauten zumeist in der Innenschale
<u>Profilveränderlichkeit</u>	
Ortbetoninnenschale (Mitteleuropa)	Innenschalenbetonage mittels Schalwagen, Aufwändige Sonder- bzw. Stummelschalungen bei Querschlägen, Nischen etc.
Abgehängtes Spritzbetongewölbe mit Leitkante oder Wandelement (Schweden, Norwegen)	Freie Wahl der Abdichtungsführung, Keine Einschränkungen zufolge des Spritzbetonauftrags, Bergseitige Lackenbildungen sind zu verhindern
Abgehängtes Betonelementgewölbe (Norwegen)	Anpassung der Fertigteilgeometrie (Produktionsvorlaufzeit berücksichtigen)

6.2 Aspektspezifische Gegenüberstellung der Innenschalenvarianten

In diesem Abschnitt kommt es zum direkten Vergleich und der Gegenüberstellung der zuvor angeführten Herangehensweisen. Die zu tätigen Maßnahmen, Materialverbräuche, Problemstellung etc. werden betrachtet. Die Ausarbeitung beruht auf dem Inhalt der vorhergehenden aspektspezifischen Betrachtungsweise und den Erfahrungen des Autors, die im Zuge der Ausarbeitung dieser Diplomarbeit gewonnen wurden — die Ausführungen dieses Kapitel sollen keine Bauweise bevorzugen oder benachteiligen und umfassen die Erkenntnisse aus dem Vergleich.

In diesem Zusammenhang ist weiter zu erwähnen, dass sowohl im Zuge der Planung als auch der Ausführung jedes Bauwerks die geologischen, normativen und etwaige projektspezifische Vorgaben zu beachten sind. Diese haben maßgebenden Einfluss auf die zu wählende Innenschalenvariante.

6.2.1 Beherrschung der Bergwässer im Zuge der Vortriebsarbeiten

Der Umgang mit Bergwässern ist im Allgemeinen nicht von der Innenschalenkonstruktion, sondern vorwiegend von den anstehenden Wasserdrücken, der Erosionsstabilität des Bodens/Gesteins sowie dem Porenanteil bzw. dem Kluftanteil und der Kluftweite abhängig.

Im Falle großer wasserführender Klüfte sind vorausseilende Injektionen durchzuführen. Diese trifft man zumeist in für den Tunnelvortrieb gutem Gebirge an. Entlastungsbohrungen bringen in diesen geologischen Verhältnissen nur selten die gewünschten Ergebnisse – diese sind nur zielführend, wenn die Durchlässigkeit geringer ist. Weiter sind offene Entlastungsbohrungen in

erosionsanfälligen Bereichen zu vermeiden. Ausspülungen von Material führen oftmals zu Instabilitäten, die in weiterer Folge ein Ortsbrustversagen mit sich bringen oder ähnliche gravierende Auswirkungen haben könnten. Die Sinnhaftigkeit von Entlastungsbohrungen ist somit von Fall zu Fall zu prüfen – mit vorausseilenden Injektionen hingegen kann in der Regel jeglicher Baugrund abgedichtet werden.

Eine Eindämmung der zutretenden Wässer in den Tunnel ist in jedem Fall zu verfolgen. In diesem Zusammenhang ist allerdings zu bedenken, dass lediglich eine massive Ortbetonkonstruktion Wasserdrücken standhalten kann. Die anderen, im Zuge dieser Arbeit behandelten, Innenschalenvarianten sind druckwassentlastet auszuführen. Bei den in Skandinavien zumeist eingesetzten, abgehängten, Innenschalenvarianten bringen große Wasserzutritte Probleme mit sich. Einerseits kann die Frostschutzfunktion beeinträchtigt werden und andererseits wären im Falle einer Leckage oder Muldenbildung im Gewölbe Wassersackbildungen nicht ausgeschlossen. Diese könnten unbeherrschbare Belastungen mit sich bringen.

6.2.2 Verwendung und Entsorgung des Ausbruchmaterials

Die Entsorgung des Ausbruchs ist mit enormen Kosten verbunden. Diese entstehen im Zuge der Zwischenlagerung obertage, dem Ladeprozess, der Verfuhr und der Deponierung an sich. Ein umfangreicher Personal- und Geräteeinsatz ist von Nöten. Dies sind lediglich ein paar Gründe, die für eine Wiederverwendung des Materials sprechen. Weiter sind Ersparnisse beim Ankauf der Gesteinskörnung und ökologische Aspekte in Betracht zu ziehen.

Betrachtet man die variantenspezifischen Herangehensweisen an diesen Aspekt, erkennt man konträre Zugänge. In Skandinavien kann der Ausbruch zumeist im Zuge der Betonherstellung wiederverwendet werden. Dieser Umstand bringt, zusätzlich zu den obig genannten Punkten, den Bauablauf betreffende Vorteile mit sich. Durch die Abhängung der Innenschale ist das Sprengprofil nicht derart penibel zu behandeln, wie dies in Mitteleuropa gehandhabt wird. Es ist lediglich auf die Einhaltung des Mindestquerschnitts zu achten, ein etwaiges Überprofil bringt keine Probleme mit sich. Somit sind große Abschlagslängen möglich und nur wenige Sprenglöcher erforderlich – dies sind ideale Voraussetzungen für einen Leistungsvortrieb.

In Mitteleuropa hingegen gibt es in den meisten Regionen keine solch idealen Gebirgsformationen. Der Ausbruch kann nur selten zur Betonherstellung verwendet werden, zumeist ist eine teure Deponierung unumgänglich. Die Ausbruchskubatur ist folglich möglichst gering zu halten – ein Mehrausbruch ist zu verhindern. Weiter ist bei der Ortbetoninnenschalenvariante ein direkter Kontakt der Innen- und Außenschale herzustellen. Stellt sich ein Überprofil ein, ist dieses im Zuge der Arbeiten am Abdichtungsträger wieder zu verfüllen. Dieser Umstand bringt wiederum Mehrkosten mit sich – ein Überprofil ist in Mitteleuropa somit tunlichst zu vermeiden.

6.2.3 Druckwasserhaltende und statische Aufgaben der Konstruktion

Wird ein druckwasserhaltender Querschnitt gefordert, ist dies lediglich durch die Ausbildung einer rundum abgedichteten, massiven Betonkonstruktion zu bewerkstelligen. Einwirkende hydrostatische Belastungen müssen von dieser aufgenommen werden. Weiter hat die Innenschale in nicht standfesten geologischen Bereichen dem Gebirgsdruck standzuhalten. Andernfalls stellt sich das in den Normen des CEN geforderte Sicherheitsniveau nicht ein.

Diese Anforderungen können lediglich durch den Einbau einer Ortbetoninnenschale erreicht werden. Die in Skandinavien zumeist verbaute, abgehängte Innenschale muss einerseits als druckentlasteter Querschnitt konzipiert sein, andererseits darf sie nur in standfestem Gebirge Anwendung finden.

6.2.4 Positionierung und Montage der Abdichtung

Die Herangehensweise an die Positionierung und Befestigung der Polypropylenbahnen ist bei den unterschiedlichen Innenschalenvarianten von Grund auf verschieden. Bei der Ortbetonbauweise wird die Abdichtung gemeinsam mit einer geotextilen Schutzschicht mit direktem Kontakt an der Spritzbetonaußenschale befestigt. Um dies zu ermöglichen, ist zuerst der Abdichtungsträger herzustellen – andernfalls wären lokale Überbelastungen aufgrund der, aus dem Beton ragenden, Ankerköpfe nicht auszuschließen. Kommt hingegen eine der skandinavischen Herangehensweisen mit abgehängter Abdichtung zur Ausführung, entfällt dieser Arbeitsschritt komplett.

Ein weiterer Unterschied zwischen den Systemen betrifft die Befestigungsmethode an sich. In Mitteleuropa werden die PP-Bahnen an den zuvor im Gebirge angebrachten Rondellen angeschweißt. Es sind somit keine Durchdringungen der Abdichtung erforderlich. Bei den skandinavischen Methoden ergibt sich aufgrund der Abhängung bei jeder Gewindestange die Notwendigkeit einer Durchdringung. Dieser Umstand führt selbstverständlich zu einem größeren Risiko undichter Stellen im Abdichtungskomplex.

6.2.5 Dauerhaftigkeit und Robustheit

Damit sich der immense Aufwand, der für die Errichtung von Tunneln von Nöten ist lohnt, wird eine möglichst lange Nutzungsdauer der Bauwerke angezielt. Allerdings sind aufgrund des sich ständig weiter entwickelnden Stand der Technik Umbauten bzw. Erneuerungen der elektrischen Ausstattung erforderlich. Die Einsatzzeiträume der elektrischen Einrichtungen und Einbauten umfassen demnach nicht den vollen Nutzungszeitraum des Gesamtbauwerks.

Anders ist dies bei unzugänglichen massiven Bauteilen. Diese können nicht ausgetauscht werden. In Mitteleuropa ist der Nutzungszeitraum von Tunnelbauwerken aufgrund der aufwändigeren Vortriebsarbeiten zumeist mit 150 Jahren festgelegt. In Skandinavien wird das Auslangen mit 100 Jahren gefunden. Weiter werden für die grundsätzlich austauschbare Abdichtung lediglich 50 Jahre angesetzt.

Um Korrosionserscheinungen in diesen Zeiträumen zu verhindern bzw. bestmöglich einzudämmen, sind bauweisenspezifisch unterschiedliche Maßnahmen von Nöten. Bei den oftmals hochgradig bewehrten Ortbetonbauteilen der mitteleuropäischen Herangehensweise ist penibel auf die Einhaltung der Betondeckung zu achten. Diese Aufgabenstellung stellt sich im Norden Europas nicht – ebendort stellt die Korrosion an den Gewindestangen die größte Herausforderung dar. Um dem entgegen zu treten, ist die große Menge an Gewindestangen entweder zu beschichten oder kostenintensiver nichtrostender Stahl einzusetzen.

6.2.6 Brandschutz und Verkehrsunfälle

Brände in Tunnelbauwerken sind oftmals mit enormen Hitzeentwicklungen verknüpft. Diese führen zu Temperaturspannungen in den Betonbauteilen, die in weiterer Folge Abplatzungen der oberflächennahen Strukturen mit sich bringen. Die Betondeckung nimmt ab und die Dauerhaftigkeit des Bauwerks wird maßgeblich beeinflusst. Aus diesem Grund wird bei allen, im Zuge dieser Diplomarbeit beschriebenen, Innenschalenvarianten die Zugabe von Polypropylenfasern zur Eindämmung der Abplatzungen vorgeschrieben. Folglich sind Adaptierungen der Betonrezepturen durchzuführen. Im Zuge der Grundsatzprüfung ebendieser Rezepturen ist in Österreich ein genormter Brandversuch an einer Probewand durchzuführen.

Kommt es im Nutzungszeitraum zu einem Brandereignis, ist das Bauwerk anschließend einer genauen Untersuchung zu unterziehen. In Österreich wurde diesbezüglich seitens der ÖBV eine Richtlinie veröffentlicht, die eine Vereinheitlichung der Inspektion und anschließenden Bemessung bzw. Instandhaltungsmaßnahmen als Ziel hat. Ein simpler Austausch der massiven

Ortbetoninnenschale ist nicht möglich. Hier wird ein großer Vorteil der skandinavischen Bauweisen schlagend. Kommt es im Zuge von Bränden oder Verkehrsunfällen zu irreparablen Schäden an den Leitkanten oder Betonelementen, können diese einfach durch neue Bauteile ersetzt werden.

Allerdings bringt die Abhängung der Innenschale auch einen Nachteil im Bezug auf die Brandschutzmaßnahmen mit sich. Der Spalt zwischen Innen- und Außenschale bildet einen zusammenhängenden Luftraum. Um die ungehinderte Ausbreitung des Brandes zu verhindern, sind Schotts vorzusehen.

6.2.7 Einbauten und elektrische Einrichtungen

Elektrische Einrichtungen und vorzusehende Einbauten, wie die Tunnelbelüftung und Beleuchtung, stellen grundlegende Bestandteile zur Ermöglichung eines Tunnelbetriebs dar. Die Positionierung und Befestigung der Leitungen, Lüfter etc. bringen bei allen Innenschalenvarianten Herausforderungen mit sich. Einerseits sollen sie vor Beschädigungen durch Anprall eines KFZ oder Wassereintritten geschützt sein, andererseits ist die Zugänglichkeit für die notwendigen Inspektions- und Instandhaltungsarbeiten sicherzustellen.

Bei den abgehängten Innenschalen geht die Leitungsführung in, hinter bzw. unter Betonbauteilen vonstatten – somit sind Schächte oder Instandhaltungsfenster einzuplanen. Da weiter die dünne Schalenkonstruktion nicht zur Kraftabtragung herangezogen werden darf, sind jegliche schwere Einbauten ins Gebirge zu verankern. Somit sind großflächige Durchdringungen der Abdichtung unumgänglich.

Diese Thematiken sind bei der mitteleuropäischen Herangehensweise besser gelöst. Oftmals kommt es zur Auflagerung von Zwischendecken im Ortbetongewölbe. In dieser werden einerseits Leitungen verlegt, andererseits geht die Belüftung und Brandrauchabsaugung über die Zwischendecke von statten. Der geschaffene Korridor kann für Inspektionen und Instandhaltungen begangen werden. Folglich ist es möglich, die Arbeiten im Zuge des laufenden Betriebs durchzuführen. Weiter können Einbauten, wie zum Beispiel Straßenschilder und Leuchtmittel, problemlos direkt in den massiven Ortbetonbauteilen verankert werden. Durchdringungen der Abdichtung sind somit nicht von Nöten.

6.2.8 Profilveränderlichkeit

Die Profilveränderlichkeit stellt einen zentralen Vorteil der skandinavischen Bauweisen dar. In Mitteleuropa müssen für Querschlag- und Nischenbereiche aufwändige und kostenintensive Zusatzschalungen angefertigt werden. Weiter stellen Aufweitungen oder Änderungen des Regelquerschnitts aufgrund des Einsatzes von Schalwägen Problemstellungen dar, die nur mit großen Mehraufwänden zu überwinden sind.

Kommen hingegen Fertigteile oder Spritzbetongewölbe im Zuge der Innenschalenausbildung zur Anwendung, stellen Profiländerungen, Querschläge, Nischen etc. keine Probleme dar. Durch eine simple Lageanpassung der Abdichtung können Querschnittsveränderungen vollzogen werden.

6.2.9 Aspektspezifische Vergleichsmatrix

Im Folgenden werden die einzelnen Ausführungen dieses Abschnitts in Form einer Matrix (Tab. 6.2) gegenübergestellt. An dieser Stelle wird abermals darauf hingewiesen, dass diese auf dem Inhalt der vorhergehenden Abschnitte beruht und keinesfalls zu Bevorzungen oder Benachteiligungen einzelner Herangehensweisen führen soll.

Tab. 6.2: Gegenüberstellung der Innenschalenvarianten

Aspekt	Ortbetoninnenschale	Abgeh. SpC-Gewölbe	Abgeh. Elementgewölbe
Eindämmung von Bergwasserzutritten	hilfreich	unumgänglich	unumgänglich
Wiederverwendung Ausbruchsmaterial	selten möglich	im Regelfall	im Regelfall
Auftretendes Überprofil	sehr problematisch	nicht problematisch	nicht problematisch
Verfüllung Überprofil	erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich
Abdichtungsträger	erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich
Druckwasserhaltende Ausführung	möglich	nicht möglich	nicht möglich
Mittragen der Lasten	ja	nein	nein
Positionierung Abdichtung	direkt an Außenschale	abgehängt	abgehängt
Abdichtungsdurchdringung	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich
Korrosionseindämmung durch	Kontrolle Betondeckung und Sanierungen	Beschichtung Gewindestangen Einsatz nichtrostender Stahl	Beschichtung Gewindestangen Einsatz nichtrostender Stahl
Einsatz PP-Fasern	ja	ja	ja
Instandsetzung von Schäden	Umfangreiche Sanierungen	Austausch beschädigter Fertigteile	Austausch beschädigter Fertigteile
Einbau Zwischendecke	im Regelfall	nicht möglich	nicht möglich
Brandrauchabsaugung	im Regelfall	nicht möglich	nicht möglich
Leitungsführung	Zwischendecke	hinter Fertigteil	unter Straßenschulter
Befestigung schwerer Einbauten im	Gewölbe	Gebirge	Gewölbe
Instandhaltung während Betrieb	möglich	teilweise möglich	teilweise möglich
Profilveränderung	großer Mehraufwand	einfach möglich	Adapatierung Fertigteile

6.3 Anwendbarkeit und normative Hindernisse in Österreich

Im ersten Teil dieses Abschnitts wird die Anwendbarkeit der skandinavischen Innenschalenvarianten im Österreich betrachtet. Dafür werden die, zu Beginn dieses Kapitels betrachteten, Aspekte jeweils einzeln untersucht, bevor anschließend die Möglichkeit der gesamthaften Anwendbarkeit untersucht wird.

Eine grundsätzlich zu überwindende Hürde zur Ermöglichung des Einbaus der skandinavischen Innenschalenvarianten stellt die österreichische Normenlandschaft dar. Der abschließende Teil dieses Abschnitts beleuchtet einige Barrieren, die die aktuell gültigen Regelwerke mit sich bringen. Im Zuge der Ausarbeitung der Diplomarbeit wurden viele Normen und Richtlinien untersucht, eine Vollständigkeit der auftretenden Barrieren kann allerdings nicht garantiert werden.

6.3.1 Betrachtung der Anwendbarkeit einzelner Teilaspekte der skandinavischen Varianten in Österreich

Im Zuge dieses Abschnitts kommt es zur Untersuchung der Anwendbarkeit der skandinavischen Herangehensweisen in Österreich, wobei abermals die in den vorhergehenden Ausarbeitungen behandelten Aspekte betrachtet werden. Der Fokus dabei liegt immer auf dem jeweiligen Aspekt – andere Einflüsse, wie zum Beispiel die geologischen Gegebenheiten oder ein anderer der behandelten Aspekte wird im Zuge dieses Abschnitts vorerst ausgeklammert.

Beherrschung der Bergwässer im Zuge der Vortriebsarbeiten In den skandinavischen Regionen werden Klüfte durch vorauseilende Injektionen verfüllt. Dadurch werden einerseits Bergwasserzutritte in den Tunnel verringert, andererseits kann eine Beeinflussung des natürlichen Grundwasserspiegels bzw. Bergwasserdrucks minimiert bzw. komplett verhindert werden.

Diese Vorgehensweise wäre in Österreich ebenfalls durchführbar. Allerdings würde man in gering durchlässigen Bereichen auch mit Entlastungsbohrungen ein Auslangen finden und damit den weiteren Einbau der Innenschalenkonstruktion nicht negativ beeinflussen.

Verwendung und Entsorgung des Ausbruchmaterials Eine Verwendung des Ausbruchs wird nicht nur in Skandinavien, sondern auch in Österreich angepriesen. Eine Anwendbarkeit ist allerdings nur bei Eignung des Materials gegeben.

Oftmals ist eben dies nicht der Fall – eine Entsorgung und Deponierung des Ausbruchmaterials wird erforderlich. Da es sich hierbei um einen sehr kostenintensiven Prozess handelt, ist die zu deponierende Kubatur gering zu halten. Aus diesem Grund ist die skandinavische Vorgehensweise beim Sprengvortrieb in der Art und Weise in Österreich nicht wirtschaftlich anwendbar. Ein Überprofil ist unbedingt zu verhindern bzw. geringstmöglich zu halten. Es empfiehlt sich ein dichteres Sprenglochraster und der Einsatz von weniger brisanter Konturmunition im Randbereich des Sprengprofils.

Druckwasserhaltende und statische Funktion der Konstruktion Die skandinavischen Innenschalenvarianten können keine statische Funktionen übernehmen. Dieser Aspekt stellt ein zentrales Problem im Bezug auf die Anwendbarkeit in Österreich dar. Viele Tunnelbauwerke im Alpenstaat führen durch geologisch sehr komplexe Bereiche und Störungszonen. In eben diesen kann das geforderte Sicherheitsniveau lediglich durch einen massiven Endausbau erreicht werden. In diesen Bereichen sind abgehängte Innenschalenvarianten somit nicht einsetzbar.

In einigen österreichischen Regionen, in denen standfestes Gebirge angetroffen wird, wäre die Anwendung einer abgehängten Innenschalenkonstruktion allerdings denkbar.

Positionierung und Montage der Abdichtung Die Abhängung der Abdichtung mittels Gewindestangen kann in Österreich theoretisch analog erfolgen. Allerdings muss in diesem Zusammenhang auf die kostenintensive Entsorgung des Ausbruchmaterials verwiesen werden. Da eine wirtschaftliche Projektabwicklung angepriesen wird, müsste der Spalt zwischen Innen- und Außenschale kleinstmöglich ausfallen.

Dauerhaftigkeit und Robustheit Im Bezug auf die Dauerhaftigkeit wären die skandinavischen Herangehensweisen in Österreich anwendbar. Die gegenüber der Ortbetonbauweise geringere Robustheit der Gesamtkonstruktion kann Probleme mit sich bringen. Diese können sowohl geologischen als auch hydrogeologischen Ursprung haben.

Brandschutz und Verkehrsunfälle Die Beimischung von Polypropylenfasern zur Eindämmung von Betonabplatzungen wird in Österreich ohnehin bereits verfolgt. Ein erfolgter Einsatz von Kunststofffasern im Spritzbeton zur Erhöhung der Brandbeständigkeit von abgehängten Innenschalen ist dem Autor allerdings nicht bekannt und weiter in den Richtlinien der ÖBV nicht verankert. Durch Branderreignisse, einen Anprall im Zuge eines Verkehrsunfalls oder gegen Ende der Nutzungsdauer kann es zu Beschädigungen an den Betonbauteilen kommen. Um die Instandhaltung zu erleichtern wären die skandinavischen Herangehensweisen, bei denen austauschbare Fertigteile zum Einsatz verbaut werden, folglich auch in Österreich sinnvoll anwendbar.

Einbauten und elektrische Einrichtungen Die Abhängung der Innenschale würde Veränderungen der Positionierung und Befestigung der Einbauten und elektrischer Einrichtungen erfordern. Zusätzlich wird die Durchführung von Inspektionen und Instandhaltungen erschwert und Unterbrechungen des laufenden Betriebs sind für umfangreiche Erneuerungen der Einrichtungen unumgänglich.

In diesem Zusammenhang bringt die mitteleuropäische Herangehensweise zwar einige Vorteile mit sich, eine Anwendung der skandinavischen Varianten wäre allerdings ebenfalls möglich.

Profilveränderlichkeit Im Zuge der Ausführung der mitteleuropäischen Ortbetoninnenschalenvariante sind große Mehraufwände für die Gewölbebetonage von Querschlags-, Nischenbereichen, etc. von Nöten. Dies ist bei den skandinavischen Varianten nicht der Fall. Deren Einsatz würde immense Erleichterungen und Ersparnisse mit sich bringen.

In diesem Zusammenhang muss allerdings erneut auf die geologischen Gegebenheiten verwiesen werden. Aufweitungen, Querschlagsbereiche usw. bringen komplexe Spannungsumlagerungsprozesse mit sich und führen in nicht standfestem Gebirge zu hohen Belastungen. Ein standfester Baugrund ist somit vor allem in diesen Bereichen eine Grundvoraussetzung für die Anwendung der abgehängten Innenschalenvarianten.

6.3.2 Die gesamthafte Anwendung der skandinavischen Varianten in Österreich

Zieht man die in Kap. 6.3.1 ausgearbeiteten Inhalte in Betracht, wird klar, dass eine Ausführung der Tunnelbauwerke nach skandinavischen Vorbild in Österreich durchaus möglich ist. Die grundlegende Voraussetzung dafür stellt allerdings ein standfestes Gebirge dar. Andernfalls ist die hierzulande etablierte massive Ortbetonbauweise als annähernd alternativlos anzusehen.

Die skandinavische Herangehensweise kann zwar analog in Österreich durchgeführt werden, diese Vorgehensweise wäre allerdings sehr unwirtschaftlich. Adaptierungen, die vor allem die Vortriebsarbeiten betreffen, müssen durchgeführt werden. Profiligenaue Sprengarbeiten sind durchzuführen. Andernfalls könnte es zu immensen Mehrkosten, die im konkreten Fall in die Sphäre des Auftragnehmers fallen, kommen. Die Adaptierung der Vorgehensweise bringt zwar

eine Verringerung der Vortriebsleistung mit sich – die monetären Auswirkungen der Entsorgung und Deponierung würden allerdings schwerwiegender sein.

Zusammenfassend ist die Anwendbarkeit nach erfolgten Adaptierungen in standfesten Gebirgskomplexen durchaus gegeben. An dieser Stelle sei erwähnt, dass es sich gegenüber der Ort betonbauweise um komplett konträre Innenschalensysteme handelt. Es würde nicht nur bei den ausführenden Unternehmen, sondern auch bei Planern, Bauherrn, Lieferante, etc. zu einem klassischen Einarbeitungseffekt kommen.

Soll eine der skandinavischen Innenschalenvarianten in Österreich zur Anwendung kommen, sind zusätzlich zu den angeführten Punkten gewisse normative Adaptierungen von Nöten. Diese werden im Folgenden erläutert.

6.3.3 Normative Hindernisse

Im Zuge der anschließenden Ausarbeitung werden normative Barrieren, die eine Anwendung der skandinavischen Innenschalenvariante in Österreich verhindern bzw. einschränken, angeführt. Weiter werden einige Richtlinien behandelt, in denen zusätzliche Informationen und Festlegungen zu verankern sind. Abermals wird darauf hingewiesen, dass eine Vollständigkeit der notwendigen Adaptierungen nicht garantiert werden kann.

RVS 09.01.23 Innenausbau [14] Auf S. 6 der Richtlinie ist festgelegt, dass bei Straßentunneln in der Regel Ort betoninnenschalen zu verbauen sind. Lediglich bei Querschlägen, Verbindungen ins Freie und in Sonderfällen ist der Einbau einer Spritzbetoninnenschale erlaubt. Eine Begründung dafür ist allerdings nicht verankert. Weiter gibt es keine, den Einsatz von Betonfertigteilen betreffenden, Ausführungen.

Richtlinie Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauten aus Beton [26]

Die zu befolgenden Ausführungen in der Richtlinie betreffen Ort betonbauteile in unterirdischen Verkehrsbauwerken. Spritzbeton wird somit nicht behandelt. In dem Regelwerk sind zum Beispiel Vorgaben für den Zeitpunkt der Beimischung der Fasern angegeben – weitere Ausführungen für Polypropylenfaserspritzbeton wären von Nöten. Weiter sind Betonfertigteile nicht in der Richtlinie verankert.

Richtlinie Innenschalenbeton [28] Die Ausführungen in der Richtlinie beruhen annähernd zur Gänze auf dem Einbau einer Ort betoninnenschale. Lediglich auf S. 62 wird kurz die Möglichkeit einer Innenschale aus Spritzbeton erwähnt. Die Anwendung ist allerdings, wie in der *RVS 09.01.23 Innenausbau [14]* auf Bereiche beschränkt, in denen es zu Änderungen des Tunnelprofils kommt. Weiter wird lediglich ein Auftrag des Spritzbetons anstelle des Ort betons beschrieben. Eine Abhängung der Innenschale und der Einsatz von Fertigteilen wird nicht behandelt.

Richtlinie Spritzbeton [37] In der gegenständlichen Richtlinie wird die Thematik Polypropylenfaserspritzbeton nur gestreift – es wird lediglich auf andere Regelwerke verwiesen. Ausführlichere Festlegungen zur Vereinheitlichung der Anwendung sowie den Rezepturen wären jedenfalls sinnvoll.

Die österreichische Normenlandschaft bringt zwar nur wenige Hindernisse mit sich, allerdings tun sich Punkte auf, die nicht geregelt sind. Hier wären umfangreichere Beschreibungen erforderlich. Weiter sind abgehängte Innenschalen und der Einsatz von Betonfertigteilen zur Herstellung des Innenausbau nicht in den Regelwerken verankert.

6.4 Zusammenfassung des Vergleichs und der Anwendbarkeit

Im Zuge des Vergleichs wurden große Unterschiede der Innenschalenvarianten aufgezeigt. Die Lösungsansätze zu vielen Teilaspekten sind stark konträr. Beispielsweise wird in Mitteleuropa der Grundgedanke verfolgt, dass Leckagen in den Abdichtungsbahnen am besten durch die Vermeidung von Durchdringungen eben dieser verhindert werden können. Hingegen ist in skandinavischen Tunneln bei jeder der tausenden Gewindestangen eine Durchdringung der Abdichtung erforderlich.

Die Lösungsansätze für manch andere Problemstellungen sind allerdings bei allen Innenschalensystemen ident. Um zum Beispiel Betonabplatzungen in ihrem Ausmaß zu verringern, kommt es bei allen Varianten zur Beimischung von Polypropylenfasern.

Die Untersuchung der Anwendbarkeit der abgehängten Innenschalenvarianten in Österreich hat gezeigt, dass ein Einsatz in standfesten Felsformationen durchaus denkbar ist. Gewisse Adaptierungen, wie die Minimierung des Spaltes zwischen der Außenschale und der Abdichtung sowie die Verhinderung eines Überprofils, sind allerdings zur Sicherstellung einer wirtschaftlichen Projektabwicklung von Nöten.

Um den Einsatz der skandinavischen Innenschalensysteme in Österreich zu ermöglichen, sind weitere Adaptierungen und Ergänzungen in einigen Richtlinien durchzuführen. Ein Pilotprojekt, bei dem es zu einer Erprobung der alternativen Systeme in der österreichischen Baupraxis kommt, könnte angezielt werden. Die, im Zuge des Projektes, gewonnenen Erfahrungen würden Auskunft darüber geben, welche Regelungen in die Normenlandschaft zu integrieren sind.

Die Ausführungen dieses Abschnitts bilden die Grundlage für das folgende Fazit und den anschließenden Ausblick, der die in Zukunft zu tätigen Schritte, die einen Einsatz der abgehängten Innenschale in Österreich ermöglichen könnten, umfasst.

Kapitel 7

Fazit und Ausblick

Dieses Kapitel beinhaltet das Resümee über die Anwendbarkeit und den Vergleich unterschiedlicher Innenschalenvarianten. Auf Grundlage der vorangegangenen Ausarbeitungen werden im Folgenden, die in Kap. 1.2 festgelegten, Forschungsfragen beantwortet. Dem Leser wird ein Überblick gegeben, welche Herangehensweisen an den Innenausbau von Tunnelbauwerken sich im Laufe der Zeit entwickelt haben, ob diese vergleichbar sind und ob all diese Konstruktionsvarianten auch in Österreich Anwendung finden könnten. Ein Ausblick, der unter anderem die anzustellenden weiterführenden Forschungen beinhaltet, rundet diese Diplomarbeit ab.

7.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Die im Folgenden behandelten Forschungsfragen wurden aufgrund einer Diskussionsgrundlage zu Beginn der Ausarbeitung der Diplomarbeit festgelegt. Deren Beantwortung erfolgt möglichst prägnant, um die betriebene Forschungsarbeit in übersichtlicher Art und Weise zusammenzufassen.

Welche Herangehensweisen an den Innenausbau von zyklisch aufgefahrenen Straßentunneln haben sich in Europa entwickelt?

In Mitteleuropa wird eine massive Ortbetoninnenschale verbaut. Die in Kap. 3 beschriebene Variante übernimmt grundlegende Funktionen im Bezug auf Tragfähigkeit, Abdichtung gegen Bergwässer und Brandschutz. Aufgrund des widerstandsfähigen Ortbetonausbaus können Tunnelbauwerke in fast jeglichen geologischen Komplexen errichtet werden.

Zusätzlich zu dieser Variante haben sich in Skandinavien weitere Innenschalensysteme entwickelt. Aufgrund der dort vorwiegend anzutreffenden, standfesten Felsformationen, hat die Innenschale zum einen nicht derart massiv auszufallen, zum anderen muss sie keine statische Funktion erfüllen. Um möglichst wirtschaftliche Bauprojekte zu verwirklichen, wird daher auf eine massive Ortbetonkonstruktion verzichtet.

In weiterer Folge haben sich abgehängte Innenschalenvarianten, die lediglich den Brandschutz und die Abdichtung betreffende Funktionen haben, entwickelt. Es kommt zu einer Abhängung der Abdichtung mittels Gewindestangen. Hohlraumseitig der Abdichtung wird eine Versiegelung aus Spritzbeton oder Fertigteilwänden aufgebracht. Kommt ein Spritzbetongewölbe zur Ausführung, werden an den Straßenrändern Leitkanten oder Wandelemente versetzt, die eine Beschädigung des Gewölbes verhindern sollen. Die skandinavischen Innenschalensysteme werden in Kap. 4 und Kap. 5 ausführlich beschrieben.

Sind die Lösungsansätze der verschiedenen Herangehensweisen zur Sicherstellung der Abdichtung, der Dauerhaftigkeit, des Brandschutzes etc. ähnlich, oder gibt es grundlegende Unterschiede?

Im Zuge der Recherche und einigen Baustellenbesichtigungen wurde schnell ersichtlich, dass die unterschiedlichen Innenschalenvarianten große Unterschiede aufweisen. Im Zuge der späteren Ausarbeitung der Kap. 3–5, hat sich eine aspektspezifische Untersuchung als die beste Methode zur Aufstellung eines Vergleichs herauskristallisiert. Der erste Teil des Kap. 6 ist dem Vergleich

der Innenschalenvarianten gewidmet. Im Zuge der Ausarbeitungen hat sich gezeigt, dass zwar viele Grundprinzipien in allen Systeme die gleichen, aber die Lösungsansätze unterschiedlich sind. Weiter hat sich herausgestellt, dass die einzelnen Teilaspekte nicht strikt zu trennen sind. Im Folgenden wird einer dieser Aspekte sowie dessen Verknüpfung zu einem anderen Aspekt angeführt, bevor es anschließend zu der Betrachtung der zentralen Unterschiede zwischen den Innenschalensystemen kommt.

Beispielsweise wird in Mitteleuropa penibel auf die Einhaltung des vorgegebenen Ausbruchquerschnitts geachtet. Dies hat den Hintergrund, dass ein etwaiges Überprofil zu einem Mehrausbruch führt und dadurch in der Regel die zu deponierende Ausbruchskubatur erhöht wird. Dieser Umstand führt unweigerlich zu einer Erhöhung der Kosten. In Skandinavien kann das gute Gestein zumeist für die Betonherstellung verwendet werden. Somit entfallen hohe Deponierungskosten. Folglich ändert sich weiter der Umgang mit dem auszubrechenden Profil. Es wird lediglich auf die Verhinderung eines Unterprofils geachtet – ein Überprofil wird aufgrund der dadurch möglichen Erhöhung der Vortriebsleistung in Kauf genommen. Der Aspekt des Mehrausbruchs ist untrennbar mit dem Aspekt der Abdichtungsführung verbunden. Während es in Skandinavien aufgrund der abgehängten Abdichtung zu keiner Problemstellung kommt, würde ein Überprofil bei der mitteleuropäischen Innenschalenvariante die Erfordernis zusätzlicher Aufwendungen, die wiederum einen anderen Teilaspekt betreffen, mit sich bringen – der anfallende Mehrausbruch ist im Zuge der Herstellung des Abdichtungsträgers wieder zu verfüllen.

Die Positionierung des Innenausbaus bildet einen grundlegenden Unterschied zwischen den behandelten Systemen. Während in Mitteleuropa der Ortbeton direkt an die Außenschale grenzt, ergibt sich in Skandinavien durch die Abhängung ein Spalt zwischen der Innen- und Außenschale.

Aufgrund dieser Tatsache ergibt ein weiteres zentrales Unterscheidungsmerkmal. Lediglich die massive Ortbetonkonstruktion kann eine statische Funktion übernehmen – die abgehängten Varianten können dies nicht. Sie können daher somit nur in standfestem Gebirge verbaut werden.

Die angeführten Aspekte zeigen die zentralen Unterschiede zwischen den Innenschalenvarianten auf. In der Tab. 6.2 sind all die weiteren Unterschiede übersichtlich abgebildet.

Können die in Skandinavien entwickelten System, oder zumindest Teile davon, sinnvoll in Mitteleuropa eingesetzt werden? Tun sich aufgrund der österreichischen Normenlandschaft Hindernisse auf?

Die Ausarbeitung der Diplomarbeit hat gezeigt, dass die schwedischen oder norwegischen Systeme im Falle geeigneter geologischer Verhältnisse durchaus in Österreich anwendbar wären. Das erforderliche standfeste Gebirge wird in Österreich allerdings nur in bestimmten Regionen angetroffen – der Einbau einer abgehängten Innenschale ist demnach nur in diesen Bereichen des Alpenlandes umsetzbar.

Weiter wurde klar, dass eine simple vollumfassende Übernahme der skandinavischen Vorgehensweisen nicht wirtschaftlich ist. Durch einfach umsetzbare Optimierungen kann diesem Umstand allerdings entgegnet werden. Beispielsweise ist hier abermals jener Aspekt, der schon im Zuge der Beantwortung der zweiten Forschungsfrage behandelt wurde, anzuführen. Durch die Minimierung des Abstandes zwischen der Innen- und Außenschale kann der aufzufahrende Querschnitt verkleinert und folglich die zu deponierende Kubatur verringert werden.

Um etwaige Hindernissen in der österreichischen Normenlandschaft auf dem Grund zu gehen, wurden die relevanten Regelwerke der ÖBV und der FSV durchforstet. Im Zuge dessen hat sich herausgestellt, dass es zwar nur wenige Hindernisse gibt, allerdings viele andere Punkte, deren klare Regelung notwendig wäre, nicht in den Regelwerken behandelt werden. Beispielhaft sind die fehlenden Ausführungen im Bezug auf abgehängte Systeme oder den Einsatz von Betonelementen zur Ausbildung der Innenschalenkonstruktion zu nennen.

7.2 Ausblick

Im Zuge der Ausarbeitung dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass eine weitere Betrachtung dieser Thematik durchaus ein zukünftiges Forschungsfeld darstellt. Die, in Abhängigkeit der zur Ausführung kommenden Innenschalenvariante, zu tätigenen Aufwände wurden aufgezeigt und gegenübergestellt. Auf diese aufbauend, kann es durch die monetäre Bewertung der Aufwände und die Berücksichtigung der Materialpreise zu einer Gegenüberstellung der aufzubringenden Investitionen für jede der Innenschalenvarianten kommen.

Aufgrund der aktuell sehr präsenten, die Klimakrise betreffende, Thematik ist eine Gegenüberstellung der CO₂-Äquivalente, die im Zuge der Herstellung freigesetzt werden, naheliegend. Bei dieser Betrachtung sind weiter die notwendigen Eingriffe in die Natur (z.B Injektionen) in Betracht zu ziehen. Dadurch könnte erforscht werden, welche der Varianten einen kleineren ökologischen Fußabdruck verursacht.

Zusätzlich zur weiteren Forschung, im Zuge derer der Vergleich der Innenschalenvarianten in den Fokus rücken soll, sind Untersuchungen anzustellen, wie die Implementierung der skandinavischen Herangehensweisen in Österreich von Statten gehen kann. Grundlegende Erweiterungen bzw. Adaptierungen einiger Richtlinien stellen einen der ersten notwendigen Schritte dar. Weiter sind alle betroffenen Stakeholder mit ins Boot zu holen und im Zuge von Workshops, Vorträgen etc. von den alternativen Bauweisen zu überzeugen. Die Umsetzung alternativer Herangehensweisen, die eine umfangreiche Änderung gegenüber bewährter Bauweisen mit sich bringen, können nur mit einer guten Zusammenarbeit aller Beteiligten erfolgreich umgesetzt werden. In diesem Sinne: Ein herzliches Glück Auf!



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Literatur

- [1] D. Adam. *Studienblätter zur Vorlesung Tunnelbau im Festgestein und Lockergestein*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, 2016. 218 S.
- [2] N. Barton, R. Lien und J. Lunde. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. 1974.
- [3] B. G. Bauverlag. *Gotthard Basistunnel - Stand der Arbeiten*. 2010. URL: https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel_2010-04_Gotthard-Basistunnel_Stand_der_Arbeiten-931604.html (Zugriff am 04/2010).
- [4] P. Bonapace, M. Eder, R. Galler, B. Moritz, E. Schneider und W. Schubert. *NATM – The Austrian Practice of Conventional Tunneling*. 1.Auflage. Salzburg: Austrian Society for Geomechanics, 2010. ISBN: 978-3-200-01989-8.
- [5] M. Bräunlich. *Das Grundgebirge Skandinaviens*. 2023. URL: <https://kristallin.de/Grundgebirge/Grundgebirge.html> (Zugriff am 30.10.2023).
- [6] D. U. Deere und D. W. Deere. *The rock quality designation (RQD) index in practice*. 1988.
- [7] EFTA-Sekretariat. *Der europäische Wirtschaftsraum*. 2005. 4 S.
- [8] *SS EN 13491: Geosynthetische Dichtungsbahnen – Eigenschaften, die für die Anwendung beim Bau von Tunneln und damit verbundenen Tiefbauwerken erforderlich sind*. Brüssel: Comité Européen de Normalisation, 2018-09-15.
- [9] *EN 13501-1: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten*. Brüssel: Comité Européen de Normalisation, 2020-01-15.
- [10] *SS EN 1363-2: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren*. Brüssel: Comité Européen de Normalisation, 1999-10.
- [11] *EN 14487: Spritzbeton - Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität*. Brüssel: Comité Européen de Normalisation, 2023-03.
- [12] *EN 14488: Prüfung von Spritzbeton - Teil 1: Probenahme von Frisch- und Festbeton*. Brüssel: Comité Européen de Normalisation, 2005-11.
- [13] FSV. *RVS 08.16.01 Anforderungen an Asphaltsschichten*. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, 2010. 26 S.
- [14] FSV. *RVS 09.01.23 Innenausbau*. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, 2009. 15 S.
- [15] FSV. *RVS 09.01.23 Innenausbau 1. Abänderung*. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, 2010. 3 S.
- [16] FSV. *RVS 09.01.43 Konstruktive Ausführung Innenschalenbeton*. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, 2006. 35 S.
- [17] FSV. *RVS 09.01.45 Baulicher Brandschutz in Straßentunnel*. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, 2015. 12 S.

- [18] FSV. *RVS 09.04.11 Erhaltung und Betrieb*. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, 2004. 10 S.
- [19] Gea Norvegica UNESCO Global Geopark. *Geologische Übersicht Norwegen*. 2023. URL: <https://de.geoparken.com/geologische-uebersicht> (Zugriff am 30. 10. 2023).
- [20] G. Girmscheid. *Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus*. 3.Auflage. Weinheim: Ernst & Sohn, 2013. ISBN: 978-3-433-03047-9.
- [21] G. Goger. *Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 2020. 313 S.
- [22] K. G. Holter. *Tunnels and the Q-System*. 2023. URL: <https://www.ngi.no/en/research-and-consulting/infrastructure-container/tunnels-and-the-q-system/> (Zugriff am 31. 10. 2023).
- [23] C. Louis. *Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels*. Karlsruhe: Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana, 1967.
- [24] G. Mausol. *Tunnel unter dem Nordatlantik mit Kreisverkehr*. 2021. URL: <https://www.kues-magazin.de/faeroeer-inseln-tunnel-unter-dem-nordatlantik-mit-kreisverkehr/> (Zugriff am 15. 03. 2023).
- [25] L. Müller. *Der Felsbau, Band 3 Tunnelbau*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1978. 965 S. ISBN: 978-3-662-58197-1.
- [26] ÖBV. *Richtlinie Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton*. Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2015. 54 S.
- [27] ÖBV. *Richtlinie Injektionstechnik Teil 1 - Bauten aus Beton und Stahlbeton*. Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2021. 56 S.
- [28] ÖBV. *Richtlinie Innenschalenbeton*. Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2012. 87 S.
- [29] ÖBV. *Richtlinie Tunnelabdichtung*. Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2012. 134 S.
- [30] ÖBV. *Richtlinie Verwendung von Tunnelausbruch*. Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2015. 66 S.
- [31] *ÖNORM B 2203-1: Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm – Teil 1: Zyklischer Vortrieb*. Wien: Austrian Standards Institute, 2023-03-01.
- [32] *ÖNORM B 2203-2: Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm – Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb*. Wien: Austrian Standards Institute, 2005-01-01.
- [33] *EN 1992: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Brüssel: Comité Européen de Normalisation, 2010-12.
- [34] *EN 1993: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln - Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen*. Brüssel: Comité Européen de Normalisation, 2015-12.
- [35] *ÖNORM EN 1997: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln*. Wien: Austrian Standards Institute, 2014-11-15.
- [36] ÖVBB. *Richtlinie Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen*. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2009. 27 S.

- [37] ÖVBB. *Richtlinie Spritzbeton*. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2004. 106 S.
- [38] ÖVBB. *Richtlinie Tunnelentwässerung*. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2010. 111 S.
- [39] R. Pap. *Weltkulturerbe Semmeringbahn*. Semmering: Tourismusregion NÖ Süd, 2003.
- [40] L. Persson. „Geological Survey of Sweden“. In: (Jan. 1998).
- [41] T. Pilgerstorfer, N. Radoncic, B. Moritz und A. Goricki. *Evaluation and interpretation of monitoring data in the test adit EKT Paierdorf*. Beitrag in Geomechanics and Tunneling 4 (2011), No.5. Berlin, 2011.
- [42] Statens Vegvesen Norwegian Public Roads Administration. *Aufgaben und Zuständigkeiten*. 2023. URL: <https://www.vegvesen.no/en/about-us/about-the-organisation/about-the-norwegian-public-roads-administration/our-service-to-society-tasks-and-responsibilities/tasks-and-responsibilities/> (Zugriff am 10.11.2023).
- [43] W. Stipek, R. Galler und M. Bauer. *50 Years of NATM – Experience Reports*. 1.Auflage. Wien: ITA Austria, 2012. ISBN: 978-3-200-02801-2.
- [44] A. Tollmann. *Geologie von Österreich*. Deuticke, 1980. ISBN: 3700544294.
- [45] Trafikverket. „E4 Förbifart Stockholm Teknisk beskrivning Innertag Handling 11.2.1“. In: (Juni 2018), S. 18.
- [46] Trafikverket. „E4 Förbifart Stockholm Teknisk beskrivning Installation under byggtid Handling 11.2.2“. In: (Okt. 2017), S. 28.
- [47] Trafikverket. *Trafikverkets tekniska råd Bro*. 2011:086. Grafisk Form, 2013. ISBN: 978-91-7467-154-4.
- [48] N. statens vegvesen Vegdirektoratet. *Straßentunnel Handbuch N500*. 2016. 88 S.
- [49] N. statens vegvesen Vegdirektoratet. *Tunnelführung Handbuch V520*. 2016. 114 S.
- [50] N. statens vegvesen Vegdirektoratet. *Wasser- und Frostschutz in Tunneln Handbuch R510*. 2016. 55 S.
- [51] N. Vogt. *Studienunterlagen zur Vorlesung Tunnelbau*. München: Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Technischen Universität München, 2009.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Benennung der verschiedenen Teilbereiche im Querschnitt eines Tunnelbauwerks (Quelle: <i>ÖNORM B 2203-1</i> [31])	20
2.2	Benennung der verschiedenen Teilbereiche im Längsschnitt eines Tunnelbauwerks (Quelle: <i>ÖNORM B 2203-1</i> [31])	20
2.3	Übersicht der bergmännischen Bauweisen sowie deren jeweilige Bestandteile des Ausbaus (Quelle: Adam [1], S. 67)	21
2.4	Ausbruchsreihenfolge der einzelnen Teilquerschnitte im Zuge der alten österreichischen Bauweise (Quelle: Müller [25], S. 572)	24
2.5	Schematische Darstellung eines Bohrwagens mit drei Lafetten und einer Hebebühne (Quelle: Goger [21], S. 72)	25
2.6	Beispielhafte Gebirgs- und Ausbaukennlinien zur Beschreibung des erforderlichen Ausbauwiderstands bei radialen Verformungen (Quelle: Vogt [51])	27
2.7	Teilfläche einer Kalotte bei mixed face conditions in einem österreichischen Tunnel (Quelle: Eigene Aufnahme)	28
2.8	Funktionsweise eines Verpresspfahls – Kraftübertragung über die ganze Länge aufgrund der voll verpressten Ankerstrecke (Quelle: <i>ÖNORM EN 1997-1</i> [35])	30
2.9	Vortrieb in stark druckhaftem Gebirge unter dem Einsatz von acht Reihen Stauchelementen in einem Tunnel in Österreich (Quelle: Eigene Abbildung)	32
2.10	Funktionsweise einer drückenden Bewetterung durch den Einsatz einer Belüftungslutte (Quelle: Goger [21])	33
3.1	Hufeisenprofil für standfesten (links) und Profil mit Sohlgewölbe für gebrächen Baugrund (rechts) (Quelle: <i>Richtlinie Tunnelabdichtung</i> [29], S. 17)	38
3.2	Schnittdetail des Blockfugenbereichs im Gewölbe druckwasserentlasteter Tunnel (Quelle: <i>Richtlinie Tunnelabdichtung</i> [29], S. 19)	40
3.3	Detailbereich einer Blockfuge in einem österreichischen Tunnel (Quelle: Eigene Aufnahme)	41
3.4	Unterschiedliche Ausführungsvarianten einer zweischaligen Konstruktion aus Spritzbetonaußen- und Ortbetoninnenschale (Quelle: Goger [21], S. 290)	42
3.5	Verschiedene Schweißverbindungen und die jeweils durchzuführenden Dichtheitsprüfverfahren (Quelle: Girmscheid [20], S. 394)	43
3.6	Der Weg der zutretenden Wässer in die Ulmendrainage (Quelle: <i>Richtlinie Tunnelentwässerung</i> [38] S.5)	44
3.7	Bereich der Ulmendrainage eines druckwasserentlasteten Gewölbes mit KDB und offener Sohle (Quelle: <i>Richtlinie Tunnelabdichtung</i> [29] S.21)	45
3.8	Schematische Darstellung der Arbeitsabfolge im Zuge des Innenausbau (Quelle: Eigene Darstellung)	49
3.9	Zulässige Unebenheiten des Abdichtungsträger bei druckwasserentlasteten Querschnitten (Quelle: <i>Richtlinie Tunnelabdichtung</i> [29] S.35)	50
3.10	Widerlager und gebundene Sickerpackung auf einer österreichischen Baustelle (Quelle: Eigene Aufnahme)	51

3.11	Montage der geotextilen Schutzschicht sowie der KDB mittels Rondellen (Quelle: Eigene Aufnahme)	52
3.12	Vorläufergewölbeschalwagen zur Herstellung von Gewölbeblöcken mit 12,5 Metern Länge (Quelle: Eigene Aufnahme)	54
3.13	Massive Ortbetoninnenschale nach Fertigstellung der Vorläuferblöcke (Quelle: Eigene Aufnahme)	55
4.1	Mit Stahlfaserspritzbeton gesicherte Ulme und mittels Gewindestangen abgehängter Abdichtungsschirm (Quelle: Eigene Aufnahme)	58
4.2	Fertiger Innenschalenrohbau inkl. Deckenelementen zur Beleuchtungs- und Bewässerungsinstallation (Quelle: Eigene Aufnahme)	59
4.3	Flucht- und Instandhaltungskorridor in einem schwedischen Tunnel (Quelle: Eigene Aufnahme)	61
4.4	Schematische Darstellung der Führung der Abdichtungsfolie inkl. Wartungsöffnung (Quelle: Trafikverket [45])	62
4.5	Innenschalenvariante mit abgehängter Abdichtung und vom Fahrraum getrennten Installationskorridor (Quelle: Trafikverket [45])	63
4.6	Erektor zur Manipulation der Wandelemente (Quelle: Eigene Aufnahme)	65
4.7	Folienabdeckung der Fertigteilwände und im Firstbereich fixierte Bewehrung (Quelle: Eigene Aufnahme)	66
4.8	Spritzbetonmanipulatoraufbau auf einem LKW (Quelle: Eigene Aufnahme)	67
5.1	Schematischer Tunnelquerschnitt zur Gegenüberstellung der möglichen Ausführungsvarianten mit Wandelementen oder Leitkanten (Quelle: Vegdirektoratet [48], S. 17)	70
5.2	Schematische Darstellung eines Wasser- und Frostschutzgewölbes inklusive Membranabdichtung (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 76)	71
5.3	Skizzenhafte Darstellung eines PE-Gewölbes mit einer Spritzbetonschicht und Betonleitkante, Profil T9,5 (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 73)	72
5.4	Skizzenhafte Darstellung eines PE-Gewölbes mit Spritzbetonschicht und Wandelementen, Profil T10,5 (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 74)	73
5.5	Skizzenhafte Darstellung eines vollkommen mit Fertigteilen verkleideten Gewölbes, Profil T10,5 (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 74)	73
5.6	PE-Platten, die unter der Berücksichtigung der vorzusehenden Überlappungsbereiche für die spätere Doppelnahtschweißung an den PE-Abdichtungsbahnen befestigt werden (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 80)	74
5.7	Kontaktgeformtes Frostringgewölbe im Portalbereich eines norwegischen Tunnels (Quelle: Mag. Ing. Stegic Jurica)	75
5.8	Detailbereich der linken Ulme: Ausführungsvariante mit Betonleitkante und Installationsebene (Quelle: Vegdirektoratet [49], S. 79)	76
5.9	Beispielhafte Ausbildungsvariante eines Dichtschotts zur Verhinderung der Brandausbreitung (Quelle: Vegdirektoratet [50], S. 22)	77
5.10	Speziell für die Herstellung kurzer Ankerbohrungen konzipiertes Hochleistungsgerät (Quelle: Mag. Ing. Stegic Jurica)	78
5.11	Innenschalenkonstruktion vor dem Auftrag der fahrbahnseitigen Spritzbetonhaut auf einer Baustelle in Norwegen (Quelle: Mag. Ing. Stegic Jurica)	79
5.12	Spritzbetongewölbe mit Leitkante nach Fertigstellung (Quelle: Mausol [24])	80

Tabellenverzeichnis

5.1	Zu verwendendes Tunnelprofil in Abhängigkeit der vorgegebenen Bemessungsklasse (Quelle: Vegdirektoratet [48], S. 18)	70
5.2	Anwendungsgrenzen der unterschiedlichen Innenschalen- bzw. Frostschutzvarianten (Quelle: Vegdirektoratet [48], S. 18)	71
6.1	Aspektspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze verschiedener Innenschalenvarianten	88
6.1	Aspektspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze verschiedener Innenschalenvarianten (Fortsetzung)	89
6.1	Aspektspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze verschiedener Innenschalenvarianten (Fortsetzung)	90
6.1	Aspektspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze verschiedener Innenschalenvarianten (Fortsetzung)	91
6.1	Aspektspezifische Betrachtung der Anforderungen und Lösungsansätze verschiedener Innenschalenvarianten (Fortsetzung)	92
6.2	Gegenüberstellung der Innenschalenvarianten	96