

## **Analyse von Tübbingschäden bei Perlkieshinterfüllung**

Schadensuntersuchung bei Tunnelbauprojekten mit Einfachschildmaschinen

Gabriel Mölgg, BSc

Innsbruck, Februar 2025

### Masterarbeit

eingereicht an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für Technische Wissenschaften zur Erlangung des akademischen Grades

### Diplomingenieurin

Diese Masterarbeit ist der Vertiefungsrichtung „Baustoffe, Baubetrieb und Projektmanagement“ des Masterstudiums Bauingenieurwissenschaften zugeordnet.

Beurteiler/in:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthias Flora,  
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften  
Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau



Betreuer/in: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthias Flora, Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Mitbetreuer/in: Dipl.-Ing. Hannah Salzgeber und Dipl.-Ing. Hans Exenberger, Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau





# Danksagung

Zuallererst möchte ich meinem Betreuer, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Matthias Flora, meinen herzlichen Dank aussprechen. Er hat mich für den Tunnelbau begeistert und mir kontinuierlich Unterstützung sowie wertvolle Anregungen gegeben. Ohne seine fachliche Expertise und Ermutigung wäre diese Arbeit in dieser Form nicht entstanden.

Mein besonderer Dank gilt auch Hannah Salzgeber und Hans Exenberger. Beide haben mich während des gesamten Arbeitsprozesses begleitet und mir stets wertvolle Ratschläge sowie Hinweise gegeben, die entscheidend für den Fortschritt meiner Masterarbeit waren. Insbesondere möchte ich mich ausdrücklich bei Hannah für das sorgfältige Korrekturlesen bedanken.

Des Weiteren möchte ich Helmut Wannenmacher danken. Er war stets eine wertvolle Ansprechperson, wenn es um Informationen und Unterlagen zu den untersuchten Projekten ging. Dank seiner Unterstützung konnte ich mit verschiedenen Fachleuten in Kontakt treten, die mir wichtige Einblicke und Inputs für meine Arbeit gaben.

Weiters danke ich meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung mein Studium ermöglicht haben.

Zudem möchte ich mich beim gesamten iBT-Arbeitsbereich für die vielen wertvollen Tipps, die hilfreichen Tricks und natürlich für die großartigen Gespräche bedanken, die den Arbeitsalltag immer wieder aufgelockert haben.

Abschließend möchte ich allen danken, die mich auf unterschiedliche Art und Weise beim Erstellen dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben. Eure Hilfe hat mir sehr viel bedeutet.



# Kurzfassung

In einer Vielzahl von Tunnelbauprojekten in Österreich und weltweit kommen häufig Einfachschild-Tunnelbohrmaschinen (TBM-S) zum Einsatz. Dabei erfolgt die Tunnelauskleidung mit sogenannten Tübbingen, gefolgt von einer Ringspaltverfüllung mittels Perlkies. In diesem Kontext ist zu beobachten, dass Tübbingschäden regelmäßig in erheblichem Umfang auftreten. Es zeigt sich, dass im zeitlichen Verlauf der einzelnen Projekte weder bei den früheren noch bei den aktuellen Projekten eine signifikante Reduktion der Schadenshäufigkeit festzustellen ist. Dies lässt den Schluss zu, dass ähnliche Schadensmuster sowohl in älteren als auch in neueren Projekten auftreten, was die Effektivität der Systemkombination in Frage stellt.

Daher werden in dieser Arbeit Schäden an Tübbingen in vier anonymisierten Tunnelbauprojekten systematisch analysiert, um einen Überblick über die Tübbingschäden zu bekommen. Insbesondere werden folgende Fragestellungen betrachtet:

- In welchem Ausmaß treten Schäden beim Bau von Tübbingringen auf?
- Welche Arten von Tübbingschäden treten auf, und wie häufig kommen sie vor?
- Ist eine Vergleichbarkeit der vier verschiedenen Tunnelbauprojekte hinsichtlich des Ausmaßes der Tübbingschäden möglich?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen ist es erforderlich, zunächst die Datengrundlage hinsichtlich ihrer Qualität und Quantität eingehend zu evaluieren, um anschließend zu prüfen, inwieweit eine bestehende Dokumentation von Schäden sinnvoll ausgewertet werden kann.

Aus der Analyse werden folgende Erkenntnisse gewonnen:

In Bezug auf die einzelnen Projekte lässt sich feststellen, dass die Tübbingringe der einzelnen Projekte signifikante Schäden aufweisen. Die häufigsten Schadensarten sind Risse und Abplatzungen, deren Auftreten von einer Vielzahl verschiedener Faktoren abhängt. Die Untersuchung zeigt, dass insbesondere eine qualitativ hochwertige und konsistente Schadensdokumentation entscheidend für die Identifikation von Schäden ist. Unterschiede in der Datenverfügbarkeit und -qualität zwischen den Projekten erschweren jedoch eine direkte Vergleichbarkeit der Projekte untereinander.

Die aus der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen die Komplexität und Vielschichtigkeit der Schadensentstehung und weisen auf den Bedarf an weitergehender Forschung hin, insbesondere zur Entwicklung präziserer Analysemethoden und Optimierungsstrategien hinsichtlich Tübbingschäden für zukünftige Tunnelbauprojekte.



# Abstract

In numerous tunnel construction projects in Austria and worldwide, single-shield tunnel boring machines are frequently used. The tunnel lining is carried out with so called segmental lining followed by annular gap backfilling using pea-gravel. In this context, it can be observed that segment damage regularly occurs to a considerable extent. It can be seen that there was no significant reduction in the frequency of damage throughout the individual projects, neither in the earlier nor in the current projects. This leads to the conclusion that similar damage patterns occur in both older and newer projects, which calls into question the effectiveness of the system combination.

Therefore, this thesis systematically analyzes damage to segment rings in four anonymized tunnel construction projects to obtain an overview of segment damage. In particular, the following questions are considered:

- To what extent does damage occur to segmental rings?
- What types of segment damage occur, and how frequently do they occur?
- Is it possible to compare the four different tunnel construction projects concerning the extent of segment damage?

To answer these research questions, it is first necessary to evaluate the data basis in detail about its quality and quantity to subsequently examine the extent to which existing documentation of damage can be meaningfully evaluated.

The following findings are obtained from the analysis:

In regard to the individual projects, it can be determined that the segment rings of the individual projects exhibit significant damage. The most common types of damage are cracks and spalling, the occurrence of which depends on several different factors. The investigation shows that high-quality and consistent damages documentation, in particular, is crucial for the identification of damage. However, differences in data availability and quality between the projects make it difficult to compare the projects with one another directly.

The insights gained from work illustrate the complexity and multi-layered nature of damage development and point to the need for further research, in particular, to develop more precise analysis methods and optimization strategies concerning segment damage for future tunnel construction projects.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung .....</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Motivation und Ziel .....	2
1.3 Forschungsfrage.....	2
1.4 Methodik.....	3
<b>2 Grundlage und Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1 Maschinelles Tunnelbau .....	5
2.2 Überblick Tübbinge .....	7
2.2.1 Ringtypen .....	7
2.2.2 Ein- und Zweischaliger Ringausbau.....	10
2.2.3 Fugenausbildung.....	11
2.2.4 Abdichtung bei Tübbingsystemen.....	13
2.2.5 Herstellung und Material von Tübbingsegmenten .....	14
2.2.6 Beanspruchung von Tübbingen während der Bauphase .....	17
2.3 Ringspaltverfüllung .....	18
2.3.1 Richtlinien und Normungen .....	19
2.3.2 Ringspaltverfüllmaterialien (RSVM) .....	19
2.3.3 Methoden der Ringspaltverfüllung.....	21
2.4 Schadensarten bei Tübbingen.....	23
2.5 Tunnel Information Modeling .....	28
<b>3 Datengrundlage.....</b>	<b>31</b>
3.1 Baustelle A .....	32
3.2 Baustelle B.....	34
3.3 Baustelle C.....	37
3.4 Baustelle D .....	39
<b>4 Schadensanalyse.....</b>	<b>43</b>

4.1	Baustelle A .....	43
4.2	Baustelle B .....	47
4.3	Baustelle C .....	51
4.4	Baustelle D .....	54
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>57</b>
5.1	Beantwortung der Forschungsfragen .....	57
5.2	Fazit und Ausblick .....	59
5.3	TIM und Tübinge: Ein Ausblick .....	62
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>65</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Vergleich der Kosten der Tunnelvortriebsmethoden in Abhängigkeit von der Tunnellänge [11].....	5
Abbildung 2-2: Darstellung einer TBM-S mit Bestandteilen (verändert) [12] .....	6
Abbildung 2-3: Darstellung Tübbingsystem [15].....	7
Abbildung 2-4: Klassifizierung der Betontübbinge in Ringtypen [17] .....	7
Abbildung 2-5: Prinzipskizze eines Universalrings mit schrägen Längsfugen [18] .....	8
Abbildung 2-6: Skizze links- und rechtskeilförmiger Ring [18] .....	8
Abbildung 2-7: Prinzipskizze Parallelringe mit Versatz beim Einbau [18].....	9
Abbildung 2-8: Prinzipskizze Hexagonalzübbingringe [19].....	10
Abbildung 2-9: Längsfugenformen (verändert) [23] .....	11
Abbildung 2-10: Ringfugenformen (verändert) [23] .....	12
Abbildung 2-11: Tübbing mit eingebautem Dichtungsrahmen (verändert)[25] .....	13
Abbildung 2-12: Grundabstand der Nut und Versatz [24] .....	14
Abbildung 2-13: Überblick über den Ablauf der Wärmebehandlung [27] .....	14
Abbildung 2-14: Standfertigung mit Kübel (links) und mit Fahrmischer (rechts) [29] .....	15
Abbildung 2-15: Umlauffertigung (verändert) [29] .....	16
Abbildung 2-16: Ovalisierung und Konvergenzen der Tübbingringe (verändert) [16,33] .....	17
Abbildung 2-17: Allgemeine Anforderungen an das RSVM [35] .....	18
Abbildung 2-18: Zusammensetzung der Ringspaltstärke (verändert) [37] .....	18
Abbildung 2-19: Zusammenhang Ringspalverpressung mit Setzungen [40].....	19
Abbildung 2-20: Ringspaltverfüllung durch Tübbingöffnungen [46] .....	21
Abbildung 2-21: Links: Lisenenöffnung integriert im Schildschwanz [47]; Rechts: Lisenenanordnung [19] .....	22
Abbildung 2-22: Links: Risse; Rechts: Abplatzung [9,48] .....	23
Abbildung 2-23: Versätze entlang der Ringfuge [49] .....	23
Abbildung 2-24: Beispiel für beschädigte Dichtungsrahmen [9].....	24
Abbildung 2-25: Links: Umgeknickter Abstandshalter [8] Rechts: Schlechte Positionierung der Zwischenleisten [50] .....	25
Abbildung 2-26: Beschädigungen durch Versätzen in der Ringfuge (verändert) [18,34].....	26
Abbildung 2-27: Abplatzung aufgrund Schildschwanzkontakt [8] .....	26
Abbildung 2-28: Visualisierung eines Tunnels mit den einzelnen Tübbingringen .....	29
Abbildung 3-1: Handschriftliches Schadensprotokoll.....	33
Abbildung 3-2: Ausschnitt der Schadensdokumentation .....	36
Abbildung 3-3: Schadensdokumentation (Tunnelband).....	38
Abbildung 3-4: Ausschnitt Rissdokumentation.....	40
Abbildung 4-1: Anzahl von Schäden nach Schadensart.....	43
Abbildung 4-2: Summe der Schäden nach Ringnummer .....	44
Abbildung 4-3: Gegenüberstellung Ringabschnitt 0-50 und 50-609.....	45
Abbildung 4-4: Zeitliche Dokumentation der Schäden .....	46
Abbildung 4-5: Anzahl von Schäden nach Tübbingsegment .....	46
Abbildung 4-6: Schadensposition nach Art der Schäden .....	47
Abbildung 4-7: Anzahl der Schäden nach der Schadensart beider Röhren.....	48
Abbildung 4-8: Summe der Schäden nach Ringnummer (Röhre 1).....	49

Abbildung 4-9: Summe der Schäden nach Ringnummer (Röhre 2) .....	49
Abbildung 4-10: Zeitliche Dokumentation der Schäden .....	50
Abbildung 4-11: Zeitliche Dokumentation der Risse und Abplatzungen (Röhre 1) .....	50
Abbildung 4-12: Zeitliche Dokumentation der Risse und Abplatzungen (Röhre 2) .....	51
Abbildung 4-13: Anzahl der Schäden nach der Schadensart beider Röhren .....	52
Abbildung 4-14: Summe der Schäden nach Ringnummer (Röhre 1) .....	53
Abbildung 4-15: Summe der Schäden nach Ringnummer (Röhre 2) .....	53
Abbildung 4-16: Zeitliche Dokumentation der Schäden .....	53
Abbildung 4-17: Rissverteilung nach deren Größe.....	54
Abbildung 4-18: Summe der Risse nach Ringnummer .....	55
Abbildung 4-19: Summe der Risse nach Ringnummer und Größe .....	55
Abbildung 4-20: Grafische Darstellung der Rissverteilung anhand des Querschnitts.....	56
Abbildung 5-1: Zusammenfassung der gesunden und der beschädigten Ringe .....	58
Abbildung 5-2: Forschungsergebnis aus der Stiftungsprofessur (TIM) .....	62

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Erläuterung der einzelnen TBM-Komponenten [12] .....	6
Tabelle 3-1: Rahmenbedingungen Baustelle A .....	33
Tabelle 3-2: Rahmenbedingungen Baustelle B .....	36
Tabelle 3-3: Rahmenbedingungen Baustelle C .....	38
Tabelle 3-4: Rahmenbedingungen Baustelle D .....	40
Tabelle 4-1: Vergleich Röhre 1 und Röhre 2 mit 1918 Ringen.....	48
Tabelle 5-1: Bewertung Datengrundlage.....	59



# Abkürzungsverzeichnis

1K-RSVM	Einkomponentenringspaltverfüllmaterial
2K-MS	Zweikomponentenmischsysteme
2K-RSVM	Zweikomponentenringspaltverfüllmaterial
3D	Dreidimensional
6D	Sechsdimensional
BBT	Brenner-Basistunnel
BE-Fläche	Baustelleneinrichtungsfläche
BIM	Building Information Modeling
GVT	Gebirgsverhaltenstyp
KAT	Koralmtunnel
NATM	New Austrian Tunneling Methode
NBS	Neubaustrecke
NÖT	Neue österreichische Tunnelbaumethode
ÖBA	Örtliche Bauaufsicht
RSVM	Ringspaltverfüllmaterial
SBT	Semmering-Basistunnel
SVT-L	Systemverhaltenstyp-Laibung
TBM	Tunnelbohrmaschine
TBM-DS	Tunnelbohrmaschine mit Doppelschild
TBM-S	Tunnelbohrmaschine mit Einfachschild
TIM	Tunnel Information Modeling
TKP	Tunelkette Perschling
TM	Tunnelmeter
VK	Verklausion
VT	Vortrieb



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

*„Um den zukünftigen Mobilitätsbedarf zu decken, braucht es bereits heute die richtigen Weichenstellungen. Das Zielnetz 2040 ist die langfristige Ausbaustrategie für die Eisenbahninfrastruktur in Österreich.“ [1]*

Um die Energiewende zu schaffen, ist die Weiterentwicklung und der Ausbau des Bahnnetzes in den nächsten 15 bis 20 Jahren unerlässlich, wie dieses Zitat der ÖBB-Infrastruktur AG zeigt [1]. Dabei stellen Untertagebauwerke einen zentralen Aspekt der zukünftigen Infrastrukturentwicklung dar und nehmen in Österreich eine besondere Stellung ein. Aufgrund der geographischen Lage Österreichs, die stark von den Alpen geprägt ist, ist der Bau von Tunneln oft notwendig, um den Straßen- und Bahnverkehr nachhaltig und effizient zu gestalten. Zum einen werden Tunnel für den Personenverkehr im innerstädtischen Bereich, wie beim Zukunftsprojekt U-Bahn-Ausbau U2 und U5 [2], gebaut. Darüber hinaus werden größere, überregionale Tunnelbauprojekte, wie der Brenner-Basistunnel [3] und der Semmering-Basistunnel [4], für den Personen- und Güterverkehr realisiert.

Zum anderen werden Tunnel häufig im Bereich von Wasserkraftanlagen gebaut, entweder als Druckrohrleitungen oder als Beileitungstollen, wie es beispielsweise beim Speicherkraftwerk Kühtai [5] der Fall ist. Diese Tunnel spielen eine zentrale Rolle bei der nachhaltigen Nutzung von Wasserressourcen. Sie leiten das Wasser, beispielsweise bei einem Druckstollen, gezielt zu den Turbinen, um das Energiepotenzial effizient auszuschöpfen, oder fassen Wasserquellen, um es mit maximaler Effizienz weiterzuleiten und anschließend das Potenzial voll auszunutzen. Durch den gezielten Einsatz solcher Beileitungstollen, wie sie am Speicherkraftwerk Kühtai [5] gebaut werden, wird der natürliche Wasserhaushalt möglichst wenig beeinträchtigt, während gleichzeitig eine umweltfreundliche und ressourcenschonende Energiegewinnung gefördert wird.

Beim Tunnelbau unterscheidet man im Wesentlichen zwischen zwei Ausbruchsmethoden: dem kontinuierlichen und dem zyklischen Vortrieb. Die Wahl der geeigneten Methode richtet sich dabei maßgeblich nach den geologischen und geotechnischen Gegebenheiten des Baugrunds, der Tunnelgeometrie sowie weiteren quantitativen und qualitativen Faktoren unter Betrachtung der Nachhaltigkeit und Sicherheit. Der kontinuierliche Vortrieb gewinnt zunehmend an Bedeutung, da er im Vergleich zum konventionellen Vortrieb bei optimalen Rahmenbedingungen eine deutlich höhere Vortriebsleistung und Effizienz bietet. Besonders hervorzuheben ist, dass während des Vortriebs auch andere Prozesse, wie der Ringbau und die Ringspaltverfüllung parallel ablaufen können, wodurch es zu einem durchgehenden Vortrieb kommen kann. Diese Methode ist tendenziell ab einer Tunnellänge von 1,5 bis 2,0 Kilometern wirtschaftlich rentabel, da die hohen Investitionskosten bei kürzeren Strecken unter Umständen nicht gerechtfertigt sind. [6,7]

Die Verwendung von Tübbingsegmenten, also vorgefertigten Betonsegmenten, ist eine weit verbreitete Methode zur Sicherung und Stabilisierung von Tunnelbauwerken, die vor allem beim kontinuierlichen Vortrieb bzw. maschinellen Vortrieb zum Einsatz kommt. Trotz der

zahlreichen Vorteile des Tübbingausbaus stellen Tübbingschäden ein häufiges Problem im Tunnelbau dar, das die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit von Projekten erheblich beeinträchtigen kann. Solche Schäden sind häufig auf verschiedene Faktoren zurückzuführen, insbesondere auf die Bettung des Tübbingrings. Eine präzise und gleichmäßige Bettung des Tübbingrings war bereits in den 1980er Jahren und ist auch heute eine grundlegende Voraussetzung, um die volle statische Tragfähigkeit der Tübbingringe zu gewährleisten. Dennoch wird die fachgerechte Verfüllung des Ringspalts bei Tunnelbauprojekten häufig unterschätzt. Dies führt immer wieder zu Problemen und Schäden, welche direkt auf eine unzureichende Ringspaltverfüllung zurückzuführen sind und die langfristige Stabilität und Funktionalität der Bauwerke beeinträchtigen können. [8–10]

## 1.2 Motivation und Ziel

In den letzten Jahren gab es in Österreich mehrere bekannte Tunnelbauprojekte, bei denen eine Vielzahl an Tübbingschäden aufgetreten ist. Diese Vorfälle führten nicht nur zu höheren Kosten und Verzögerungen, sondern weckten auch ein zunehmendes Interesse daran, die Risikofaktoren besser zu verstehen und ggf. präventive Maßnahmen zu entwickeln. Die Forschung zu Tübbingschäden spielt eine wichtige Rolle, um Tunnelbauprojekte besser planen und umsetzen zu können.

Daher werden im Rahmen dieser Masterarbeit, verschiedene ausgewählte Tunnelbauprojekte vergleichbarer Natur und Typologie analysiert. Dabei wird in erster Linie die Datengrundlage der verschiedenen untersuchten Projekte erfasst und evaluiert, um anschließend den Einfluss systembedingter Schäden an Tübbingringen zu untersuchen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird die Schadensziffer der Tübbingsegmente in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren analysiert. Dazu zählen das Tübbingdesign, die Hinterfüllungsmethoden, das verwendete Hinterfüllungsmaterial sowie weitere Parameter.

Die Motivation für dieses Masterarbeitsthema ergibt sich aus der spannenden Kombination von theoretischer Forschung und dem praxisnahen Bezug, der durch die Analyse der ausgewählten Tunnelbauprojekte unter Mitwirkung der Firma Implenia AG gegeben ist. Ziel dieser Arbeit ist es, eine umfassende Schadensanalyse der einzelnen Tunnelbauprojekte durchzuführen, um die Tübbingschäden systematisch auszuwerten. Die Ergebnisse dieser Auswertung sollen als Grundlage dienen, um Tunnelbauprojekte zu optimieren.

## 1.3 Forschungsfrage

Aus der Motivation und dem Ziel dieser Arbeit ergeben sich folgende Forschungsfragen:

1. In welchem Ausmaß treten Schäden bei Tübbingringen in den ausgewählten Tunnelbauprojekten auf?
2. Welche Arten von Tübbingschäden treten bei den einzelnen Tunnelbauprojekten auf, und wie häufig kommen sie vor?
3. Ist eine Vergleichbarkeit der Tunnelbauprojekte hinsichtlich des Ausmaßes der Tübbingschäden möglich?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen ist es erforderlich, zunächst die Datengrundlage hinsichtlich ihrer Qualität und Quantität eingehend zu evaluieren, um anschließend zu prüfen, inwieweit eine bestehende Dokumentation von Schäden sinnvoll ausgewertet werden kann.



## 1.4 Methodik

Im Rahmen der Masterarbeit wird zu Beginn eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der Technik im Bereich der Tübbinge, Ringspaltverfüllung/ Bettung und Tübbingschäden zu erfassen. Hierbei wird zunächst ein allgemeiner Überblick über die verschiedenen Arten von Tübbingringen gegeben, wobei insbesondere auf deren baulichen und strukturellen Merkmale sowie die typischen Schadensbilder eingegangen wird. Zudem wird die Normung im Bereich der Ringspaltverfüllung behandelt, wobei die Unterschiede zwischen den österreichischen und deutschen Normen unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Technik aufgezeigt werden. Abschließend wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich des Tunnel Information Modeling (TIM) gegeben. In diesem Kontext wird kurz der Begriff TIM definiert, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf der Verbindung zwischen TIM und den Tübbingen liegt.

Nach der Aufarbeitung der relevanten Fachliteratur wird anschließend eine Schadensanalyse anhand von vier anonymisierten Tunnelprojekten durchgeführt. Vor Beginn der Schadensanalyse erfolgt zunächst eine sorgfältige Aufbereitung und Evaluierung der Schadensdokumentation. Dabei wird die Verfügbarkeit der Schadensdokumentation sowie deren Quantität und Qualität geprüft. Zudem werden die Rahmenbedingungen für die Analyse aufgezeigt. Abhängig von der Quantität und Qualität der verfügbaren Daten erfolgt anschließend eine umfassende Schadensanalyse der vier Projekte, die eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse einschließt. Abschließend wird ein Fazit und Ausblick über die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit gegeben und darüber hinaus aufgezeigt, wie eine Schadensanalyse von Tübbingsegmente bzw. Tübbingringe durch die Verknüpfung mit einem 3D-Modell optimiert werden könnte.



## 2 Grundlage und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des maschinellen Tunnelbaus erläutert, wobei besonderes Augenmerk auf den Maschinentyp gelegt wird, der in den analysierten Projekten zum Einsatz kam. Weiters wird ein allgemeiner Überblick über Tübbinge gegeben, von der Herstellung, über die verschiedenen Tübbingarten bis hin zu ihrem Einsatz. Neben den grundlegenden Eigenschaften von Tübbingungen wird in diesem Kapitel die Thematik der Ringspaltverfüllung beschrieben. Es wird erläutert, welche Rolle diese im Bauprozess spielt und welche technischen Herausforderungen damit verbunden sind. Ein weiterer Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf den möglichen Schadensarten, die bei Tübbingungen auftreten können. Da sich das Thema TIM zunehmend als ein zentraler Aspekt im modernen Tunnelbau etabliert, wird im abschließenden Teil des Kapitels die Anwendung von TIM in den Bereichen Planung, Konstruktion und Überwachung von Tübbingungen eingehend behandelt.

### 2.1 Maschineller Tunnelbau

Der Tunnelvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine (TBM) ist eine weit verbreitete Methode zur Errichtung von Tunnelbauwerken, die als Alternative zum zyklischen Vortrieb durch Bohren und Sprengen oder zum Einsatz von Tunnelbaggern genutzt wird. Bei dieser Methode erfolgt der Abbau des Gebirges durch einen rotierenden Bohrkopf bzw. Schneidrad. Je nach den geologischen und geotechnischen Bedingungen wird der entstehende Hohlraum entweder durch nachgiebige Ausbaumaßnahmen wie den Einsatz von Ausbaubögen, Bewehrungsmatten, Spritzbeton und Ankern oder durch den Einsatz von Stahlbetonfertigteilen, den sogenannten Tübbingungen, gesichert. Seit den 1950er Jahren wird der Tübbingausbau mit Stahlbetonfertigteilen in Kombination mit geschildeten TBMs oder Schildmaschinen weltweit eingesetzt.

Ein Vergleich der beiden Tunnelbaumethoden, wie in Abbildung 2-1 dargestellt, zeigt, dass der maschinelle Vortrieb mittels TBM ab einer bestimmten Tunnellänge und abhängig von weiteren Faktoren wirtschaftlicher und effizienter ist als der zyklische Vortrieb [11].

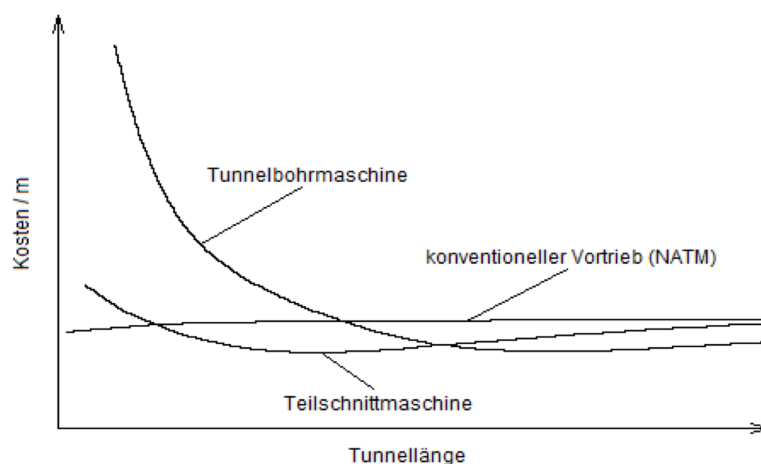


Abbildung 2-1: Vergleich der Kosten der Tunnelvortriebsmethoden in Abhängigkeit von der Tunnellänge [11]

In Abbildung 2-2 ist eine Tunnelbohrmaschine vom Typ TBM-S (Single Shield = Einfachschildmaschine) mit ihren Komponenten und deren Aufgaben (Tabelle 2-1) dargestellt, da auf mehreren der in dieser Masterarbeit untersuchten Tunnelbaustellen eine solche TBM zum Einsatz kam.

[1] Räumer	Nehmen das Bohrklein auf und fördern es durch die Drehung des Bohrkopfes über rückseitige Kanäle zum Muckring
[2] Bohrkopf	Hartgesteinsschneidrollen brechen durch Rotation und hohen Anpressdruck Felschips aus der Ortsbrust
[3] Muckring	Das von den Räumern aufgenommene Bohrklein fällt durch den trichterförmigen Muckring auf das Förderband
[4] Schildmantel	Sorgt speziell in nachbrüchigen Gebirgen für hohe Sicherheit und Maschine
[5] Maschinenband	Fördert das Bohrklein vom Zentrum des Bohrkopfs zu nachgelagerten Fördereinrichtungen
[6] Vortriebszylinder	Am Umfang angeordnete Hydraulikzylinder drücken den Schild vom zuletzt gebauten Tunnelring vorwärts
[7] Tübbingerektor	Fernbedienter, verfahrbarer Manipulator zum Versetzen der Tübbingsegmente beim Ringbau
[8] Ringspaltverfüllung	Der Ringspalt zwischen Gebirge und Auskleidung wird kontinuierlich mit Mörtel und/oder Perlkies verfüllt

Tabelle 2-1: Erläuterung der einzelnen TBM-Komponenten [12]

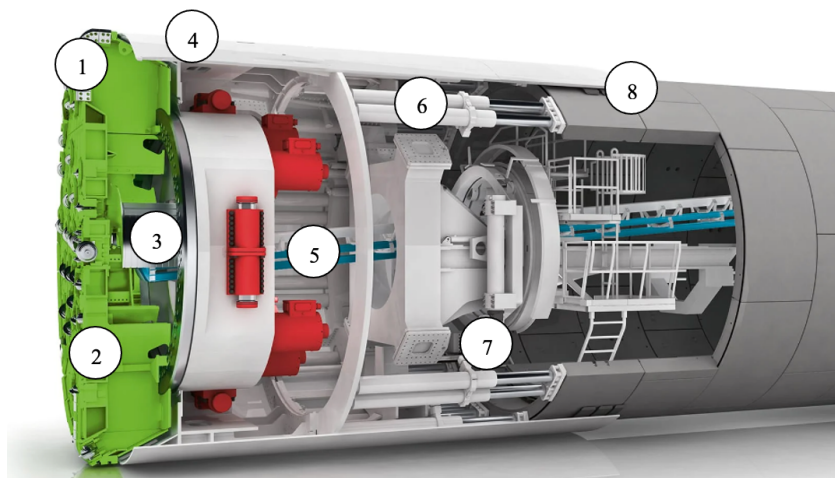


Abbildung 2-2: Darstellung einer TBM-S mit Bestandteilen (verändert) [12]

Der Durchmesser des Schildes einer TBM ist kleiner als der erbohrte Hohlraum, wodurch ein notwendiger Spalt entsteht, der eine präzise Steuerung der Maschine ermöglicht [10]. Die Stabilisierung des Gebirges sowie der Tunnelausbau erfolgen anschließend durch den Einbau von Tübbingsegmente, die im Schutz des Schildes platziert werden. Um die Anpresskraft und das Drehmoment der Maschine vollständig übertragen zu können muss der Tübbingring vollständig zusammengesetzt sein. Daher ist der Vortriebsprozess bei einer TBM vom Typ TBM-S auf die Verfügbarkeit des Tübbingrings angewiesen. Ein solcher Ring setzt sich aus vier bis acht vorgefertigten Betonsegmenten zusammen. Während des Einbaus der Tübbinge wird der Bohrvorgang mit der Einfachschildmaschine unterbrochen und erst nach dem vollständigen Einbau wieder aufgenommen. Der verbleibende Zwischenraum zwischen Betontübbing und Gebirge, auch als Ringspalt bezeichnet, wird im Bereich der Sohle in der Regel mit Mörtelsuspension und im Firstbereich überwiegend mit Perlkies verfüllt. [13,14]

## 2.2 Überblick Tübbinge

Die folgende Abbildung zeigt eine schematische Darstellung eines Tübbingsystems, welche die wichtigsten Begriffe veranschaulicht, um einen groben Überblick über den Aufbau eines Tübbinrings zu bekommen.

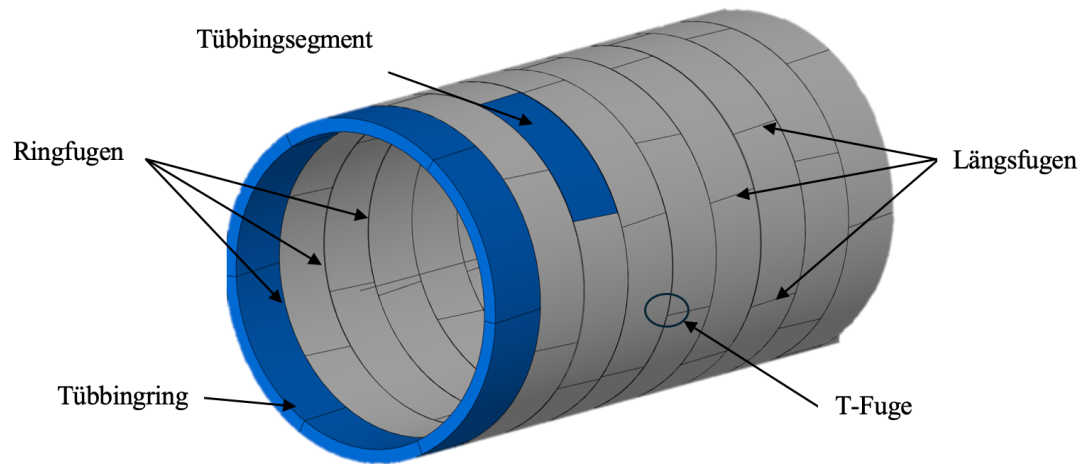


Abbildung 2-3: Darstellung Tübbingsystem [15]

Die Bauteilgeometrien der Fertigbetonsegmente variieren oft erheblich zwischen verschiedenen Projekten. Dennoch muss jedes Segment, sowohl einzeln als auch im gesamten Ausbauring, sämtliche Anforderungen hinsichtlich Hohlraumstabilität, der Aufnahme von Belastungen durch Eigengewicht sowie Bau- und Endzustände, und der Gebrauchstauglichkeit erfüllen. Dies stellt hohe Anforderungen an die Herstellung, die geringe Fertigungstoleranzen zulässt. Darüber hinaus schreiben die Richtlinien für Tübbingsysteme aus Beton [16] vor, dass die Rissweite im eingebauten Zustand, je nach Anforderungsklasse, begrenzt werden muss, um die Dauerhaftigkeit zu gewährleisten und Korrosion der Bewehrung zu verhindern. Wird die zulässige Rissweite überschritten, muss das betroffene Tübbingsegment aufwendig saniert werden. [16]

### 2.2.1 Ringtypen

Die nachfolgende Abbildung 2-4 bietet einen Überblick über die grundlegende Einteilung der Betontübbinge in verschiedene Ringtypen.

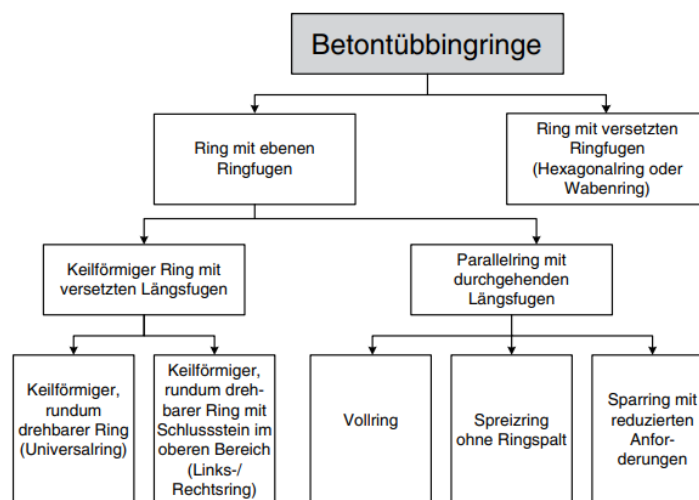


Abbildung 2-4: Klassifizierung der Betontübbinge in Ringtypen [17]

- **Keilförmige Tübbingringe (Universalring):**

Um bei Bogenfahrten sowohl im Grundriss als auch im Aufriss eine spannungsfreie Montage der Tübbingsegmente sicherzustellen, muss die Geometrie der Ringe entsprechend angepasst werden. Das bedeutet, dass die Breite der Tübbingringe in Längsrichtung des Tunnels auf der Außenseite der Krümmung leicht vergrößert und auf der Innenseite entsprechend leicht verkleinert werden muss. Beim geradlinigen Vortrieb entlang der Längsachse des Tunnels müssen die Tübbingringe jedoch stets um 180 Grad versetzt eingebaut werden, um eine präzise Ausrichtung und einen gleichmäßigen Geradeauslauf der TBM zu gewährleisten. Die einfachste Methode zur Umsetzung dieser Anpassung ist die Verwendung von konischen bzw. keilförmigen Tübbingringen, die bei der Montage beliebig gegeneinander verdreht werden können. Der Tübbingring kann entweder als Universalring (Abbildung 2-5) ausgeführt werden oder alternativ als links- und rechtskeilförmiger Ring (Abbildung 2-6) gestaltet sein. Durch die willkürliche Positionierung des Schlusssteins kann dieser auch in der Sohle liegen. In diesem Fall muss der Ringbau mit dem Tübbing an der Firste beginnen, der dann ausschließlich durch die Pressenbeaufschlagung stabilisiert und gehalten wird. Ein wesentlicher Vorteil vom Universalring liegt in der Herstellung der Tübbingsegmente, da die Produktionskosten durch den reduzierten Aufwand für Schalungen und Logistik äußerst wirtschaftlich gestaltet werden können. [17–19]

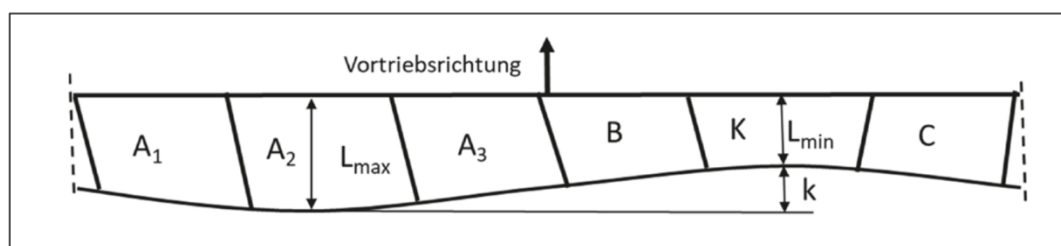


Abbildung 2-5: Prinzipskizze eines Universalrings mit schrägen Längsfugen [18]

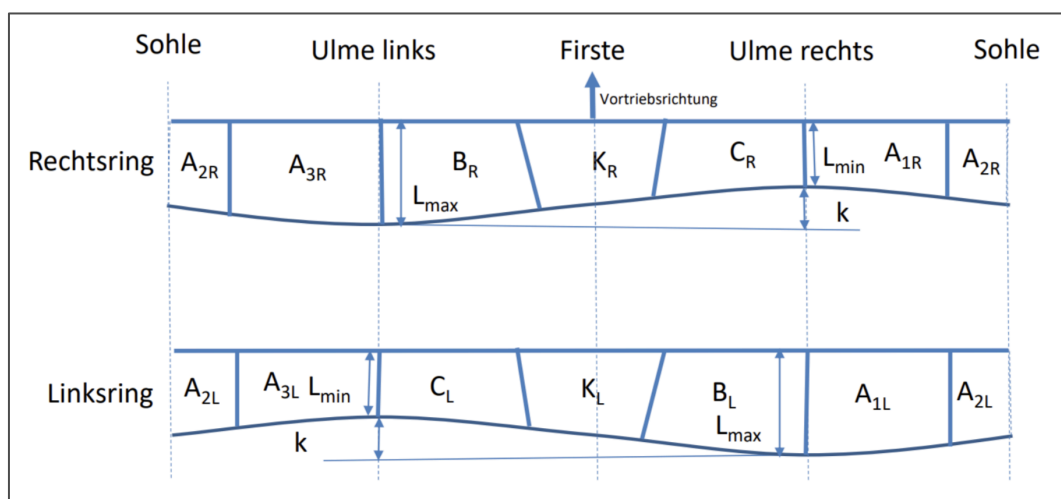


Abbildung 2-6: Skizze links- und rechtskeilförmiger Ring [18]

- **Parallelringe:**

Ringe ohne Keilform, sogenannte Parallelringe, haben über ihren gesamten Umfang eine einheitliche Breite, wodurch die Ringfugen parallel zueinander verlaufen. Dies bedeutet jedoch, dass solche Tübbingringe nicht für den Bau von Kurven geeignet sind

und möglicherweise der Spur der TBM nicht folgen können (siehe Abbildung 2-7). Dies kann zu Zwängen und Schäden am Ring im Schildschwanzbereich führen. Parallelringe sollten daher nur in Ausnahmefällen verwendet werden, z. B. für spezielle Ringe mit Einbauteilen, die an einer fest vorgegebenen Position angebracht werden müssen. Um Kurvenfahrten mit dem Parallelringsystem zu ermöglichen, ist eine Kombination der Parallelringe mit sogenannten Korrekturringen erforderlich. Die erforderlichen Korrekturen werden dabei durch eine gezielte Schiftung in der Ringfuge realisiert. [17–19]

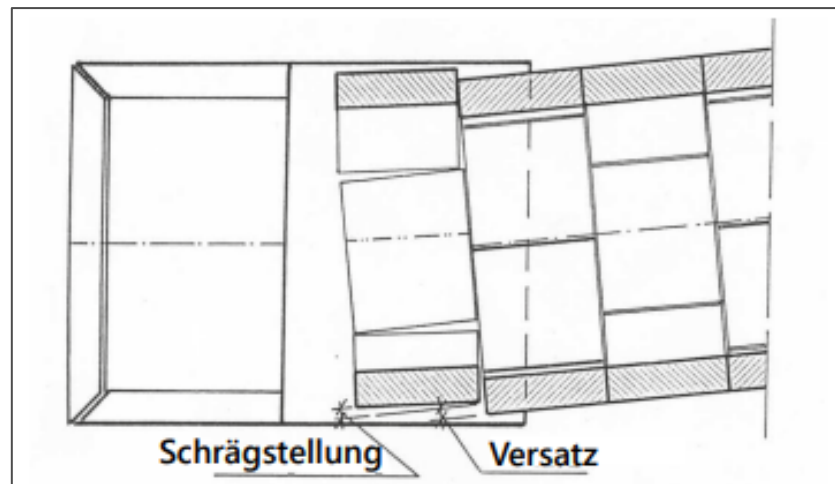


Abbildung 2-7: Prinzipskizze Parallelringe mit Versatz beim Einbau [18]

- Sparttübblingringe:**  
 Der Sparttübbling wird dort eingesetzt, wo die Hauptbelastung erst nach dem Einbau einer Innenschale eintritt, wie etwa bei Vortrieben unter Grundwasserabsenkung oder in quellendem Gebirge. Schäden am Tübblingring sind tolerierbar, solange die Standsicherheit gewährleistet bleibt. Alternativ kann dieser Ringtyp auch in Situationen verwendet werden, in denen er nach temporärer Nutzung wieder entfernt wird, beispielsweise beim Durchfahren von nicht ausgehobenen Baugruben für Schacht- oder Bahnhofsbauwerke. [17–19]
- Spreiztübblingringe:**  
 Spreiztübblingringe dienen im zweischaligen Ausbau als einfache Ausbruchssicherung. Sie werden im vereinfachten Schildschwanz ohne Dichtung mit einem keilförmigen Schlusstein vorinstalliert. Nach dem Passieren des Schildschwanzes wird der Schlusstein weiter eingeschoben, wodurch der Ring gespreizt und an das Gebirge angelegt wird, was eine Ringspaltverfüllung überflüssig macht. Diese Ringe eignen sich jedoch nur für standfesten und nicht wasserführenden Baugrund. Für einen wasserdichten Tunnel sind während der Bauzeit eine Grundwasserhaltung sowie eine Innenschale für den Endzustand erforderlich. [17–19]
- Hexagonal- oder Wabentübblingringe:**  
 Es existieren auch Tübbingsysteme, bei denen die einzelnen Tübbingsegmente eines Rings in Tunnellängsrichtung gegeneinander versetzt angeordnet sind, wie bei hexagonalen oder wabenförmigen Tübblingringen. Diese Systeme, die keine durchgehenden Ringfugen bilden, werden in Europa jedoch nur selten verwendet und weisen mehrere Nachteile auf. Beispielsweise ist die Realisierung von Kurvenfahrten mit versetzten Ringfugen schwierig. Zudem erweist sich die Abdichtung der Fugen mit

Fugenbändern bei diesen Systemen als unpraktikabel. Aus diesen Gründen bleibt der Einsatz von Tübbingauskleidungen mit versetzten Ringfugen auf Sonderfälle beschränkt. [17–19]

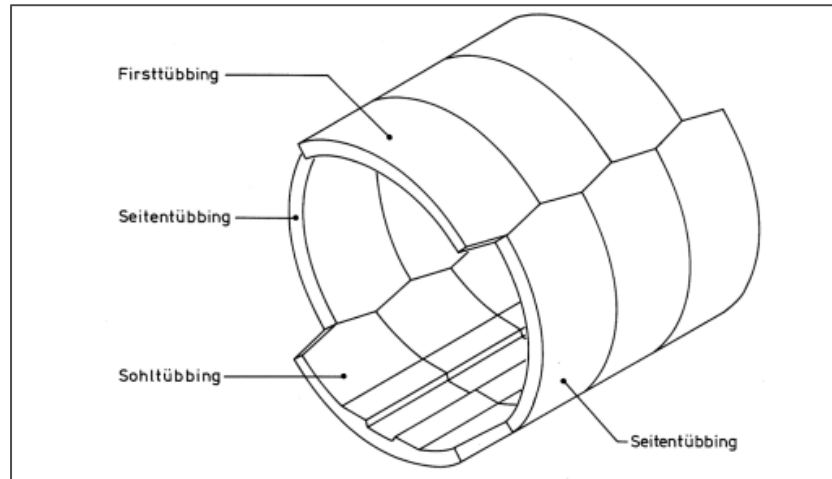


Abbildung 2-8: Prinzipskizze Hexagonal-tübbingringe [19]

### 2.2.2 Ein- und Zweischaliger Ringausbau

Beim Tübbingausbau im Tunnelbau unterscheidet man generell zwischen zwei Arten: dem einschaligen und dem zweischaligen Ringausbau. Die einschalige Tunnelauskleidung hat sowohl im Bau- als auch im Endzustand folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Sie stabilisiert das Gebirge, um Nachbrüche zu verhindern;
- Sie sorgt für die Abdichtung des Tunnels gegen Grund- und Bergwasser;
- Sie trägt die Lasten durch das Eigengewicht, die Auflasten, das Gebirge und das Grundwasser ab;
- Sie dient als Befestigungssystem für Ausrüstungsteile wie Oberleitungen, Beleuchtung und Lüftungsanlagen während und nach der Bauphase;
- Sie nimmt während der Bauphase die Vortriebs- und Steuerkräfte der TBM auf;

Da bei diesem Ausbau sogenannte Kompressionsdichtungsrahmen zum Einsatz kommen und keine zusätzlichen Abdichtungen vorgesehen sind, ist es entscheidend, dass die Tübbingsegmente gemäß den vorgegebenen Toleranzen exakt an den dafür vorgesehenen Stellen eingebaut werden. Beim einschaligen Ausbau von Tunnelbauwerken werden die einzelnen Bauelemente in den Längsfugen und Ringfugen während der Montage durch Schrauben und Dübel miteinander verbunden. Diese Verbindungen werden jedoch, mit Ausnahme der Bereiche um Querschläge und Portale, wieder gelöst, sobald der Mörtel im Ringspalt ausgehärtet ist. In den Querschlags-Bereichen, in denen die Verschraubungen meist dauerhaft bestehen bleiben, müssen korrosionsbeständige Schrauben verwendet werden.

Bei zweischaligem Ringausbau erfolgt eine klare Trennung der funktionalen und konstruktiven Aufgaben der beiden Schalen. Die äußere Schale, die während des maschinellen Vortriebs eingebaut wird, ist auf den zu erwartenden Gebirgsdruck ausgelegt und sorgt sofort für die Stabilität des aufgefahrenen Hohlraums. Sie erfüllt in der Regel keine Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit oder Wasserdichtigkeit. Diese Anforderungen werden erst durch die später installierte Innenschale, die als endgültige Auskleidung dient, erfüllt. In druckwasserhaltenden Tunneln ist die Innenschale auf den bestehenden Wasserdruck ausgelegt und übernimmt zusätzlich die Aufgabe, den Gebirgsdruck dauerhaft zu tragen, insbesondere wenn die Außenschale über den gesamten Nutzungszeitraum des Tunnels hinweg nicht



ausreichend standsicher bleibt. Dies kann beispielsweise bei der Zersetzung der Außenschale durch aggressives, betonangreifendes Bergwasser der Fall sein. Zur Vermeidung unnötiger Zwangsbeanspruchungen wird zwischen der Innen- und Außenschale in der Regel eine konstruktive Trennung vorgenommen, häufig durch eine Folie. In abgedichteten Tunneln übernimmt eine Abdichtungsbahn diese Funktion. Dies stellt einen erheblichen Vorteil im Vergleich zur einschaligen Ausbauweise dar. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass im Brandfall die Innenschale als erste den Brand abfangen muss. Folglich ist nach einem Brand lediglich die Innenschale zu erneuern. Jedoch ist die zweischalige Bauweise ebenfalls mit Nachteilen verbunden. Zum einen verlängert sich die Bauzeit und es entstehen zusätzliche Kosten, da die Errichtung beider Schalen separat und nacheinander erfolgt. Zum anderen gestaltet sich die präzise Lokalisierung von Leckagen nach dem Einbau der Innenschale als problematisch. [18–22]

### 2.2.3 Fugenausbildung

Die Fugenausbildung spielt beim Tunnelausbau mittels Tübbinge eine entscheidende Rolle, da sie sowohl in Längs- als auch in Umfangsrichtung hohe, konzentrierte Kräfte übertragen müssen, ohne die Betonkonstruktion zu beschädigen. Daher sind eine sorgfältige Planung und konstruktive Gestaltung der Fugen unerlässlich. Ecken und Kanten, die nicht durch Bewehrung gesichert sind, müssen durch geeignete geometrische Maßnahmen wie Rücksprünge oder Abfasungen entlastet werden. Zudem sind Kerben und Kerbwirkungen in den lastübertragenden Fugenbereichen zu vermeiden. Auch die Toleranzen bei der Herstellung und dem Einbau müssen berücksichtigt werden. Bei der Planung und beim Einbau der Tübbingringe ist im speziellen bei den Ringfugen darauf zu achten, dass die Pressschuhe der Vortriebspressen nicht in der Nähe der Längsfugen auf die Fugen einwirken. [17,18] Im Folgenden werden die verschiedenen Arten von Fugen dargestellt und erläutert.

#### Längsfugen:

Die Längsfugen (siehe Abbildung 2-3) übertragen hauptsächlich die Ringschnittkräfte, die durch äußere und innere Einwirkungen entstehen. Zudem müssen an diesen Fugen die Vorspannkräfte aufgebracht und gehalten werden, die zur Komprimierung der Dichtungsrahmen erforderlich sind. Bei den Längsfugen werden folgende Fugenformen in Anlehnung an [12] unterschieden und in Abbildung 2-9 dargestellt:

- Ebene Längsfuge
- Konvex-Konvexe Längsfuge
- Konkav-Konvexe Längsfuge
- Nut- und Federlängsfuge

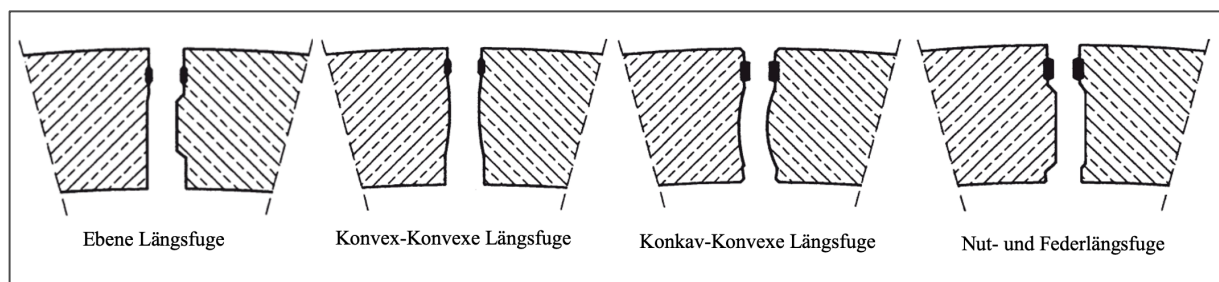


Abbildung 2-9: Längsfugenformen (verändert) [23]

Beim Konzept des einschaligen Tübbingrings hat sich die Verwendung der Ebenen Längsfuge als Standard etabliert. Die Nut-Feder-Konstruktion bietet im Ringbau keine signifikante Vereinfachung, da aufgrund der erforderlichen Betonüberdeckung die Bewehrung der

Elemente nahezu unmöglich ist. Dadurch kann die sichere Übertragung der Koppelkräfte nicht gewährleistet werden. Bei den anderen beiden Fugenformen kann zwar eine gute Druckkraftübertragung über die Fuge erfolgen, jedoch kann nur ein geringes Biegemoment aufgenommen werden. Dies führt dazu, dass der Ring insgesamt stärker verformbar ist. Darüber hinaus erschweren Konkav-Konvexe und Konkav-Konvexe Fugen den Ringbau erheblich. [17]

### Ringfugen:

Die Ringfugen (siehe Abbildung 2-3) dienen zur Übertragung der Vortriebskräfte der TBM sowie der Koppelkräfte zwischen den einzelnen Ringen. Bei der Bemessung muss auch die ungleichmäßige Belastung berücksichtigt werden, die durch Steuerkräfte bei Richtungsänderungen der TBM entstehen. Für die Gestaltung der Ringfugen sind verschiedene Fugenformen üblich [18]:

- Ebene Fuge
- Ebene Fuge mit Topf-Nocke als Koppel- bzw. Zentrierelement
- Nut- und Federfuge

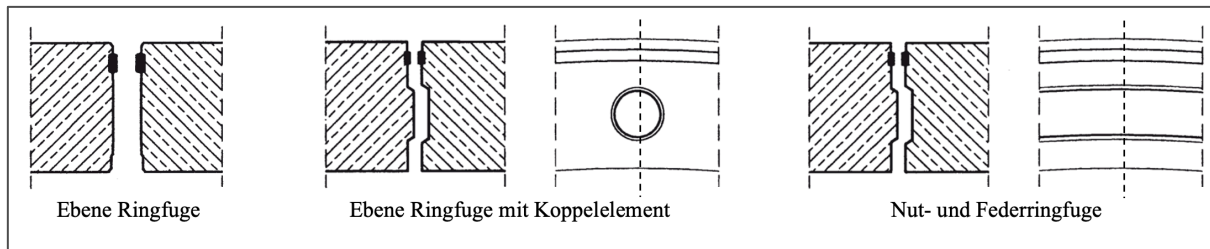


Abbildung 2-10: Ringfugenformen (verändert) [23]

Wie bereits bei der zuvor beschriebenen Längsfuge hat sich auch bei den Ringfugen die ebene Fuge als Standard etabliert. Bei den ebenen Ringfugen besteht die Möglichkeit, zusätzliche Zentrier- und Verbindungselemente einzubauen, wie beispielsweise Dübel, Zentrierkonen oder verzahnte Elemente in Form von bewehrten oder unbewehrten Topf-Nocken.

Auf Basis der Erkenntnisse und Empfehlungen für den Entwurf von Tübbingringen [18] wird empfohlen, eine Topf-Nocke-Verzahnung nur dann einzusetzen, wenn eine ausreichende Bautoleranz von mindestens 15 mm vorgesehen ist, um das Risiko von Abplatzungen und Ausbrüchen zu minimieren. Die Verwendung einer Nut-Feder-Verbindung in der Ringfuge erfordert besonders hohe Präzision beim Ringbau. Obwohl die Nut in der Regel größer als die Feder gefertigt wird, kann es bei verschobenen Ringen während des Vorschubs häufig zu Abplatzungen kommen.

Um Unebenheiten auszugleichen, sollten in den Ringfugen Zwischenlagen aus Hartfasermaterial oder Sperrholz integriert werden. Der Einsatz von plastisch verformbaren Zwischenlagen, wie beispielsweise bituminösen Plättchen, ist in diesem Zusammenhang nicht empfehlenswert. Diese Materialien neigen dazu, unter Belastung plastisch zu verformen und somit die vorgesehene Distanz nicht konstant zu halten. Alternativ kann auf Zwischenlagen verzichtet werden. In diesem Fall ist jedoch eine besonders hohe Präzision bei der Herstellung der Tübbingsegmente erforderlich, um die gewünschte Passgenauigkeit zu gewährleisten. [17–19]

### 2.2.4 Abdichtung bei Tübbingsystemen

Die Tübbingfugen müssen dem an der Tunnelröhre anliegenden Wasserdruck standhalten und entsprechend abgedichtet werden. Bei Tunnelbauwerken mit einschaligem Ringausbau erfolgt dies durch den Einsatz von Elastomer-Dichtungsrahmen (siehe Abbildung 2-11). Diese Dichtungsrahmen werden entweder in eine umlaufende Nut des fertiggestellten Tübbings eingeklebt oder während des Betoniervorgangs im Tübbingbeton verankert. Beim Bau des Rings werden die benachbarten Tübbingsegmente so zusammengedrückt, dass ihre integrierten Dichtungsrahmen gegeneinandergedrückt werden. Dadurch werden die Fugen abgedichtet. [24] Da die Abdichtungsleistung ausschließlich auf der Kompression der Dichtungsrahmen beruht, ist es essenziell, dass der erforderliche Kompressionsdruck über den gesamten Rahmen hinweg gleichmäßig vorhanden ist, um dem einwirkenden Wasserdruck standzuhalten. Dies gilt sowohl für die Fuge zwischen den Dichtungsrahmen als auch für die Kontaktflächen zum Beton. Allerdings gibt es speziell an Kreuz- oder T-Fugen ein höheres Risiko für Undichtigkeiten. Bei Verkehrstunneln sind Wasserzutritte, die rinnen oder tropfen, grundsätzlich nicht erlaubt. Bei Schienenverkehrstunneln muss zudem sichergestellt werden, dass kein Wasser auf stromführende Teile, einschließlich der Schienen, gelangt. In Druckstollen oder Versorgungstunneln können hingegen, je nach spezifischen Gegebenheiten, weniger strenge Anforderungen an die Abdichtung gelten. [18]



Abbildung 2-11: Tübbing mit eingebautem Dichtungsrahmen (verändert)[25]

Es werden zwei Arten von Dichtungsprofilen eingesetzt: eingeklebte und verankerte. Die eingeklebten Dichtungen werden in vorgeformte Nuten im Beton eingefügt, um eine stabile Positionierung während des Baus und im eingebauten Zustand zu gewährleisten, wodurch die Dichtwirkung entsteht. Verankerte Dichtungsprofile verfügen über Verankerungselemente an ihrer Unterseite, die sie fest im Beton verankern. Diese Profile werden bereits vor dem Betonieren in die Schalungen eingelegt. Der Vorteil der verankerten Profile besteht darin, dass nachträgliche Klebearbeiten entfallen und das Risiko von Ablösungen während des Transports und der Lagerung minimiert wird. Allerdings sind sie bei Reparaturen schwieriger zu handhaben. Die Dichtheit der Fugen wird durch die Kompression der Dichtungsrahmen beim Ringbau erreicht, wobei die Rückstellkraft der Dichtungen im Laufe der Zeit aufgrund der Spannungsrelaxation abnimmt. Für eine langfristige Dichtwirkung sind die Materialbeständigkeit und die Erhaltung der notwendigen Kompression entscheidend. Weiters, wie in Abbildung 2-12 ersichtlich, sind der Grundabstand der Nut, die Tiefe der Nut sowie der

Versatz wesentliche Parameter, um nach dem Einbau der Tübbingsegmente die geforderten Eigenschaften, insbesondere die Dichtheit, sicherzustellen.[18]

Weitere detaillierte Informationen zur Anwendung und Funktion von Dichtungsrahmen sind der einschlägigen Fachliteratur [24,26] zu entnehmen.

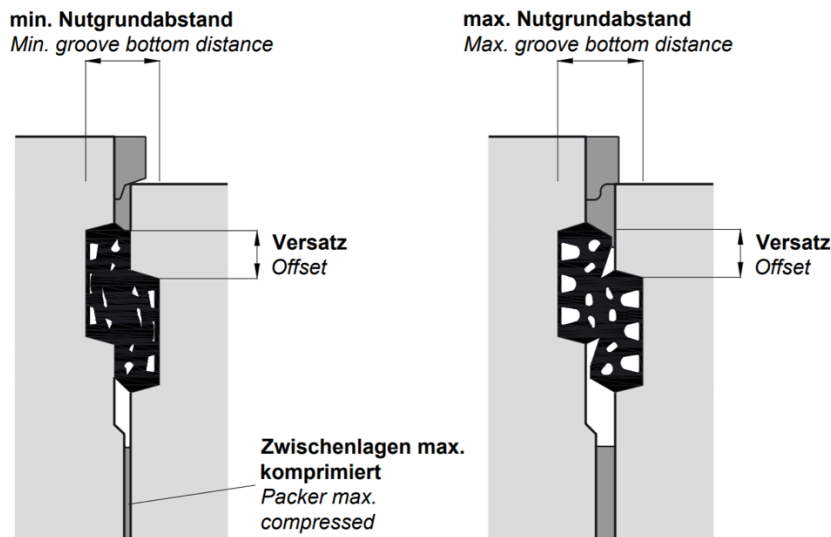


Abbildung 2-12: Grundabstand der Nut und Versatz [24]

## 2.2.5 Herstellung und Material von Tübbingsegmenten

Bei der Herstellung von Tübbingsegmenten, wie auch bei der Fertigung von anderen Betonteilen, ist aus ökonomischen Gründen entscheidend, die Ausschaltfrist so kurz wie möglich zu halten. Um dies zu erreichen, wird Energie in Form von Wärme zugeführt, die eine beschleunigte Festigkeitsentwicklung des Betons fördert. Ein exemplarischer Ablauf einer solchen Wärmebehandlung ist in der nachfolgenden Abbildung 2-13 dargestellt. Die Produktionstechnik ähnelt derjenigen in einem konventionellen Fertigteilwerk, wobei die Produktionsanlagen entweder als stationäre Fertigungsanlagen (Standfertigung) oder als Umlauffertigungsanlagen ausgeführt werden können. [27]

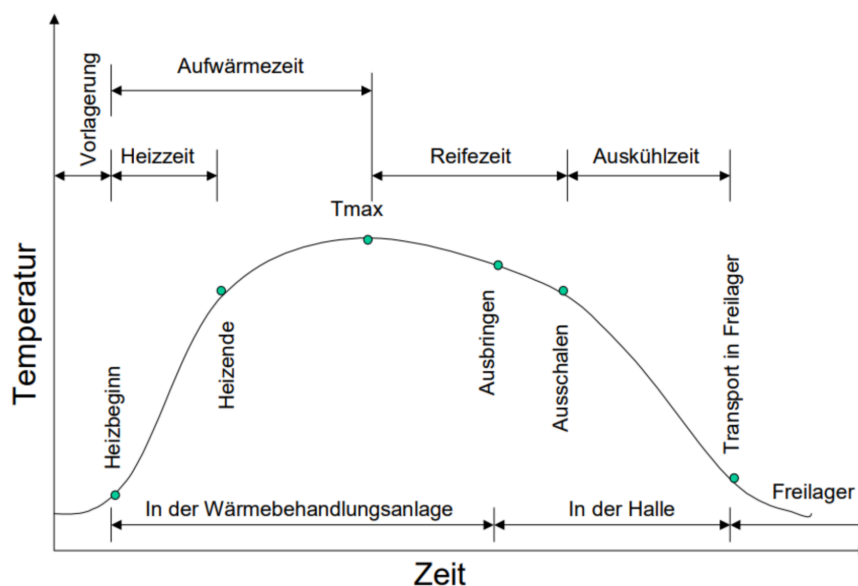


Abbildung 2-13: Überblick über den Ablauf der Wärmebehandlung [27]



**Standproduktion:**

In der Standproduktion bzw. Standfertigung (siehe Abbildung 2-14) werden die Schalungen für die Tübbingsegmente fest an einem fixen Ort innerhalb der Produktionshalle positioniert. Es wird empfohlen, die Schalungen durch ein Elastomerlager von der Betonbodenplatte zu isolieren, um sicherzustellen, dass die Vibrationsenergie der Rüttler vollständig in den frischen Beton übertragen wird. In diesem Fertigungsverfahren werden alle Materialien (wie Bewehrung, Einbauteile, Trennmittel und Beton) direkt zur Schalung transportiert. Der Beton kann entweder mittels Kübel oder direkt aus dem Fahrmischer in die Schalung eingegossen werden. Um die Erhärtung des Betons zu optimieren, werden Heizleitungen unter den Schalungen verlegt. Diese Fertigungsmethode ist besonders geeignet, wenn ein schneller Produktionsstart erforderlich ist, die Produktionsdauer kurz ist (zwischen 1 und 1,5 Jahren) oder die Tübbingsegmente für ein einzelnes Projekt gefertigt werden sollen. [18,28]



Abbildung 2-14: Standfertigung mit Kübel (links) und mit Fahrmischer (rechts) [29]

**Umlaufproduktion:**

Bei diesem Verfahren bewegen sich die Schalungen wie zuvor genannt auf einer Bahn (Karussell), die den Transport der Schalungen möglichst sanft und ruckelfrei ermöglichen sollte. In der Umlauffertigung durchlaufen die Schalungen einen strukturierten Prozess, der mehrere Arbeitsschritte umfasst, um eine effiziente Produktion sicherzustellen. Zunächst werden in der Arbeitslinie alle erforderlichen Tätigkeiten durchgeführt, einschließlich des Ausschalens, der Reinigung, des Bewehrns und des Betonierens. Anschließend werden die Schalungen auf einem Wagen, der sich entlang der Bahnen des Härtetunnels bewegt, zur nächsten Station transportiert. Im Härtetunnel, der in der Regel in drei unterschiedliche Temperaturzonen unterteilt ist, werden die Schalungen gezielt und gleichmäßig ausgehärtet. Nachdem der Aushärtungsprozess abgeschlossen ist, werden die Schalungen zurück auf den Wagen gezogen und zur Arbeitslinie zurückgebracht, um den Produktionszyklus zu wiederholen. [18,28]

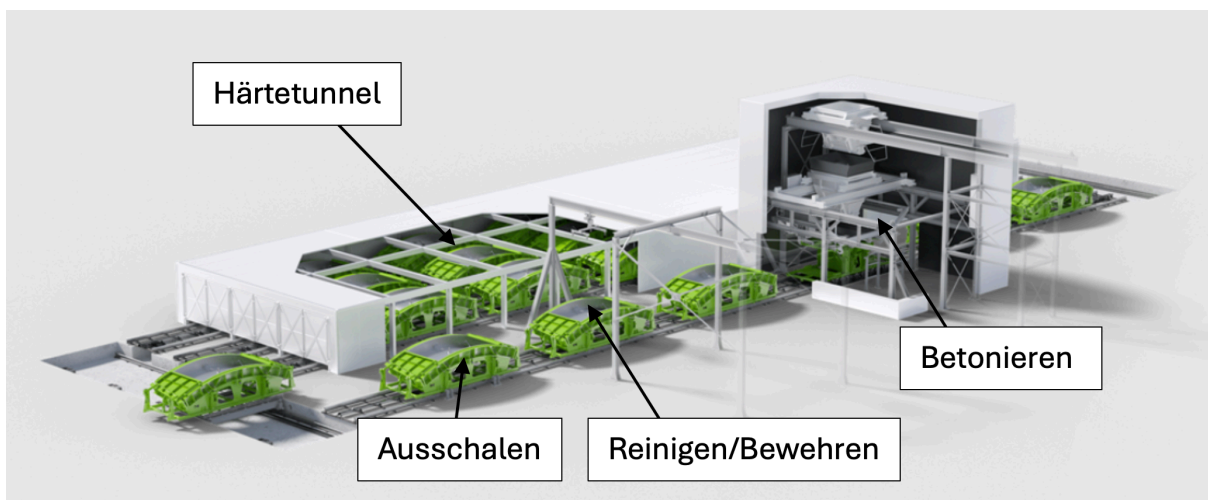


Abbildung 2-15: Umlauffertigung (verändert) [29]

Der Produktionsausstoß ist stark von den jeweiligen Rahmenbedingungen abhängig. In Umlaufanlagen werden Schalungen im Durchschnitt 2 bis 2,5 Mal pro Tag genutzt, während in der Standfertigung durchschnittlich 2 Belegungen pro Tag erreicht werden. Unter optimalen Bedingungen können in der Standfertigung jedoch bis zu 3,25 Zyklen pro Tag erzielt werden. Die sorgfältige Auswahl der geeigneten Produktionsmethode, basierend auf einer umfassenden Analyse und Bewertung der spezifischen Projektsituation, bildet die Grundlage für eine zuverlässige und ökonomische Tübbingproduktion. [30]

Im Vergleich zur Umlauffertigung erfordert die Standfertigung einen höheren Personaleinsatz, während die Umlauffertigung zwar mit höheren Investitionskosten verbunden ist, jedoch durch eine höhere Automatisierung besticht. Zudem kann bei der Umlauffertigung, dem sogenannten Karussellsystem, die Anlage problemlos auf unterschiedliche Ringdurchmesser umgerüstet werden, was ihre vielseitige Einsatzfähigkeit unterstreicht. [18,28]

Bei der Auswahl des geeigneten Betons für die Tübbingsegmente ist es wichtig, zwischen der ein- und zweischaligen Ringbauweise zu unterscheiden. Während bei der einschaligen Bauweise Tübbingsegmente mindestens aus Beton der Festigkeitsklasse C 35/45 bestehen müssen, ist bei der zweischaligen Bauweise eine Mindestdruckfestigkeit des Betons von C 25/30 ausreichend. Unabhängig von den statischen Berechnungen, die möglicherweise keinen oder nur einen sehr geringen Bewehrungsquerschnitt erfordern, muss gemäß den Vorgaben der ZTV-ING „Tunnelbau“ [31] sowie der Richtlinie DB-Ril [32] stets eine Mindestoberflächenbewehrung vorgesehen werden. Besonders im Bereich von Querschlägen ist die Bewehrung zu verstärken und anders zu verlegen, da durch den Abschnitt für den Querschlag die statische Ringfunktion nicht mehr vollständig gewährleistet ist. [31]

Für die Bewehrung kommen geschweißte Bewehrungskörbe, in der Regel aus Betonstahl der Güte B550 (mit einer Streckgrenze von 550 MPa), zum Einsatz. Deren Fertigung lässt sich durch den Einsatz automatisierter Herstellungsverfahren effizient optimieren. Die Automatisierung erfolgt mittels eines Schweißroboters, der durch seine hohe zeitliche Verfügbarkeit einen wesentlichen Vorteil bietet. Darüber hinaus garantiert diese Automatisierung eine präzise Einhaltung der vorgegebenen Positionierung der zu verschweißenden Kreuzungspunkte, was wiederum die hohen Anforderungen an die Genauigkeit und Qualität der Bewehrung erfüllt. Um die hohe Qualität sicherzustellen, erfolgt die Herstellung der Stahlbetontübbinge nach einem präzise definierten Verfahren. Darüber hinaus ist es unerlässlich, dass während des Produktionsprozesses die Maßgenauigkeit der Schalung sichergestellt wird. [18,21]

### 2.2.6 Beanspruchung von Tübbingen während der Bauphase

Beim Vortrieb mit einer TBM mit Schild werden die Tübbingsegmente unter dem Schutz des Schildschwanzes der TBM zu Ringen zusammengesetzt. Diese Ringe werden in einer möglichst zentrierten Position relativ zum Schildschwanz montiert und in versetzter Anordnung angeordnet. Die Verbindung der einzelnen Ringelemente untereinander kann durch verschiedene Kopplungssysteme, wie das häufig genutzte Topf-Nocke-System oder das Nut-Feder-System, sowie durch temporäre Verschraubungen gewährleistet werden. Dadurch wird ein Ausgleich der Verformungen der Ringe erzielt, die aufgrund der unterschiedlichen Belastungen während des Vortriebs sowie der verschiedenen Anordnungen der Längsfugen der benachbarten Ringe entstehen. Immer häufiger werden sogenannte Zentrierhilfen verwendet, um den Einbau zu erleichtern und die Verbindung bei glatten Fugen zu unterstützen. Diese Systeme funktionieren allein durch Reibung in der Fuge, ohne die Kombination von Form- und Kraftschluss, wie es beispielsweise beim Topf-Nocke-System der Fall ist.

Die Belastungen auf die Ringe  $n$  bis  $n-2$  (Abbildung 2-16) während des Vortriebs stellen sich wie folgt dar:

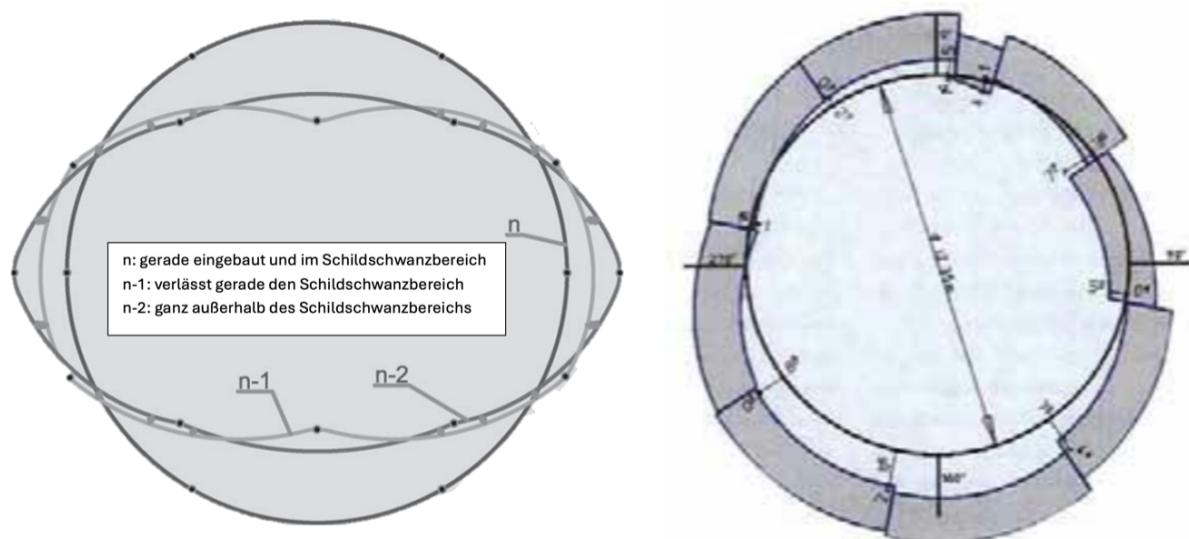


Abbildung 2-16: Ovalisierung und Konvergenzen der Tübbingringe (verändert) [16,33]

Während der Ring  $n$  gerade im Schutz des Schildes verbaut wurde und sich die Vortriebspresen an diesem Ring abstützen, verlässt Ring  $n-2$  bereits vollständig den Schutz des Schildschwanzes, während der Ring  $n-1$  noch teilweise geschützt ist. Der Ring  $n-2$  ist bereits den Erd- und Wasserdruckkräften vollständig ausgesetzt, während der Ring  $n-1$  noch vorwiegend durch den Druck der Verpressung im Ringspalt belastet wird. Dies führt häufig zu einer Verformung des Rings  $n-1$ , der dadurch eine ovale Form annehmen kann, oder zu Verschiebungen der Segmente gegeneinander bei unzureichender Ringbettung, wie in Abbildung 2-16 rechts dargestellt. Da der Ring  $n-1$  sich teilweise noch unter dem Schildschwanz befindet und die Kräfte der Verpressung nur auf einen Teil wirken, kommt es zum sogenannten "Tulpen-Effekt". Dieser Effekt tritt auf, wenn die einzelnen Tübbingsegmente durch äußeren Druck oder ungleichmäßige Belastungen im Boden, sich beginnen an den Fugen leicht zu öffnen oder nach außen zu neigen, was in der Draufsicht an die Form einer Tulpenblüte erinnert. Sobald der Vortrieb eines Hubs abgeschlossen ist, bewirkt die Verbindung mit dem neuen Ring  $n$  eine Rückverformung und zwingt den Ring  $n$  in eine ovale Form.

Darüber hinaus sind beim Vortrieb die Belastungen durch die Vortriebspresen, durch die Steuerungsprozesse sowie die Auftriebskräfte der Tübbingsegmente und der Tunnelröhre zu berücksichtigen. [33,34]



## 2.3 Ringspaltverfüllung

Beim Vortrieb mit einer TBM unter Verwendung von Tübbingsegmente entsteht verfahrensbedingt ein Hohlraum zwischen dem umgebenden Gebirge und der Tunnelauskleidung, der als Ringspalt bezeichnet wird. Um sowohl eine adäquate Bettung der Tübbingröhre sicherzustellen als auch eine gleichmäßige Lastenübertragung des Gebirgsdrucks zu gewährleisten, ist es erforderlich, diesen Ringspalt mit geeigneten Materialien zu verfüllen. Zudem dient das Verfüllen dem Schutz gegen mögliche Gebirgsauflockerungen. [19,35] Weitere Anforderungen an das Hinterfüllungsmaterial werden nicht im Text erläutert, sondern sind in Abbildung 2-17 dargestellt. Diese Abbildung veranschaulicht die Anforderungen in Abhängigkeit von den Phasen vor, während und nach dem Verpressvorgang.

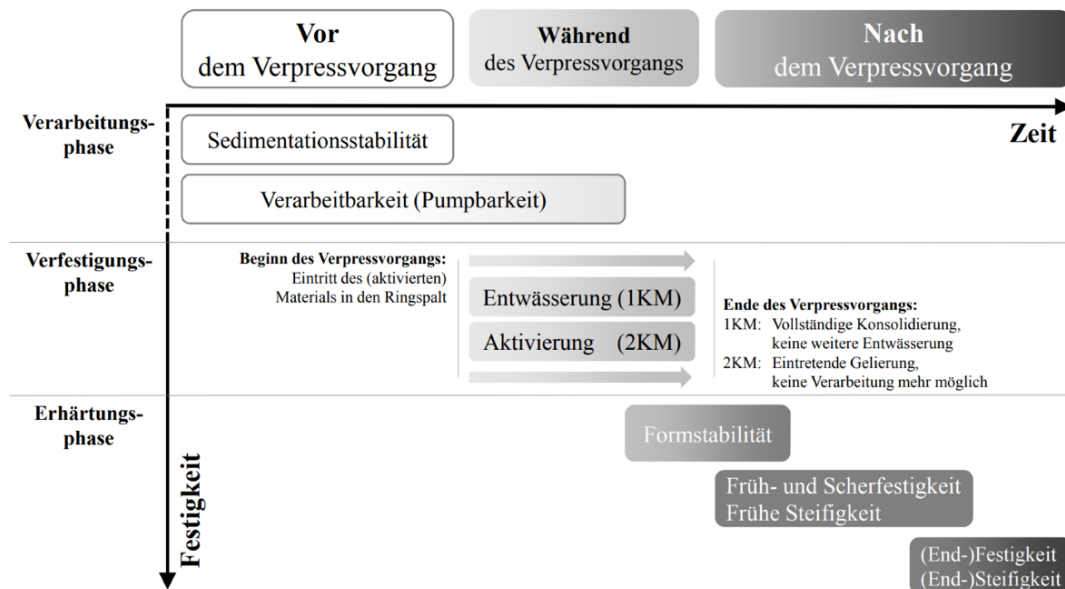


Abbildung 2-17: Allgemeine Anforderungen an das RSVM [35]

Der Ringspalt weist eine Stärke von etwa 13 bis 18 cm auf und resultiert aus der Kombination der Höhe des Dichtungssystems, der Konizität des Schildmantels, der Dicke des Schildschwanzes sowie der Höhe des Überschnitts (siehe Abbildung 2-18). [36]

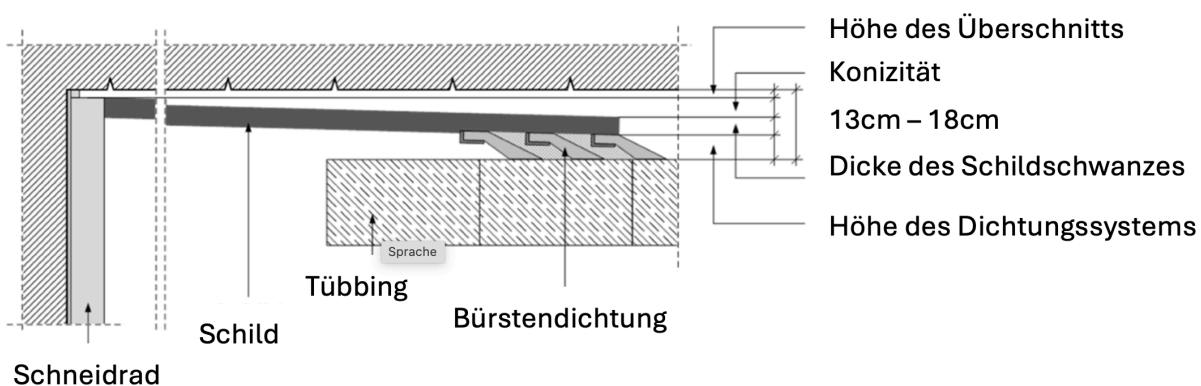


Abbildung 2-18: Zusammensetzung der Ringspaltstärke (verändert) [37]

Während des Vortriebs muss der Ringspalt mit geeignetem Verfüllmaterial verpresst werden, um den Bodenverlust auszugleichen, Setzungen an der Erdoberfläche zu verhindern und die Stabilität der Tübbingringe zu gewährleisten. Das primäre Ziel dieser Verpressung besteht darin, eine vollständige Auffüllung des Ringspalts zu erreichen, um die sichere Lagerung der



Tübbingschale zu gewährleisten und den ursprünglichen Spannungszustand des Baugrunds aufrechtzuerhalten. Um Setzungen im Boden zu vermeiden, muss der Verpressdruck an den Primärspannungszustand des Baugrundes angepasst werden und mindestens den vorherrschenden Erd- und Wasserdruck ausgleichen oder übersteigen. [38,39] Wie in der Abbildung 2-19 ersichtlich, kann ein Übersteigen des Verpressdrucks dazu beitragen, bereits aufgetretene Setzungen auszugleichen oder rückgängig zu machen [39].

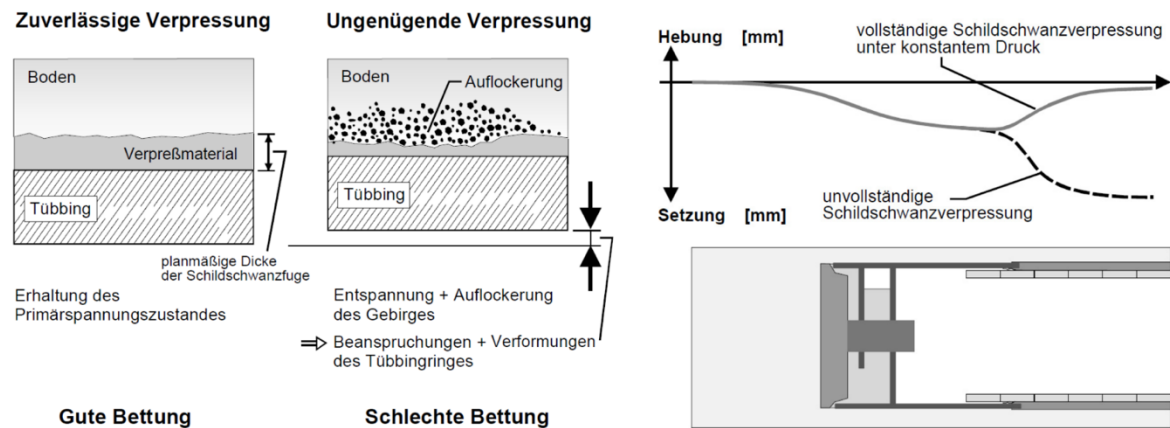


Abbildung 2-19: Zusammenhang Ringspaltverpressung mit Setzungen [40]

### 2.3.1 Richtlinien und Normungen

In Deutschland wird die Ringspaltverfüllung durch die Richtlinie DB-Ril 853 [32] geregelt. Neben dieser Richtlinie sowie den ZTV-ING „Tunnelbau“ [31] enthalten auch die Empfehlungen des DAUB [17,41,42] entsprechende Vorgaben zur Ringspaltverfüllung. In Österreich hingegen stellt die ÖVBB-Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ [16] die einzige maßgebliche Richtlinie dar. [35]

### 2.3.2 Ringspaltverfüllmaterialien (RSVM)

Das Ringspaltverfüllmaterial (RSVM) beschreibt das materialtechnische Stoffsystem, das zur Verfüllung des Ringspalts unter Berücksichtigung der projektspezifischen Rahmenbedingungen eingesetzt wird. In der Richtlinie DB-Ril 853 [32] und ÖVBB-Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ [16] wird zwischen folgenden Ringspaltverfüllmaterialien unterschieden [35]:

- Einkomponentenringspaltverfüllmaterial (1K-RSVM),
- Zweikomponentenringspaltverfüllmaterial (2K-RSVM)
- Zweikomponentenmischsysteme (2K-MS)
- Perlkies

Im technischen Verfahren werden die ersten drei genannten reaktiven Stoffverbindungen (RSVM) durch Pressen in den Ringspalt eingeführt, während der zuletzt erwähnte Perlkies mittels Einblasen eingebracht wird [35].

- **1K-RSVM:**

1K-RSVM bestehen hauptsächlich aus Gesteinskörnungen, hydraulischen Bindemitteln, Wasser, verschiedenen Zusatzstoffen und Bentonit. Die Stabilisierung der Tunnelröhre wird bei diesem Materialsystem durch die Bildung eines Korngerüsts ermöglicht. Dieses Gerüst entsteht hauptsächlich durch Entwässerung und Verdichtung während des Einpressens in den Ringspalt. Im Laufe der Zeit verbessert sich die

mechanische Festigkeit der 1K-RSVM weiter aufgrund der Hydratationsprozesse der enthaltenen Bindemittel. [32,35]

- **2K-RSVM**

2K-RSVM bestehen aus zwei separaten Komponenten: Komponente A, die eine bindemittelhaltige Suspension ohne Gesteinskörnungen darstellt, und Komponente B, die als Aktivator fungiert. Die beiden Komponenten werden erst kurz vor der Injektion in den Ringspalt miteinander vermischt, um eine vorzeitige Reaktion in der Verpressleitung zu vermeiden. Die Aushärtung der 2K-RSVM erfolgt durch eine chemische Reaktion (Gelierung), die im Ringspalt stattfindet. Dabei führt die Zugabe von Komponente B zu einer Aktivierung des Bindemittels von Komponente A. Die Gelierung beschreibt den Prozess, bei dem sich die Viskosität des Materials aufgrund der Bildung von Reaktionsprodukten auf den Oberflächen des Bindemittels verändert. Die Zeitspanne, in der das Material nach der Zugabe von Komponente B noch verarbeitet werden kann, bevor es seine Fließfähigkeit verliert, wird als Gelzeit bezeichnet. Es ist essenziell, dass die beiden Komponenten während der Injektion gut vermischt werden. Das Anmachwasser wird überwiegend physikalisch, aber auch chemisch im 2K-RSVM gebunden. [32,35]

- **2K-MS**

2K-MS repräsentieren eine Kombination aus 1K-RSVM (mit Gesteinskörnungen) und 2K-RSVM (mit Aktivierung durch Komponente B). Das bedeutet, dass ein RSVM mit Gesteinskörnung mit einem Aktivator vermischt wird. [32,35]

- **Perlkies**

Speziell in Österreich bzw. auch in dem maschinellen Druckstollen Bau [43] wird Perlkies als alternatives Material zur Verfüllung des Ringspalts eingesetzt.

Hingegen dazu gibt es in Deutschland keine Zulassung für Ringspaltverfüllung in Eisenbahntunnel mit diesem Material, da der Zustand nicht ausreichend quantifiziert werden kann. Aus diesem Grund wird Perlkies in der deutschen Richtlinie DB-Ril 853 [32] ausdrücklich als ungeregelte Bauart ausgeschlossen, wodurch seine Verwendung eine Sondergenehmigung erfordert. [32]

Gemäß der Richtlinie für Tübbingssysteme aus Beton 2009 [16] ist eine Korngrößenverteilung mit einem Mindestkorn von 4 mm und einem Größtkorn von 16 mm vorgeschrieben. Üblicherweise wird gewaschener, gut gerundeter Perlkies mit einem Durchmesser von 8 mm bis 12 mm verwendet [44]. Die Mindestanforderungen an den Perlkies werden wie folgt definiert: Der Anteil an Überkorn darf 10 % des nächstgrößeren Siebdurchmessers nicht überschreiten, während der Anteil an Unterkorn weniger als 10 % des nächstkleineren Siebdurchmessers betragen darf. Darüber hinaus muss der Perlkies zu mindestens 95 % aus gerundeten Körnern bestehen. Die genaue Zusammensetzung kann der ÖNORM EN 12620 entnommen werden. In Sonderfällen ist es möglich, das Rundkorn im Perlkies durch Kantkorn zu ersetzen, wobei jedoch die weniger günstigen Verarbeitungs- und Materialeigenschaften zu berücksichtigen sind. In diesem Fall gelten alle Anforderungen an den Perlkies aus Rundkorn, mit Ausnahme der spezifischen Vorgabe zum Anteil an Rundkorn. Es ist wichtig, die Ringspaltverfüllung möglichst zeitnah nach dem Aufbau der Tübbingsegmente durchzuführen. Dazu müssen an den Tübbingenden spezielle Öffnungen vorgesehen werden, um die Schlauchleitungen zur Befüllung anschließen zu können. Im Anschluss kann der Porenraum der Kiesfüllung noch zusätzlich mit flüssigem Mörtel injiziert

werden. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass der Perlkies keine Feinanteile aufweist, um ein Verkleben des Materials zu verhindern. [16,19,37,45]

### 2.3.3 Methoden der Ringspaltverfüllung

Je nach geologischen Bedingungen und der verwendeten Vortriebsmaschine muss ein passendes Verpressverfahren gewählt werden. Grundsätzlich stehen zwei Methoden zur Verfügung, um den Ringspalt zu verfüllen. Eine Möglichkeit besteht darin, das Verfüllmaterial durch Öffnungen in den Tübbing in den Ringspalt zu pressen. Alternativ kann das Verfüllmaterial während des Vortriebs simultan über mehrere Leitungen, sogenannte Lisenen, die entlang des Schildschwanzes der Vortriebsmaschine verteilt sind, eingebracht werden. Bei TBMs mit aktiver Ortsbruststützung gilt die Verpressung durch den Schildschwanz heute als Stand der Technik. [19,39]

#### Verpressen durch die Öffnungen der Tübbingsegmente:

Bereits während der Herstellung der Tübbingsegmente werden Verpresslöcher eingebracht, die das spätere Einbringen von Verpressmaterial ermöglichen. Um ein unkontrolliertes Austreten des Materials zu verhindern, werden diese Öffnungen mit Rückschlagventilen oder Verschlussstopfen gesichert. Die Schildschwanzdichtung am Ende des Schildschwanzes begrenzt das Volumen des zu verpressenden Ringraumes (siehe Abbildung 2-20, rechts oben). Die Anzahl der erforderlichen Injektionsöffnungen hängt vom Fließverhalten des Ringspaltverfüllmaterials ab, das die Technologie der Ringspaltverfüllung bestimmt. In der Praxis wird jedoch meist eine Injektionsöffnung pro Tübbing vorgesehen [44].

Ein Nachteil dieser Methode besteht darin, dass die Verfüllung des Ringspalts nicht kontinuierlich während des Vortriebs vorgenommen werden kann. Stattdessen muss sie abschnittsweise, jeweils für eine Ringbreite, durchgeführt werden, was einen erhöhten Aufwand darstellt [38]. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens liegt im Absetzverhalten des Verfüllmaterials, welches etwa 1-2 % des Materialvolumens beträgt [19]. Dadurch entsteht nach der Primärverpressung häufig ein Hohlraum in der Firste des Ringspaltes, der eine Sekundärverpressung erforderlich macht (Abbildung 2-20).

Weiters führt die Verpressung des Ringspalts durch Öffnungen in der Tübbingauskleidung zu einer erhöhten Belastungskonzentration in der Umgebung der Öffnungen. Daher führt die Verpressung durch Öffnungen in der Tübbingauskleidung zu einer erhöhten Schadensanfälligkeit der Tübbingringe im Vergleich zur Verpressung über Zuleitungen am Schildschwanz. [46]

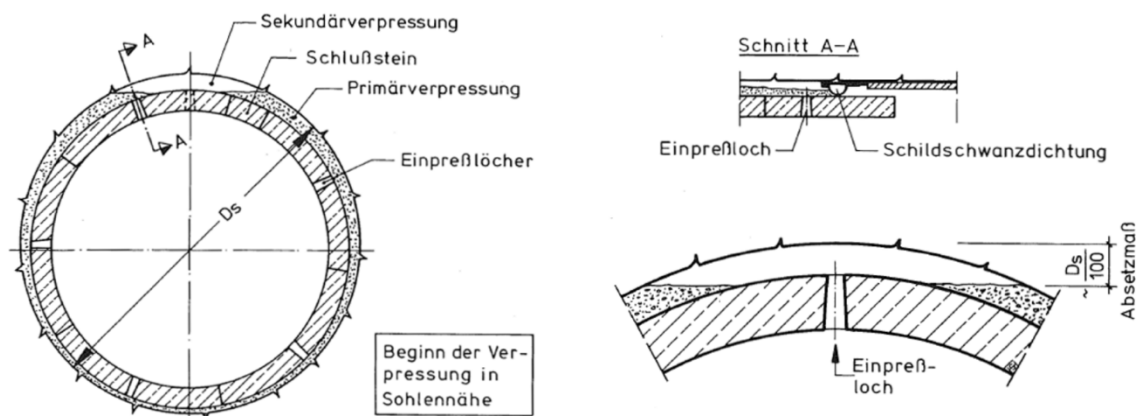


Abbildung 2-20: Ringspaltverfüllung durch Tübbingöffnungen [46]

### Lisenenverpressung im Schildschwanzbereich:

Die Verpressung durch Zuleitungen (Lisenen, siehe Abbildung 2-21, rechts) im Bereich des Schildschwanzes stellt eine alternative Methode zur Ringspaltverfüllung dar, welche die Verwendung von Tübbingöffnungen ersetzt. Diese Methode ermöglicht eine zeitnahe und kontinuierliche Verfüllung des Ringspalts und wird auch bei nicht standfesten Lockergesteinen angewendet. [44]

Abhängig vom Durchmesser des Schildes werden dabei entlang des Umfangs zwischen 4 und 8 Zuleitungen installiert. Im Bereich der Firste ist bei der reinen Mörtelverpressung üblicherweise ein höherer Mörtelbedarf als an der Sohle erforderlich. Deshalb kann die Positionierung der Zuleitungen, wie in Abbildung 2-21, rechts dargestellt, angepasst werden, was möglicherweise zu einer ungleichmäßigen Verteilung entlang des Umfangs führt.

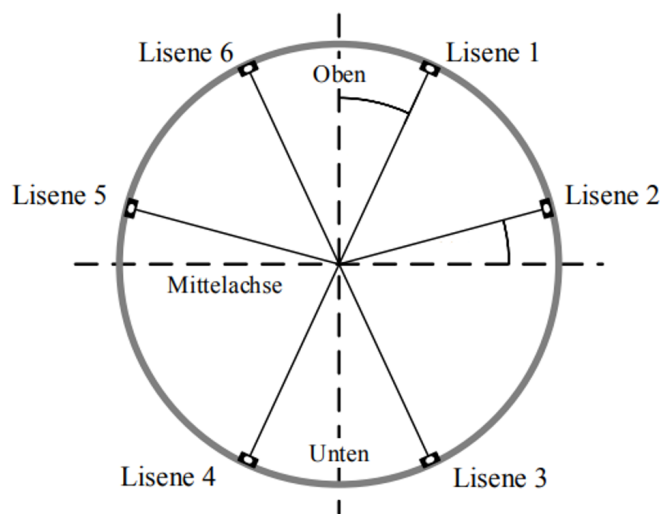
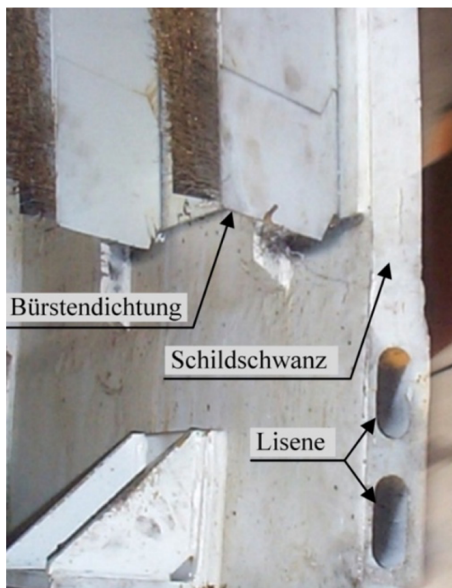


Abbildung 2-21: Links: Lisenenöffnung integriert im Schildschwanz [47];  
Rechts: Lisenenanordnung [19]

Darüber hinaus stellt die Injektion durch die Lisenen besondere Anforderungen an den Verpressmörtel. Insbesondere muss der Mörtel eine geeignete Abbindeverzögerung und Fließfähigkeit aufweisen, um sicherzustellen, dass die Verpressleitungen während der Stillstandszeiten der Maschine nicht durch erstarrenden Mörtel verstopfen. Daher ist eine präzise Auswahl des Mörtels bzw. des Ringspaltverfüllmaterials von entscheidender Bedeutung. [19,45]

Die Dichtung des Schildschwanzes besteht üblicherweise aus 2 bis 4 ringförmigen Stahlbürsten, die entlang der Dichtungsebene angeordnet sind. Diese Dichtungsebene hat die primäre Funktion, während des Verpressvorgangs das Eindringen von RSVM in den Spalt zwischen dem Schildmantel und den Tübbingringen zu verhindern. Gleichzeitig stellt sie eine verlässliche Abdichtung des Innenraums der Vortriebsmaschine gegenüber dem anstehenden Grundwasser und dem RSVM sicher, auch im Fall eines möglichen Fugenversatzes der Tübbingsegmente. Zwischen den Bürstenringen befinden sich fettgefüllte Kammern, die eine zusätzliche Barriere bilden und zur Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion beitragen. [47]

### Kombination der beiden Methoden:

Bei den Tunnelbauprojekten Brennerbasistunnel H41 [3] und Semmeringbasistunnel SBT 2.1 [4] wurde z.B. in der Sohlregion jeweils die Methode der Lisenenverpressung angewandt. Diese Technik ermöglicht eine effektive Stabilisierung und Verstärkung der Tunnelsohle durch

gezielte Injektionen über die Lisenen am Schildschwanz. Im Gewölbebereich beider Tunnelprojekte wurde jedoch die Perlkiesverfüllung durch die Tübbingöffnungen ausgeführt. Diese Methode dient der Stabilisierung des oberen Tunnelbereichs und hilft, die Tunnelstruktur zu sichern, indem der Perlkies in die Freiräume zwischen Gebirge und den Tübbingringen eingeblasen wird. Wie bei den beiden genannten Projekten sichtbar wird, ist es oft nötig, beide Verfahren zu kombinieren, um die verschiedenen Anforderungen in unterschiedlichen Bereichen des Tunnels zu erfüllen. Eine Mörtelverpressung im Bereich der Firste ist erforderlich, wenn loses Gesteinsmaterial über dem Firsttübbing aufliegt.

## 2.4 Schadensarten bei Tübbing

Die Anforderungen an die Herstellung, den Transport und den Einbau von Tübbing sind äußerst hoch, da diese sowohl den geostatischen Lasten als auch den spezifischen Belastungen des Vortriebs standhalten müssen. Trotz sorgfältiger Dimensionierung können aufgrund lokaler Überlastungen Schäden wie Risse, Abplatzungen und Undichtigkeiten entstehen, die vor allem während der Bauphase sichtbar werden. In den nachfolgenden Abbildungen werden die häufigsten Schadensbilder zur besseren Veranschaulichung dargestellt.



Abbildung 2-22: Links: Risse; Rechts: Abplatzung [9,48]



Abbildung 2-23: Versätze entlang der Ringfuge [49]

Die Hauptursache liegt oft in unzulässig hohen Kontaktspannungen, die durch hohe Vortriebsbelastungen, Fertigungs- und Einbautoleranzen sowie daraus resultierende



geometrische Abweichungen hervorgerufen werden. Diese Spannungen können zu Schäden führen, deren Behebung einen hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand erfordert. Um diese Schäden zu minimieren, sollten in der Entwurfsphase geometrische und kinematische Analysen durchgeführt werden, um potenzielle ungewollte Kontaktstellen zu identifizieren. Darüber hinaus ist eine sorgfältige Überwachung des gesamten Produktionsprozesses der Tübbingsegmente – von der Herstellung bis zur Montage – unerlässlich. [8,19] Zudem kann eine unzureichende Ringspaltverfüllung oft weitere Schäden an der Tunnelauskleidung verursachen [38].

In einem zweischaligen Ausbausystem bestehend aus einer Außenschale und einer Innenschale, dienen die Tübbinge der Außenschale primär als Sicherung für den Vortrieb. Beschädigungen an der Außenschale sind in diesem Fall als unkritisch zu bewerten, sofern die Tragfähigkeit und Stabilität des Rings gewährleistet sind. Zudem müssen die beim Vortrieb der TBM entstehenden Presskräfte vollständig aufgenommen und weitergeleitet werden können. In solchen Fällen ist eine kostenintensive Sanierung der Tübbinge nicht erforderlich, da die Gebrauchstauglichkeit durch den nachträglichen Einbau einer zweiten Schale sichergestellt wird. Bei einem wasserdichten, einschaligen Tübbingausbau sind Beschädigungen an den Tübbingen als kritisch zu bewerten, da die einzige Ausbausohle sowohl die Tragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit sicherstellen muss. In solchen Fällen ist eine Sanierung der Tübbingschäden unvermeidlich, was in der Regel mit erheblichem Aufwand und hohen Kosten verbunden ist. [19]

Die auftretenden Tübbingschäden lassen sich, basierend auf ihren Schadensursachen, grob in die folgenden Kategorien gliedern:

- **Baubetriebliche Ursachen**

Baubetriebliche Ursachen für Tübbingschäden beziehen sich auf verschiedene Probleme, die während der Herstellung, der Lagerung, dem Handling und dem Transport von Tübbingsegmenten auftreten können. Bei der Herstellung von Tübbingsegmenten ist es entscheidend, eine hohe Genauigkeit der Schalung sicherzustellen, um die Formschlüssigkeit des gesamten Ringes zu gewährleisten. Sollte diese Genauigkeit nicht erreicht werden, können beim Ringbau hohe zentrierte Spannungen auftreten, die wiederum zu Abplatzungen und Rissen im Material führen. Besonderes Augenmerk bei der Herstellung der Tübbingsegmente muss auf den Dichtungsrahmen gelegt werden, da dieser während des Betonierens sowie während und nach dem Schalvorgang verformt oder beschädigt werden kann (siehe Abbildung 2-24). Solche Verformungen oder Risse im Dichtungsrahmen können in der späteren Tunnelschale zu Undichtigkeiten führen, was die Funktionsfähigkeit und Dichtigkeit des Bauwerks beeinträchtigen kann. [8,9]



Abbildung 2-24: Beispiel für beschädigte Dichtungsrahmen [9]

Weiters ist bei der Herstellung der Tübbingsegmente besonders auf die korrekte Lage der Bewehrung zu achten, um spätere Abplatzungen des Betons zu vermeiden. Um eine normgerechte Betonüberdeckung zu gewährleisten, ist es von entscheidender Bedeutung, die Abstandshalter fest an den Bewehrungskörben zu befestigen. Die Verwendung von steckbaren Abstandshaltern, wie sie häufig im Hochbau eingesetzt werden, sollte jedoch vermieden werden. Diese neigen dazu, leicht umzuknicken (siehe Abbildung 2-25, links), was die Einhaltung der erforderlichen Betonüberdeckung gefährden kann. [8]



*Abbildung 2-25: Links: Umgeknickter Abstandshalter [8]  
Rechts: Schlechte Positionierung der Zwischenleisten [50]*

Zudem ist es bei der Lagerung der Tübbingsegmente wichtig, zu vermeiden, dass diese untereinander in Kontakt treten und gleichzeitig keinen direkten Berührungspunkt mit der Lagerfläche haben. Daher ist der Einsatz von Auflager- und Zwischenleisten erforderlich. Allerdings kann eine fehlerhafte Positionierung der Zwischenleisten (siehe Abbildung 2-25, rechts) zu Spannungen während der Lagerung führen, und durch das Kriechen können innere Verformungen auftreten. Infolgedessen kann der Tübbing nicht mehr mit der erforderlichen Präzision eingebaut werden. Schäden an Tübbingsegmenten können nicht nur während der Lagerung, sondern auch im gesamten Transport- und Handling auftreten. Insbesondere sind die verschiedenen Phasen des Transports, vom Ausschalen des Tübbings bis zur Platzierung im Tunnel, potenzielle Risikofaktoren für Beschädigungen. [9,18]

- **Maschinelle Ursachen**

Schäden aufgrund maschineller Ursachen lassen sich insbesondere im Zusammenhang mit der Ringspaltverfüllung sowie dem Einbau der Tübbingringe selbst beschreiben. Während des Vortriebsprozesses stützt sich die TBM auf die Fugen der bereits installierten Tübbingringe ab, indem die Vortriebskraft über hydraulische Pressen übertragen wird [18,38]. Insbesondere beim Einbau der Tübbingringe können durch Fertigungstoleranzen und Montageungenauigkeiten Versätze in den Ringfugen entstehen, wodurch die Ebenheit der Ringspiegel beeinträchtigt wird. Bei geringfügigen Versätzen werden häufig Fugeneinlagen aus Holzfaserplatten verwendet, um die Unebenheiten auszugleichen und eine ebene Oberfläche herzustellen. Überschreiten die Versätze jedoch ein bestimmtes Maß, sodass die Fugeneinlagen nicht mehr ausreichen, um den Versatz zu kompensieren, können Scheibenspannungen auftreten. [18] In

solchen Fällen können Längsrisse entstehen, die senkrecht zur Ringfuge verlaufen und auf der dem Vortrieb zugewandten Seite beginnen (siehe Abbildung 2-26). [34]

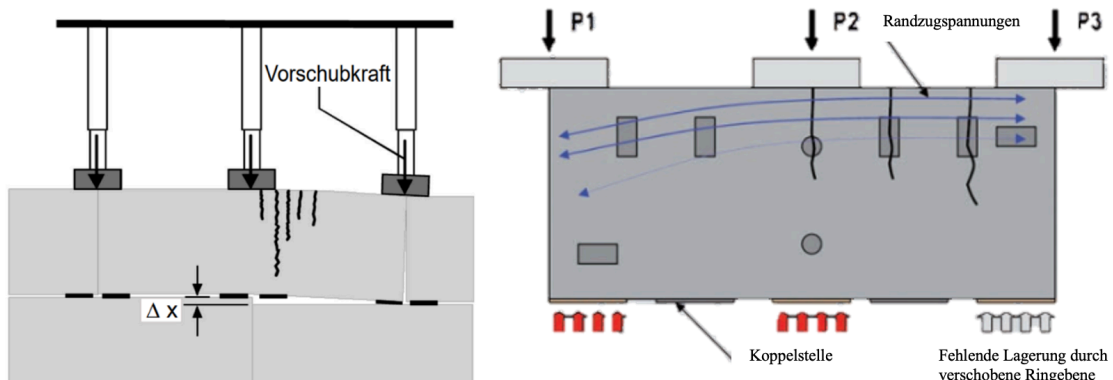


Abbildung 2-26: Beschädigungen durch Versätzen in der Ringfuge (verändert) [18,34]

Zusätzlich können im Zusammenhang mit den Presskräften weitere Schäden entstehen, wie etwa Abplatzungen und Risse an der Stirnseite der Tübbingringe. Die Stirnseite bezeichnet dabei die frontale Fläche der Tübbingringe, die auf der dem Vortrieb zugewandten Seite liegt und direkt den Kräften aus dem Vortriebsprozess ausgesetzt ist. Diese Schäden ergeben sich aus dem Anfahren der abgezogenen Pressen an die Tübbingringe. Auch ein exzentrisches Anbringen der Pressenschuhe an den Tübbingringen kann zu Spannungsspitzen führen und somit potenzielle Schäden verursachen. [9]

Weiters ist beim Ringbau zu beachten, dass die Tunnelauskleidung der TBM folgen muss. Dies bedeutet, dass bei einer Rechtssteuerung der TBM und einem linksorientierten Einbau der Tunnelauskleidung ein Kontakt zwischen dem fertig eingebauten Ring und dem Schildschwanz der TBM auftreten kann. Infolgedessen können Schäden an der Außenseite sowie an der Vorderseite des Tübbings entstehen. Bei einem Schaden zufolge des Schildschwanzkontaktes, wie in Abbildung 2-27 dargestellt, gestaltet sich die Sanierung äußerst schwierig, da sich der Schaden in der Dichtungsebene befindet. [8]



Abbildung 2-27: Abplatzung aufgrund Schildschwanzkontakt [8]



Mit dem vorher beschriebenen Verfahren zum Ausgleichen der Ringfugenversätze, dem sogenannten „Packing“, kann es bei falscher Ausführung zu mehr Schäden als zu Verbesserungen kommen, wie im folgenden Zitat von Tim Babenderede und Christian Hahn in „Einflüsse auf Tübbingschäden“ aufgezeigt wird.

*„Bisher ist kein Tunnelvortrieb bekannt, bei dem dieses „Packing“ mit so ausreichender Sorgfalt durchgeführt wurde, dass nachhaltig eine Verbesserung der Situation erreicht wurde. Im Gegenteil gibt es viele Beispiele, bei denen durch die selbstständige, ungeplante Entscheidung zum Einlegen der Holzfaserplatten erhebliche Schäden überhaupt erst entstanden sind. „Packing“ ist daher in der Praxis kontraproduktiv. Das von der Ringbaumannschaft selbstständige Auswählen von Material und Dicke sollte generell untersagt werden.“[8]*

Neben den Belastungen, die hauptsächlich durch die Vortriebspresen verursacht werden und potenziell zu Schäden an den Tübbing führen können, ist es ebenso notwendig, die radialen Kräfte zu berücksichtigen, die durch die Verpressung und den Gebirgsdruck entstehen. Die Funktion des Verpressmörtels besteht in der Gewährleistung einer gleichmäßigen Bettung des Ringes. Dafür ist es von entscheidender Bedeutung, dass der Mörtel gleichmäßig um den Ring verteilt wird, um eine optimale Lastverteilung sicherzustellen.[8]

Im Zusammenhang mit der Ringspaltverfüllung treten häufig unmittelbar nach dem Einbau der Tübbingringe Schäden auf. Dabei können Schäden in Form von Rissen, Abplatzungen in den Verbindungsbereichen sowie Versätze benachbarter Tübbingringe auftreten. Diese Schäden treten häufig im Bereich der Tunnelröhre auf, wo die Tübbinge noch mit flüssigem Mörtel umgeben sind. Durch Auftriebsbelastungen kann es zu sogenannten Aufschwimmen der Tübbingringe kommen, was wiederum zu Versätzen zwischen zwei Tübbingringen führen kann. Bei unzureichenden Gegenmaßnahmen nach dem Einbau der Tübbinge kann es in diesem Bereich zu Setzungen der Tübbingringe kommen, wodurch erneut Versätze entstehen können. Wenn diese Versätze zwischen den Ringsegmenten zu groß werden, kann es zu einer Kollision der Kopplungspunkte kommen. Dies führt zu einer Überbeanspruchung an der Topfwand, was schließlich Abplatzungen an den Segmenten zur Folge hat. [34,38]

- **Geotechnische Ursachen**

Um das Thema umfassend zu behandeln, muss auch die Schadensentstehung durch Gebirgsverformungen berücksichtigt werden. In Lockergesteinen führen solche Verformungen nur selten zu einer Überbeanspruchung der Tübbingsegmente, da die Lastverteilung durch die einfacheren Bodenbedingungen begünstigt wird. Die Gewölbewirkung dieser Böden erzeugt meist eine gleichmäßige Belastung auf die Tübbingschale. Im Gegensatz dazu treten bei Vortrieben im Hartgestein, abhängig von der Struktur des Gesteins (beispielsweise durch vorhandene Klüfte), stark schwankende und schnell wechselnde Belastungsverhältnisse auf, die den Tunnelausbau erheblich beeinflussen können. Daher ist es in der Planungs- und Ausführungsphase von Tunnelprojekten im Hartgestein entscheidend, diese komplexen Belastungen besonders zu berücksichtigen. [8]

## 2.5 Tunnel Information Modeling

Die fortschreitende Digitalisierung und die damit einhergehenden neuen digitalen Arbeitsmethoden, wie beispielsweise Building Information Modeling (BIM), gewinnen zunehmend an Relevanz im Bereich des Tunnelbaus. Die Einführung und Anwendung der BIM-Methodik im Bereich Infrastruktur- und Tunnelbau beruhen auf den gleichen Prinzipien, die allgemein für den Hochbau gelten. [51]

Mit der Einrichtung der Stiftungsprofessur „Tunnel Information Modeling (TIM)“ an der Universität Innsbruck wurde auch der Begriff TIM etabliert [52]. In der aktuellen Fachliteratur ist der Begriff TIM noch nicht geläufig. Stattdessen wird der Begriff "BIM im Tunnelbau" oder "BIM im Untertagebau" verwendet. [51]

Der wesentliche Unterschied zwischen Hochbauprojekten und Tunnelbauprojekten besteht in der Prognoseunsicherheit des Baugrundes über die gesamte Ausdehnung des Tunnelprojektes. Darüber hinaus stellen auch die Logistik und die Planung der Baustelleneinrichtungsfläche für Untertagebauten eine erhebliche Herausforderung dar [53]. Ein weiteres Merkmal von Infrastruktur- und Untertagebauten ist ihre bemerkenswerte Langlebigkeit. Ein Beispiel dafür ist der Brenner Basistunnel, dessen Lebensdauer auf 200 Jahre ausgelegt wird. Um diese Langlebigkeit zu gewährleisten, müssen digitale Modelle so gestaltet sein, dass die gesamten Projektinformationen gesichert werden. Dies kann durch die Verwendung von offenen Datenformaten erfolgen. [51,54]

Die reine Betrachtung eines Bauwerksmodells für eine vollständige Umsetzung der BIM-Methodik im Tunnelbau ist jedoch aufgrund der zuvor beschriebenen Unterschiede unzureichend. Deshalb müssen weitere Teilmodelle erstellt werden, die nicht nur den jeweiligen Anwendungsfall darstellen, sondern auch so konzipiert sind, dass sie miteinander kompatibel sind und eine Interaktion untereinander ermöglichen. Diese Teilmodelle werden im TIM zusammengeführt und umfassen spezifisch das Baugrundmodell, das Bauwerksmodell und das Baustellenmodell. [51,54]

Das Baugrundmodell fungiert als Gesamtmodell, das verschiedene Fachmodellierungen wie Geologie, Hydrogeologie, Oberfläche und Gelände beinhaltet. Bei der Baugrundmodellierung geht es nicht nur um die geometrische Erfassung des Baugrunds und seiner Homogenbereiche sowie der Oberfläche, sondern auch um die Modellierung von Volumenkörpern, welche über alphanumerische Eigenschaften verfügen. Im Gegensatz zum Baugrundmodell zeigt das Bauwerksmodell den Tunnel entlang seiner Achse, einschließlich der Querschläge, Portalbauwerke, Rettungstollen und anderer Komponenten. Wobei die Erstellung eines solchen Modells aufgrund der häufigen Wiederholung der Bauteile deutlich einfacher ist als im Hochbau.

Das Baustellenmodell dient zur Optimierung des Baumanagements im Untertagebau, indem es alle Wechselwirkungen zwischen der TBM, der Organisation und der Schichteinteilung des Personals berücksichtigt. [51,55]

TIM ermöglicht nicht nur die Visualisierung, sondern auch die Kontrolle des Baufortschritts durch den zeitnahen Soll-Ist-Vergleich verschiedener Projektparameter. Durch die Verknüpfung von Bauwerksmodell und Terminplan werden zeitliche Auswirkungen von Änderungen im Bauablauf sofort ersichtlich. Diese Verbindung ermöglicht zudem einen nahezu Echtzeit-Vergleich zwischen geplanten und tatsächlichen Terminen mittels des TIM. [56]

Das Bauwerksmodell umfasst auch die detaillierte Modellierung der Tunnelauskleidung, insbesondere die Modellierung der Tübbinge entlang der Tunneltrasse. In diesem Kontext spielt

TIM eine entscheidende Rolle. Wie in Abbildung 2-28 ersichtlich, können den einzelnen Tübbingringen bzw. den einzelnen Tübbingsegmente unterschiedliche Parameter zugeordnet werden. Dazu gehören beispielsweise die Position des Rings, die Ringnummer (Ring Code) oder die spezifische Bezeichnung des einzelnen Tübbingsegmente (Element Code). Darüber hinaus ermöglicht das Bauwerksmodell eine Rückkopplung der Baustelle mit dem Modell. In diesem Zusammenhang bedeutet es, dass Veränderungen oder Beobachtungen während der Bauarbeiten, wie z.B. Schäden an Tübbingsegmenten oder andere relevante Beobachtungen, direkt im digitalen Modell erfasst und aktualisiert werden können. Diese Rückkopplung stellt sicher, dass das Modell immer den aktuellen Bauzustand widerspiegelt und als Grundlage für weitere Planungen, Entscheidungen oder spätere Wartungen und Sanierungen dient. Diese Ergebnisse stammen aus der Forschung von der Stiftungsprofessur der Universität Innsbruck und zeigen die Bedeutung von TIM für die detaillierte Modellierung der Tübbinge und die Rückkopplung des Bauprozesses mit dem digitalen Modell.

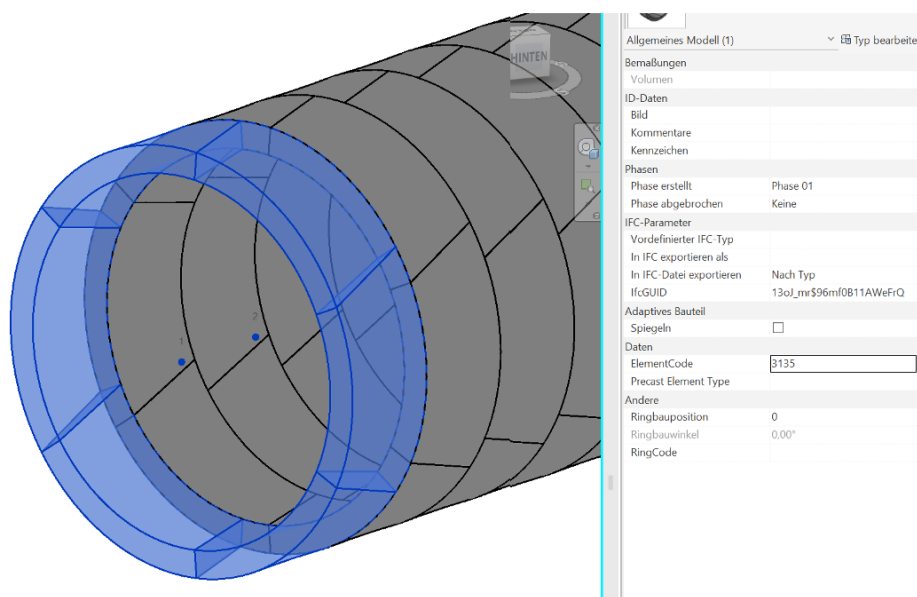


Abbildung 2-28: Visualisierung eines Tunnels mit den einzelnen Tübbingringen

In dieser Masterarbeit wird das Thema TIM nicht weiter vertieft. Allerdings wird im Ausblick dargestellt, wie die Erkenntnisse dieser Arbeit in den Kontext von TIM eingebettet werden könnten.

Die vorhergehenden Kapitel stellen den allgemeinen Stand der Technik dar. Weiters wird im Rahmen dieser Arbeit eine detaillierte Untersuchung von vier spezifischen Tunnelbauprojekten vorgenommen, für die eine umfangreiche Datengrundlage zur Verfügung steht. Diese umfasst unter anderem eine Schadensdokumentation der Tübbinge und bietet die Grundlage für eine detaillierte Analyse und Auswertung der vier Tunnelbauprojekte, die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt werden.



## 3 Datengrundlage

In diesem Kapitel erfolgt eine detaillierte Darstellung von vier anonymisierten Tunnelbauprojekten. Dabei werden die Projekte ab diesem Punkt als Baustelle A, B, C und D bezeichnet. Diese Benennung bleibt einheitlich und wird durchgängig in der gesamten Masterarbeit verwendet. Jedes Projekt wird hinsichtlich seiner Typologie beschrieben, und anschließend wird die verfügbare Datenbasis für die Analyse erläutert. Die Untersuchung und Auswertung der Tübbingschäden erfolgt im darauffolgenden Kapitel.

Aufgrund der unterschiedlichen Datengrundlagen der zu untersuchenden Projekte, wird zu Beginn eine Übersicht der bereitgestellten Dokumente erstellt. Dies dient dazu, einen generellen Überblick über die relevanten Unterlagen zu erhalten, auf deren Grundlage die Projektbeschreibung erstellt wird.

Anschließend erfolgt diese Beschreibung in tabellarischer Form und basiert auf den Anforderungen, die durch den Auftraggeber zu Beginn des Bauvorhabens in der Ausschreibung definiert wurden. Im Rahmen dessen erfolgt ein Soll-Ist-Vergleich, um die in der Ausschreibung definierten Vorgaben mit den tatsächlich umgesetzten Maßnahmen der Projekte zu vergleichen, sofern dies auf Basis der verfügbaren Daten möglich ist. Im Folgenden werden die relevanten Randbedingungen, wie der Maschinentyp, die Tübbingkonstruktion sowie die allgemeine Ringspaltverfüllung, beschrieben, um eine fundierte Grundlage für die anschließende Schadensanalyse zu schaffen. Die Analyseergebnisse erlauben gegebenenfalls Rückschlüsse auf die ursprüngliche Projektbeschreibung bzw. Datengrundlage.

Abschließend wird für jede Baustelle dargelegt, in welcher Form die Unterlagen zur Schadensdokumentation bereitgestellt wurden und wie sie für die anschließende Analyse verwendet werden.

### 3.1 Baustelle A

Für Baustelle A wurden folgende Dokumente bereitgestellt:

- Technische Berichte und Fachartikel
- Ausschreibungsunterlagen
- Laborversuche
- Konzepte zur Ringspaltverfüllung
- Stellungnahmen zu Mehrkostenforderungen
- Austausch mit den für die Baustelle zuständigen Personen

Die vorliegenden Dokumente wurden sorgfältig geprüft, um darauf aufbauend die entsprechenden Rahmenbedingungen für die Baustelle zu formulieren.

	Allgemeine Informationen und Ausschreibung	Abweichung in der Umsetzung
<b>Tunneltyp</b>	Zweiröhriger Eisenbahntunnel	
<b>Geotechnik</b>	Folgende Gebirgsverhalten sind anzutreffen: Kaum standfestes Gebirge (vernachlässigbarer Anteil an GVT 1) meist nachbrechendes Gebirge, das je nach Zersetzungsart und Lagerung sowohl zu Firstnachbrüchen als auch zu Brustnachbrüchen neigt.	
<b>Ausbruchsdurchmesser</b>	Ø>9,5 m	
<b>TBM-Typen</b>	Einfachschild-TBMs	
<b>Vortriebspressensystem</b>	Druckring	
<b>Tübbingdesign</b>	Zweischaliger Ausbau: - Außenschale: Nicht gedichtetes Schweizer Stapeltübbingsystem - Ortbetoninnenschale	
<b>Tübbingkonstruktion</b>	Außenschale: - Dicke: ca. 40 cm - Breite: ca. 2 m Fugenform: - Längsfuge: - Konkav/Konkav - Ringfuge:	

	- Nut und Feder	
<b>Ringspalt</b>	20 – 30 cm	
<b>Ringspaltverfüllmaterial (RSVM)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sohlbereich: Mörtel (Öffnungswinkel ca. 120°)</li> <li>- Gewölbebereich: Perlkies</li> </ul> <p>Im Nachgang zum VT</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachinjektion in Ulm- und Firstbereich bei nicht standhaftem Gebirge</li> </ul>	<p>Ab Ring Nr. X (angepasster Regel VT):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Umstellung auf Perlkies-Spezialmörtel-Mischung</li> <li>- Bettungslinie nach vorne gelegt</li> <li>- Nachinjektion in Ulm- und Firstbereich über gesamte Tunnelstrecke</li> <li>- Einsatz von Silikatschaum</li> </ul>
<b>Einbringungsmethode des RSVM</b>	<p>Mörtel: Verblasöffnung</p> <p>Perlkies: Verblasöffnung</p>	<p>Ab Ring Nr. X:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mörtel im Sohlbereich über Lisenen</li> <li>- Anordnung von zusätzlichen Verblasöffnungen am Tübbingring</li> </ul>
<b>Perlkieszusammensetzung</b>	Korngruppe: 4/8 mm	

*Tabelle 3-1: Rahmenbedingungen Baustelle A*

Als Schadensprotokolle für diese Baustelle dienten handschriftlich geführte Aufzeichnungen (Abbildung 3-1).

[illegible]

*Abbildung 3-1: Handschriftliches Schadensprotokoll*

In den Protokollen wurden folgende Informationen festgehalten:

- Zeitpunkt der Beschädigung (war häufig nicht dokumentiert und blieb in vielen Fällen ungenannt)
- Art der Beschädigung (z. B. Riss, Abplatzung, ...)
- Lage der Beschädigung (grafische Darstellung auf der Tübbingringabwicklung)

Um eine systematische und fundierte Analyse durchführen zu können, war es zunächst erforderlich, die Protokolle zu digitalisieren und in ein einheitliches Format zu überführen, wie es in Abbildung 3-2 für die Baustelle B dargestellt ist. Für die Analyse der Tübbingschäden konnte jedoch nur eine Röhre des Zweiröhrentunnels herangezogen werden, da die Dokumentation der zweiten Röhre nur in geringem Umfang vorlag und somit keine aussagekräftige Analyse möglich war.

Da die Dokumentationsunterlagen der zu analysierenden Tunnelröhre hinsichtlich der Tübbingschäden lediglich Informationen zu den ersten 609 Ringen enthielten, konnte die Analyse nur für diesen Abschnitt des Tunnels durchgeführt werden.

## 3.2 Baustelle B

Für Baustelle B wurden folgende Dokumente bereitgestellt:

- Fachartikel
- Technische Berichte
- detaillierter Ausschreibungsplanung
- Austausch mit den für die Baustelle zuständigen Personen

Die nachfolgende Baustellenbeschreibung basiert auf einer umfassenden Auswertung der zuvor genannten Dokumente.

	Allgemeine Informationen und Ausschreibung	Abweichung in der Umsetzung
<b>Tunneltyp</b>	Zweiröhriger Eisenbahntunnel	
<b>Geotechnik</b>	Folgende Gebirgsverhalten sind anzutreffen: gefügebedingte Nachbrüche, hohlraumnahe Überbeanspruchung, hohlraumnahe Überbeanspruchung nicht profilmaßhaltig, tiefe Überbeanspruchung, tiefe Überbeanspruchung nicht profilmaßhaltig (keine Angaben zur anteilmäßigen Prognose der GVT)	
<b>Ausbruchsdurchmesser</b>	Ø>9,5 m	
<b>TBM-Typen</b>	Einfachschild-TBMs	
<b>Vortriebspressensystem</b>	Einzelpressen	



<b>Tübbingdesign</b>	<p>Einschaliger Ausbau:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gedichteter Universalring</li> </ul> <p>In Teilabschnitten Ortbetoninnenschale</p>	
<b>Tübbingkonstruktion</b>	<p>Außenschale:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dicke: ca. 40 cm</li> <li>- Breite: ca. 2 m</li> </ul> <p>Tübbing-Typen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Normal-Tübbing</li> <li>- Hochlast-Tübbing für Störungsbereiche</li> <li>- Querschlags-Tübbing</li> </ul>	
<b>Ringspalt</b>	25 – 35 cm	
<b>Ringspaltverfüllmaterial (RSVM)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sohlbereich: Mörtel (Öffnungswinkel ca. 85°)</li> <li>- Gewölbebereich: Perlkies</li> <li>- Firste: Bei Bedarf im Firstbereich mit Mörtel nachverpressen</li> <li>- Bei Querschlägen: Während VT Perlkies-Zementleim-Gemisch. Vor dem Öffnen der Tübbinge für den Querschlag erfolgt Nachverpressung mit Zement-Füller-Suspension</li> <li>- Bei druckhaftem Verhalten des Gebirges Perlkies-Zementleim-Gemisch</li> <li>- Umlaufender Einsatz von Ringspalzmörtel bei geologischen Störungen, Überschiebungen und Abrutschungen von Gesteinsblöcken</li> <li>- Einsatz von Zement-Füller-Suspension bei gleichzeitiger Auftretung beider zuvor genannter Szenarien</li> </ul>	
<b>Einbringungsmethode des RSVM</b>	<p>Mörtel: Lisenen</p> <p>Perlkies: Verblasöffnung</p>	

<b>Perlkieszusammensetzung</b>	Korngruppe: 4/8 oder 4/11 mm - Anteil Rundkorn: > 45 % - Kantenform: 80 % gerundet - Feuchtigkeit: <1,5 M-% - Feinanteile: EN 12620	Zum Einsatz kommt die Korngruppe 4/11
--------------------------------	---	---------------------------------------

Tabelle 3-2: Rahmenbedingungen Baustelle B

Für diese Tunnelbaustelle lag bereits eine umfassende, digital aufbereitete Dokumentation der Tübbingschäden für zwei Tunnelröhren vor, wie in Abbildung 3-2 dargestellt. Diese diente als Grundlage für die weiterführende Analyse. In dieser Dokumentation wurde jeder einzelne Schaden, der während des Baus auftrat, präzise erfasst. Dazu wurde die genaue Position des Schadens mithilfe eines eigenen Schemas dokumentiert. Neben der Lage wurde auch die Art des Schadens sowie dessen Ausmaß detailliert beschrieben.

Vortrieb	Protokoll Nummer	Ring Nummer	Datum	Verortung					
				Segment	Vortriebsrichtung	Nachbarstein	Tübbingsseite	bezogen auf SF	Schadensart
	1	50		A	Süd	B1	luftseitig		Abplatzung
	1	50		A	im Segment	im Segment	luftseitig		Riss
	1	50		C2	Süd	C1	luftseitig		Abplatzung
	2	51		K	Süd	B2	luftseitig		Abplatzung
	3	52		A	Süd	im Segment	luftseitig		Abplatzung
	4	54		B2	Süd	im Segment	luftseitig		Abplatzung
	4	54		B1	Süd	B2	luftseitig		Abplatzung
	4	54		K	Süd	im Segment	luftseitig		Abplatzung
	5	55		C2	im Segment	im Segment	luftseitig		Riss
	6	57		B1	Nord	B2	luftseitig		Abplatzung

Abbildung 3-2: Ausschnitt der Schadensdokumentation

Die Klassifikation der Tübbingschäden erfolgte in drei Kategorien: Riss, Abplatzung und Werksfehler. Werksfehler sind Fehler, die z.B. bei der Herstellung, der Lagerung, dem Transport usw. entstehen. Werksfehler können daher auch Risse und Abplatzungen enthalten. Der genaue Zeitpunkt bzw. die Feststellung der Beschädigungen erfolgte zunächst lediglich in unzureichender Form, wobei im weiteren Verlauf des Vortriebes eine detailliertere Aufzeichnung vorgenommen wurde. Bei dieser Baustelle ist die Dokumentation des Zeitpunktes der Schadensfeststellung als korrekt anzusehen, da die Schäden täglich sowohl vom Auftragnehmer als auch von der ÖBA (Örtlichen Bauaufsicht) genau erfasst werden. Von Beginn an wurde eine Lisenenhinterfüllung angewendet, da eine Einhaltung des Öffnungswinkels im Sohlbereich mittels Einbringung über die verblasenen Öffnungen nicht möglich ist. Auch dieser Vorgang der Vermörtelung wurde sorgfältig dokumentiert, um mögliche Veränderungen im Bauprozess nachvollziehbar zu halten.

Die umfassende und sehr genaue Dokumentation der Tübbingschäden an dieser Tunnelbaustelle hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität und Genauigkeit der Schadensanalyse. Des Weiteren ist anzumerken, dass die vorhandenen Dokumentationsunterlagen der anderen Baustellen in das Format dieser Schadensdokumentation (siehe Abbildung 3-2) übertragen und entsprechend aufbereitet wurden. Dies war jedoch nur bedingt möglich, da die Dokumentationen der anderen Baustellen lediglich in begrenztem Umfang und oft in unzureichender Qualität vorlagen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden an der genannten Baustelle etwa 2.000 Ringe aus beiden Tunnelröhren berücksichtigt, da sich der Tunnel noch in der Bauphase befindet.

### 3.3 Baustelle C

Für die Baustelle C sind die nachstehenden Dokumente bereitgestellt worden:

- Berichte und Fachartikel
- Ausschreibungsunterlagen
- Perlkiesprüfberichte
- Perlkiesversuche
- technische Gutachten

Nach einer Durchsicht der vorliegenden Dokumente wurden die entsprechenden Rahmenbedingungen für die Baustelle erarbeitet.

	Allgemeine Informationen und Ausschreibung	Abweichung in der Umsetzung
<b>Tunneltyp</b>	Zweiröhriger Eisenbahntunnel	
<b>Geotechnik</b>	Folgende Gebirgsverhalten sind anzutreffen: Standfestes Gebirge, gefügebedingte Nachbrüche, hohlraumnahe Überbeanspruchung, tiefreichende Überbeanspruchung, Konvergenz, Bergschlag, kaminartiger Niederbruch, rolliges, fließendes, quellendes Gebirge (keine Angaben zur anteilmäßigen Prognose der GVT)	
<b>Ausbruchsdurchmesser</b>	Ø>9,5 m	
<b>TBM-Typen</b>	Einfachschild-TBMs	
<b>Vortriebspressensystem</b>	Einzelpressen	
<b>Tübbingdesign</b>	Zweischaliger Ausbau: - Außenschale: - Nicht gedichtetes Parallelringsystem mit Korrekturringen (5+1 Aufteilung) - Ortbetoninnenschale	
<b>Tübbingkonstruktion</b>	- Dicke: ca. 30 cm - Breite: ca. 2 m - Fugenform: - Ring- und Längsfugen: Eben mit Führungsstifte	-



In dieser Dokumentation wurden ausschließlich Abplatzungen und Risse berücksichtigt. Die Schäden wurden zwar erfasst, jedoch ohne ausreichend detaillierte Angaben. Beispielsweise sind bei einzelnen Ringen zwar Abplatzungen vermerkt (z. B. drei Abplatzungen pro Ring), jedoch ohne genaue Angabe, an welchem Segment des Rings die Schäden auftraten. Auch die Rissdokumentation weist Mängel auf. D.h. bei der Überprüfung stellte sich heraus, dass pro Rissbild lediglich ein Riss dokumentiert wurde, was als unglaublich eingestuft wurde. Der Zeitpunkt des Schadenseintritts ist ebenfalls festgehalten, jedoch nur pauschal als Zeitraum zwischen Ring n-0 und n-2, was die Nachvollziehbarkeit einschränkt. Darüber hinaus liegen ergänzende Dokumente zur Schadensaufzeichnung in Form von Abwicklungen vor, die eine präzise Zuordnung der Schadstellen an spezifischen Positionen ermöglichen. Diese ergänzenden Dokumente wurden überprüft, zeigten jedoch keine Übereinstimmung mit den Angaben im „Tunnelband“, weshalb sie bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurden. An dieser Baustelle wurde der gesamte maschinell vorgetriebene Abschnitt umfassend untersucht, dabei wurden alle Tübbinge beider Tunnelröhren in die Analyse einbezogen.

### 3.4 Baustelle D

Für Baustelle D wurden folgende Grundlagen berücksichtigt:

- technische und wissenschaftliche Berichte
- Präsentationsmaterialien
- Analysedaten des Vortriebs
- Ringbettungskonzept

Die vorliegenden Unterlagen wurden geprüft, um die notwendigen Rahmenbedingungen für die Baustelle abzuleiten.

	Allgemeine Informationen und Ausschreibung	Abweichung in der Umsetzung
<b>Tunneltyp</b>	Einröhriger Straßentunnel	
<b>Geotechnik</b>	Keine Angaben	
<b>Ausbruchsdurchmesser</b>	Ø ca. 9,5 m	
<b>TBM-Typen</b>	Einfachschild-TBM	
<b>Vortriebspressensystem</b>	Einzelpressen	
<b>Tübbingdesign</b>	Einschaliger Ausbau: - Gedichteter Universalring (6+1 Teilung mit kleinem K-Stein)	
<b>Tübbingkonstruktion</b>	- Dicke: ca. 40 cm - Breite: ca. 2 m - Fugenform:	Ab Tunnelmeter () X unerwartetes Gebirgsverhalten: - Produktion des Bew.- Typ 1 eingestellt

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ring- und Längsfugen: Eben mit Führungsstifte</li> <li>- Tübbing-Typen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bew.-Typ 1</li> <li>- Bew.-Typ 2</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einsatz von Bew.-Typ 2</li> </ul> <p>Ab TM Y erneutes unerwartetes Gebirgsverhalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Neuer Bew.-Typ 3</li> </ul>
<b>Ringspalt</b>	<p>Sohlbereich: min. 3,5 cm</p> <p>Firstbereich: max. 32,5 cm</p>	
<b>Ringspaltverfüllmaterial (RSVM)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sohlbereich: Mörtel (Öffnungswinkel 90°-100°)</li> <li>- Gewölbebereich: Perlkies</li> </ul>	Ab TM X RSVM Perlkies mit Mörtelinjektion in der Firste („Sandwich“)
<b>Einbringungsmethode des RSVM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mörtel: Lisenen</li> <li>- Perlkies: Verblasöffnung</li> </ul>	
<b>Perlkieszusammensetzung</b>	Korngruppe: 8/16	

Tabelle 3-4: Rahmenbedingungen Baustelle D

Im Rahmen der Dokumentation zu Tübbingschäden auf der Baustelle D wurden die entsprechenden Unterlagen auch in digitaler Form bereitgestellt. Dabei wurde ebenfalls eine Anpassung an das Format der Schadensdokumentation der Baustelle B vorgenommen, wie in Abbildung 3-2 dargestellt.

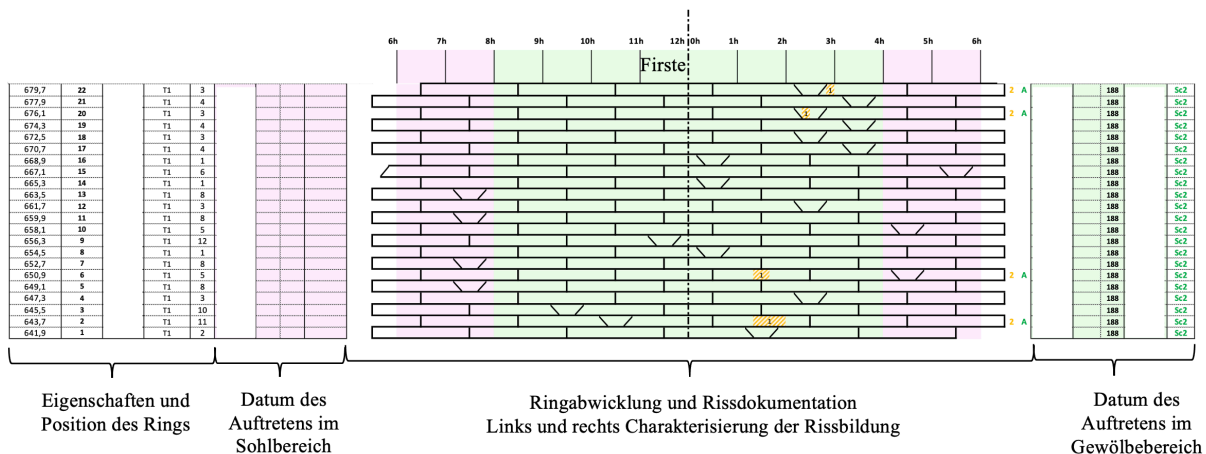


Abbildung 3-4: Ausschnitt Rissdokumentation

Es ist anzumerken, dass in der vorliegenden Dokumentation ausschließlich Risse erfasst wurden. Aufgrund der zur Verfügung gestellten Unterlagen lässt sich jedoch nicht mit Sicherheit klären, ob in diesem Projekt keine Abplatzungen aufgetreten sind, ob diese lediglich in vernachlässigbar geringem Umfang vorhanden waren oder ob Abplatzungen aufgetreten sind, deren Daten jedoch nicht weiter aufgenommen und/ oder übermittelt wurden. Neben der Quantität der Schäden lässt sich anhand der Tübbingabwicklung in dieser Dokumentation erkennen, in welchem Bereich die Risse aufgetreten sind, d. h. im Sohlbereich oder im

---

Gewölbebereich. Zudem wurde eine genaue Einordnung der Risse entsprechend ihrer Größe vorgenommen, die auch für die spätere Schadensanalyse herangezogen wird.

Basierend auf der Datengrundlage dieser sowie der drei vorhergehenden Baustellen wird im folgenden Kapitel die Schadensanalyse durchgeführt.





## 4 Schadensanalyse

In diesem Kapitel erfolgt eine detaillierte Analyse der Tübbingschäden an den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Baustellen. Als Datenquellen für die Schadensanalyse dienen die zuvor erläuterten Datengrundlagen sowie die Schadensdokumentationen der jeweiligen Baustellen. Im Rahmen der Auswertung werden die aufbereiteten Schadensdokumentationen in das Analyse-, Visualisierungs- und Interpretationsprogramm Power BI geladen, welches zur Durchführung der Analyse dient. Power BI [57] ermöglicht die Integration großer und komplexer Datenmengen aus verschiedenen Quellen. Dadurch wird eine umfassende und strukturierte Auswertung der Schadensdaten gewährleistet.

Ziel ist es, jedes Tunnelbauprojekt individuell zu untersuchen, um eine mögliche Bewertung der Schadensbilder vorzunehmen. Im Rahmen der Analyse werden insbesondere die Ringschäden sowie die spezifischen Schadensarten eingehend betrachtet, um mögliche Erkenntnisse zu den Ursachen der Schäden zu gewinnen.

### 4.1 Baustelle A

Im Rahmen der Schadensanalyse der Baustelle A wurde eine Tunnelröhre mit insgesamt 609 Tübbingringen untersucht. Dabei zeigte die Auswertung, dass 382 Tübbingringe keine Schäden aufweisen, während 227 Ringe als beschädigt klassifiziert werden. Dies entspricht einem Anteil von etwa 62,7 % unbeschädigter und 37,3 % beschädigter Ringe.

Anschließend wird die Verteilung der Schäden an den 227 beschädigten Ringen genau analysiert, um die unterschiedlichen Schadensarten aufzuzeigen. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in der folgenden Grafik dargestellt.

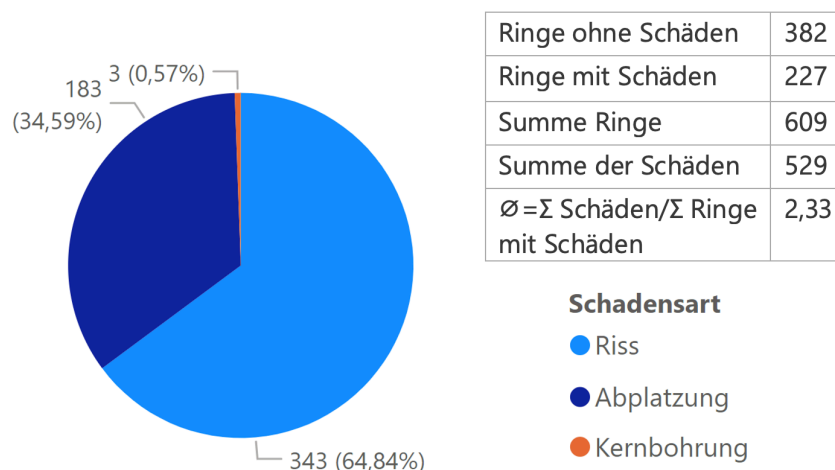


Abbildung 4-1: Anzahl von Schäden nach Schadensart

Aus der vorherigen Grafik lässt sich entnehmen, dass bei den 227 beschädigten Ringen insgesamt 343 Schäden in Form von Rissen und 183 Schäden in Form von Abplatzungen auftraten. Dies entspricht einem prozentualen Anteil von etwa 65 % für Risse und 35 % für Abplatzungen, bezogen auf die Gesamtzahl der relevanten Schäden (insgesamt 529 Schäden). Die Kernbohrungen sind mit drei Fällen dokumentiert, werden jedoch in der Auswertung nicht

als Schäden klassifiziert, da sie ausschließlich durchgeführt wurden, um die Vollständigkeit der Bettung zu überprüfen. Weiters ist der Abbildung 4-1 zu entnehmen, dass jeder beschädigte Ring im Durchschnitt etwa 2,33 Schäden aufweist.

In der nachfolgenden Visualisierung werden die Schäden entsprechend der Ringnummer aufgelistet, beginnend mit dem ersten Ring und fortlaufend bis zur Ringnummer 609.

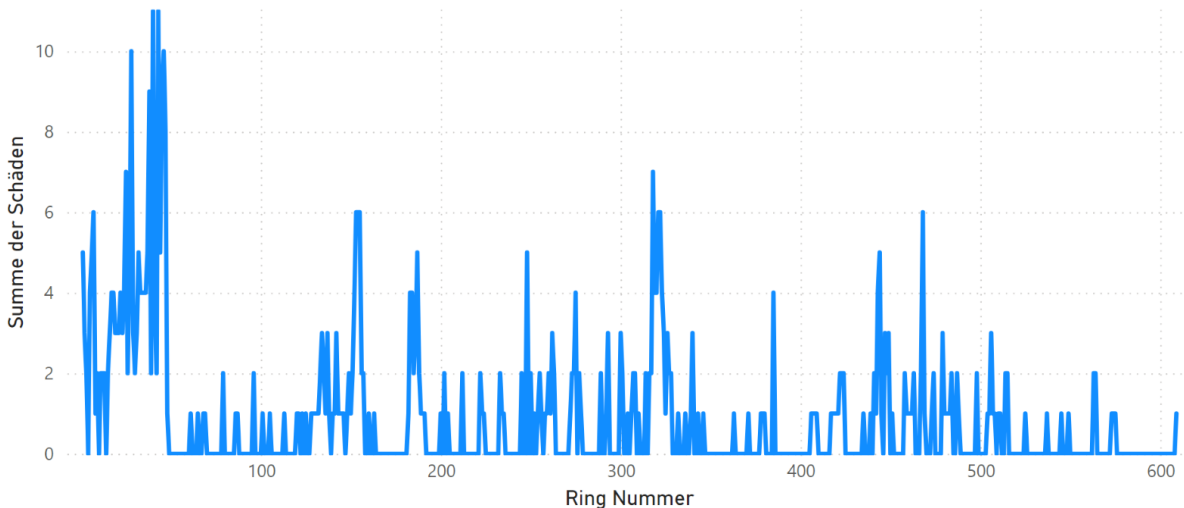


Abbildung 4-2: Summe der Schäden nach Ringnummer

Das Diagramm zeigt eine ungleichmäßige Verteilung der Tübbingschäden entlang der Ringnummern. Während einige Bereiche besonders auffällig hohe Schadensmenge aufweisen, gibt es auch Abschnitte mit wenigen bis keinen Schäden. Der Anfangsbereich des Tunnels fällt besonders auf, da sich bis etwa Ring Nr. 50 eine deutliche Häufung der Schäden zeigt. Bereits beim Anfahren der TBM, nach einem Vortrieb von etwa 2 Metern traten Überbrüche auf, die auf die ungünstige geologische Beschaffenheit des Bodens zurückzuführen sind. Dies führte zu einer Unterbrechung des Vortriebs von ca. einem Monat, in dessen Verlauf Bodenverbesserungsmaßnahmen durchgeführt werden mussten. Die geologischen Gegebenheiten führten bis etwa Ring Nr. 50 wiederholt zu Schwierigkeiten und resultierten in beträchtlichen Schäden, wie der obigen Grafik zu entnehmen ist.

Nach etwa 40 Ringen Tunnelvortrieb kam es insbesondere im Firstbereich, zwischen den oberen Verblasöffnungen der Ulmentübbinge, wiederholt zu Nachbrüchen, sodass der Vortrieb erneut für einen längeren Zeitraum gestoppt werden musste. Um für den weiteren Vortrieb eine ausreichende Stabilität zu gewährleisten, musste das Verfüllen des Ringspalts nach einem modifizierten System erfolgen, wie in der Tabelle 3-1: Rahmenbedingungen Baustelle A beschrieben wurde. Die durchgeführten Maßnahmen führten zu einer optimierten Bettung, was sich in einer signifikanten Verbesserung der Schadenssituation widerspiegelt und eine deutliche Reduzierung der Schäden zur Folge hat. Im weiteren Verlauf des Tunnels sind moderate Schadenshäufungen erkennbar, die jedoch von vereinzelt Schadensspitzen unterbrochen werden. Die beobachteten Schadensspitzen treten in unregelmäßigen Abständen auf und lassen sich keiner spezifischen Ursache zuordnen. Zudem kann kein Zusammenhang mit der Schadensdokumentation hergestellt werden, der mögliche Ursachen erklären könnte.

Aufgrund dieser Erkenntnisse und der Auswertungen ist eine getrennte Analyse notwendig, da der Bereich 0–50 eine erhebliche Auswirkung auf die Gesamtergebnisse hat und somit isoliert betrachtet werden muss, um eine Verfälschung der Auswertung zu vermeiden.

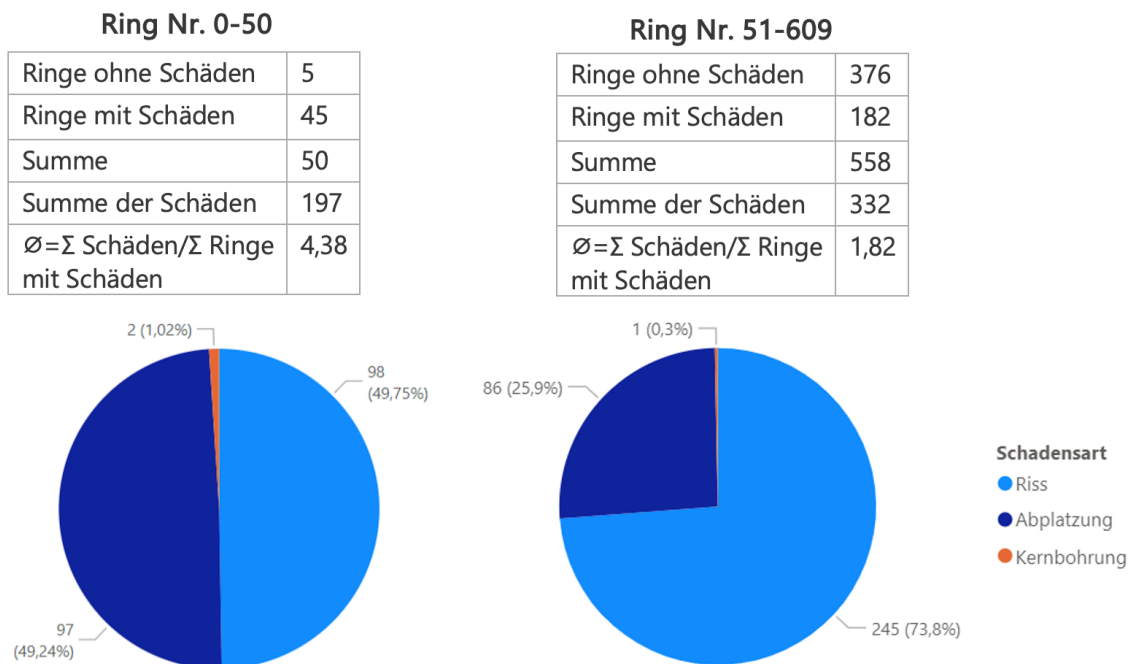


Abbildung 4-3: Gegenüberstellung Ringabschnitt 0-50 und 50-609

Aus dieser Gegenüberstellung geht hervor, dass im Bereich 0–50 der durchschnittliche Schadenswert mit 4,38 Schäden pro beschädigten Ring außergewöhnlich hoch ist. Diese Schadensintensität beeinflusst den Durchschnittswert der Gesamtauswertung signifikant, obwohl dieser Bereich nur 50 der insgesamt 609 analysierten Ringe umfasst. Im Gegensatz dazu zeigt der Bereich 51–609 einen deutlich geringeren durchschnittlichen Schadenswert von lediglich 1,82 Schäden pro beschädigten Ring. Die erhebliche Diskrepanz zwischen den Durchschnittswerten der beiden Bereiche unterstreicht, warum eine separate Analyse notwendig ist. Der hohe Durchschnitt im Bereich 0–50, mit 4,38 Schäden pro beschädigten Ring, hebt den Gesamtwert von 2,33 Schäden pro beschädigten Ring (siehe Abbildung 4-1) deutlich an und verschleiert die im Bereich 51–609 vorherrschend geringere Schadensintensität von 1,82 Schäden pro beschädigten Ring. Diese zusätzliche Auswertung untermauert die Erkenntnis, dass die umgesetzten Maßnahmen zur Ringspaltverfüllung ab Ringnummer 50 eine spürbare Wirkung erzielt haben. Insbesondere im Abschnitt 51–609 zeigt sich eine deutliche Reduzierung der Schadensziffer, was auf die Effektivität der Maßnahmen hinweist und deren positiven Einfluss auf die Schadensminderung weiter bestätigt.

Darüber hinaus erlaubt die Schadensdokumentation dieser Baustelle eine Auswertung der Schäden nach deren Feststellung. Dies bedeutet, dass der Zeitpunkt der Feststellung der Schäden dokumentiert wurde.

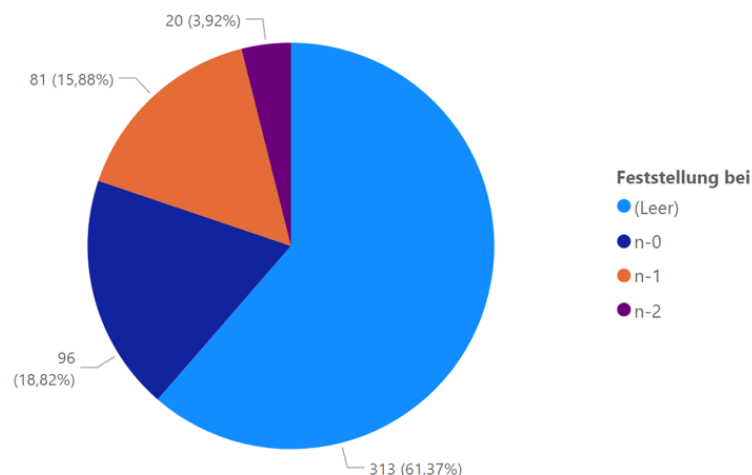


Abbildung 4-4: Zeitliche Dokumentation der Schäden

Die in der obigen Grafik dargestellten Schäden bieten einen Überblick über den Zeitpunkt ihrer Feststellung und Dokumentation. Es zeigt sich, dass bei 313 Schäden keine genaue Dokumentation des Feststellungszeitpunkts vorliegt. Bei 96 Schäden wurde der Schaden während des Vortriebs festgestellt, also zu dem Zeitpunkt, als der Tübbingring noch im Bereich des Schildes (n-0) lag. Dies deutet darauf hin, dass der Schaden direkt am Ring auftrat, während dieser noch unter Schutz des Schildes war. Bei 81 Schäden wurde der Schaden zum Zeitpunkt n-1 festgestellt, was ausdrückt, dass der Ring bereits teilweise den Schildbereich verlassen hatte. Schließlich wurden 20 Schäden bei n-2 festgestellt, was bedeutet, dass der Ring, an dem der Schaden dokumentiert wurde, sich vollständig außerhalb des Schildbereichs befand. Die weiteren Dokumentationen der Zeitpunkte werden in dieser Untersuchung nicht weiter berücksichtigt, da die Häufigkeit dieser Ereignisse sehr gering ist. Angesichts der minimalen Anzahl und ihrer mangelnden Relevanz können diese Daten für diese Auswertung als vernachlässigbar betrachtet werden.

Aufgrund der umfassenden und detaillierten Schadensdokumentation, sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht, kann die Häufigkeit der Segmente, an denen die Schäden auftraten, analysiert und in folgender Abbildung dargestellt werden.

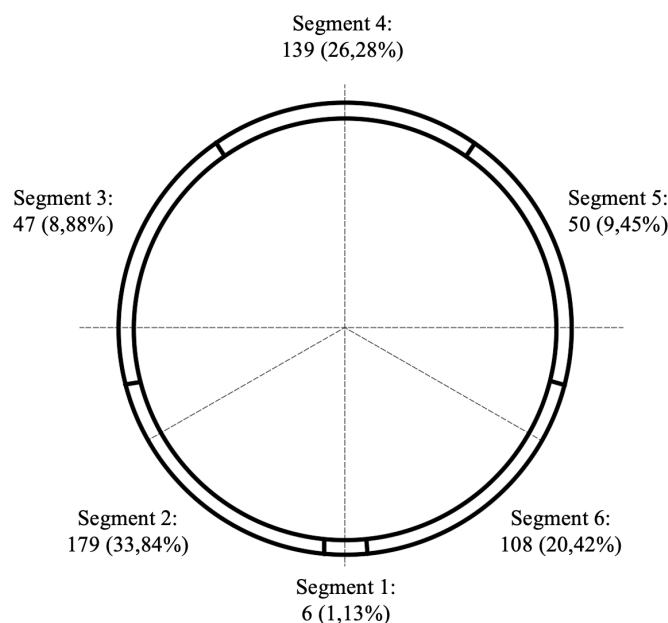


Abbildung 4-5: Anzahl von Schäden nach Tübbingsegment

Aus der Abbildung 4-5 geht hervor, dass von den 529 Tübbingschäden 33,84% im Segment 2 auftreten. Segment 4, welches als Firsttübbing bezeichnet wird, verzeichnet 26,28 % der Schäden. Das Segment 6 folgt mit 20,42 %. Die Segmente 2 und 4 befinden sich im Sohlbereich und schließen am Schlusstein an. Die Schäden in den Ulmentübbingen sind in etwa gleich verteilt, wobei Segment 5 9,45 % und Segment 3 8,88 % der Schäden aufweist. Der am wenigsten betroffene Schlusstein verzeichnet lediglich eine Schadensrate von 1,13 %. Werden die Tübbingschäden in Risse und Abplatzungen unterteilt, ergeben sich folgende Erkenntnisse zur Schadensposition.

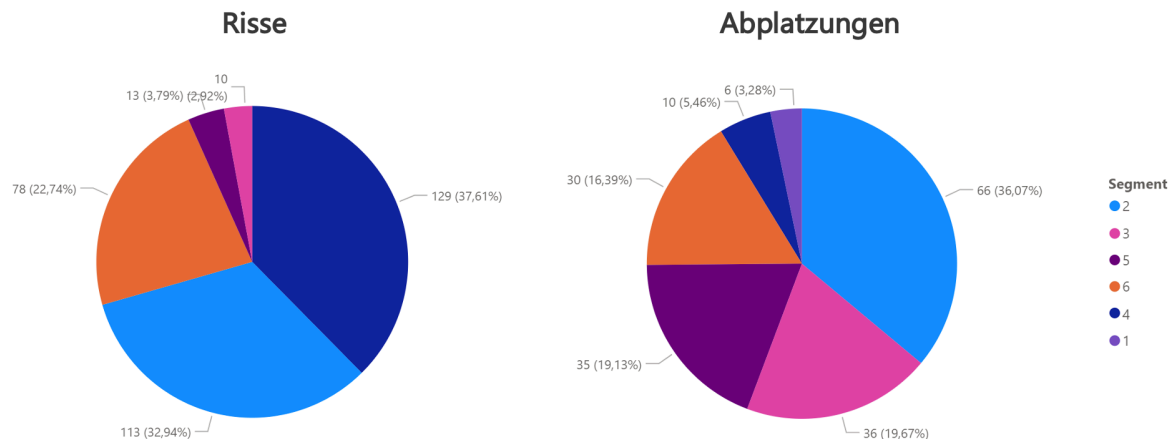


Abbildung 4-6: Schadensposition nach Art der Schäden

Die Abbildung zeigt, dass die meisten Risse im Segment 4 auftreten, was darauf hinweist, dass der Großteil der Risse in der Firste liegen. Im Anschluss daran treten Risse auch in den Segmenten 2 und 6 auf, welche wie bereits zuvor beschrieben, im Sohlbereich liegen und direkt an den Schlusstein anschließen. Am wenigsten Risse wurden in den Ulmtübbingen (Segmente 5 und 3) festgestellt.

Hinsichtlich der Abplatzungen zeigt sich, dass die höchste Schadenshäufigkeit im Segment 2 auftritt, gefolgt von den Segmenten 3, 5 und 6. Diese Segmente weisen eine um ca. 16 % bis 20 % geringere Schadenshäufigkeit als Segment 2 auf. Das Firstsegment Nr. 4 weist mit 5,46 % eine geringe Abplatzungsrate auf. Der Schlusstein, der insgesamt nur 6 Abplatzungen aufweist und keine Risse zeigt, stellt den Bereich mit dem geringsten Schaden dar.

## 4.2 Baustelle B

Auf Grundlage des vorliegenden Dokumentationsmaterials werden bei dieser Baustelle zwei Tunnelröhren untersucht. Die beiden parallel verlaufenden Tunnelröhren werden im Rahmen dieser Analyse zur Anonymisierung als "Röhre 1" und "Röhre 2" bezeichnet.

Bei der Schadensanalyse von Röhre 1 werden insgesamt 1.918 Ringe untersucht. Es zeigt sich, dass 865 Ringe (rund 45,1 %) keine Schäden aufweisen, während 1.053 Ringe (etwa 54,9 %) beschädigt sind. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass mehr als die Hälfte der analysierten Ringe Schäden aufweist. Für die Analyse der zweiten Röhre werden insgesamt 2.329 Ringe betrachtet. Dabei weisen 1.509 Ringe (etwa 64,8 %) keine Schäden auf, während 820 Ringe (rund 35,2 %) beschädigt sind.

Im Vergleich zur ersten Röhre, bei der 54,9 % der Ringe Schäden aufweisen, zeigt die zweite Röhre eine deutlich geringere Schadensquote von 35,2 %. Die geringere Schadensquote der zweiten Röhre kann nicht auf die höhere Anzahl der untersuchten Ringe zurückgeführt werden. Denn wird die gleiche Anzahl von 1918 Ringen betrachtet (gleich viele wie bei der ersten

Röhre), zeigt sich, dass von diesen 1918 Ringen der zweiten Röhre 1205 keine Schäden aufweisen, wie in Tabelle 4-1 dargestellt. Das bedeutet, dass 37,19 % der untersuchten Ringe Schäden aufweisen. Dies zeigt, dass die Unterschiede nicht auf die Menge der Datengrundlage, sondern durch andere Faktoren bedingt sind.

### Röhre 1

Ringe ohne Schäden	865
Ringe mit Schäden	1053
Summe	1918
Summe der Schäden	1815
$\emptyset = \Sigma \text{ Schäden} / \Sigma \text{ Ringe mit Schäden}$	1,72

### Röhre 2

Ringe ohne Schäden	1205
Ringe mit Schäden	713
Summe	1918
Summe der Schäden	1104
$\emptyset = \Sigma \text{ Schäden} / \Sigma \text{ Ringe mit Schäden}$	1,55

Tabelle 4-1: Vergleich Röhre 1 und Röhre 2 mit 1918 Ringen

Im Folgenden wird wiederum eine detaillierte Schadensanalyse durchgeführt, bei der die beschädigten Ringe der beiden Röhren hinsichtlich der Schadensart untersucht werden. Die Resultate dieser Analyse sind in der nachfolgenden Grafik dargestellt.

### Röhre 1

Ringe ohne Schäden	865
Ringe mit Schäden	1053
Summe	1918
Summe der Schäden	1815
$\emptyset = \Sigma \text{ Schäden} / \Sigma \text{ Ringe mit Schäden}$	1,72

### Röhre 2

Ringe ohne Schäden	1509
Ringe mit Schäden	820
Summe	2329
Summe der Schäden	1242
$\emptyset = \Sigma \text{ Schäden} / \Sigma \text{ Ringe mit Schäden}$	1,51

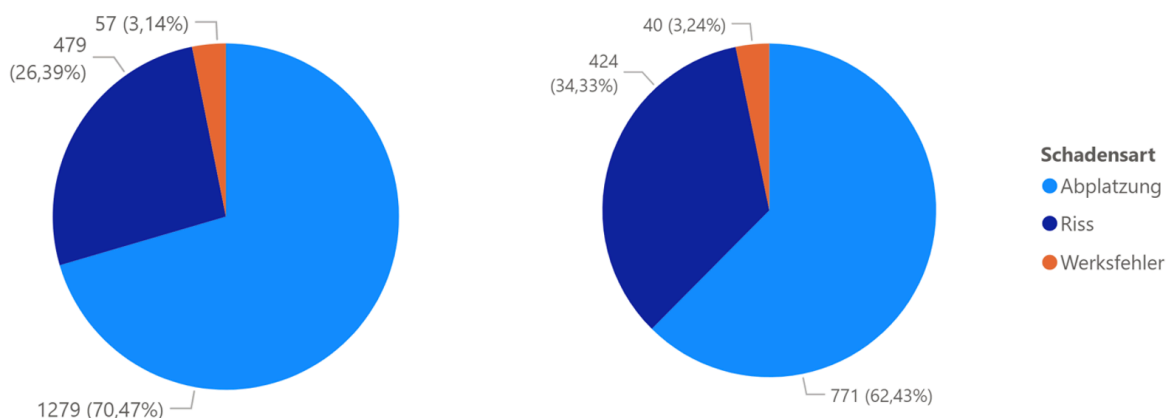


Abbildung 4-7: Anzahl der Schäden nach der Schadensart beider Röhren

Aus der vorliegenden Grafik geht hervor, dass das Schadensmuster hauptsächlich durch Abplatzungen in beiden Röhren geprägt ist, wobei das Schadensmuster in etwa gleich verteilt ist. Risse bilden die zweithäufigste Schadensart und treten mit geringerem, jedoch signifikantem Anteil auf. Im Rahmen der Schadensdokumentation dieser Baustelle wurden zudem Werksfehler erfasst und somit in die Analyse integriert. Die Auswertung dieser Daten zeigt, dass etwa 3 % der dokumentierten Schäden auf Defekte im Produktionsprozess zurückzuführen sind, was auf eine geringe, aber nicht unbeachtliche Schadensquote hinweist.

Um die Verteilung der Schäden entlang der Röhren weiter zu veranschaulichen, wird in der folgenden Visualisierung eine Auflistung der Schäden nach Ringnummern vorgenommen. Diese beginnt mit dem ersten Ring und setzt sich fort bis zum Ring 1918 in Röhre 1 und bis zum Ring 2329 in Röhre 2. Des Weiteren ist eine schwarz gestrichelte Trendlinie in den Visualisierungen eingezeichnet, die den Schadenstrend darstellt. Im Zusammenhang mit den Ringen und den Tübbingschäden zeigt die Trendlinie den Verlauf der Schadenshäufigkeit und verdeutlicht, ob die Schäden mit der Anzahl der untersuchten Ringe zunehmen, abnehmen oder konstant bleiben.

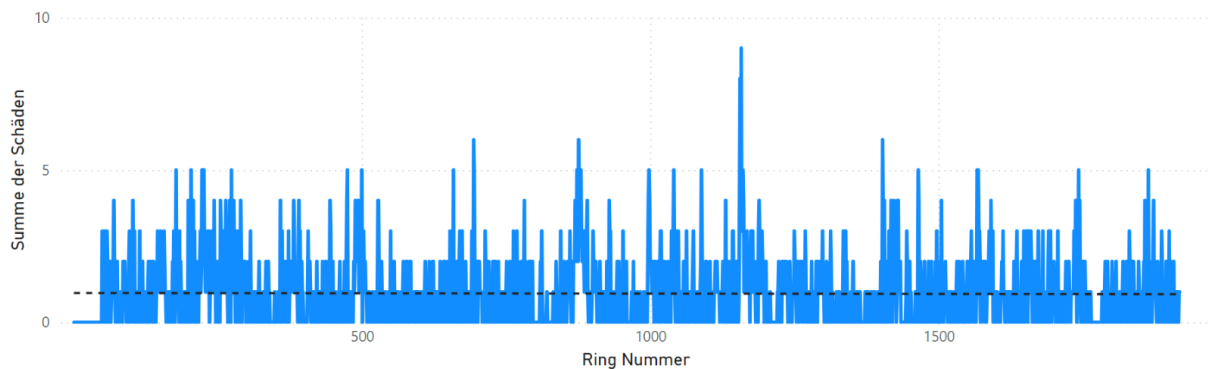


Abbildung 4-8: Summe der Schäden nach Ringnummer (Röhre 1)

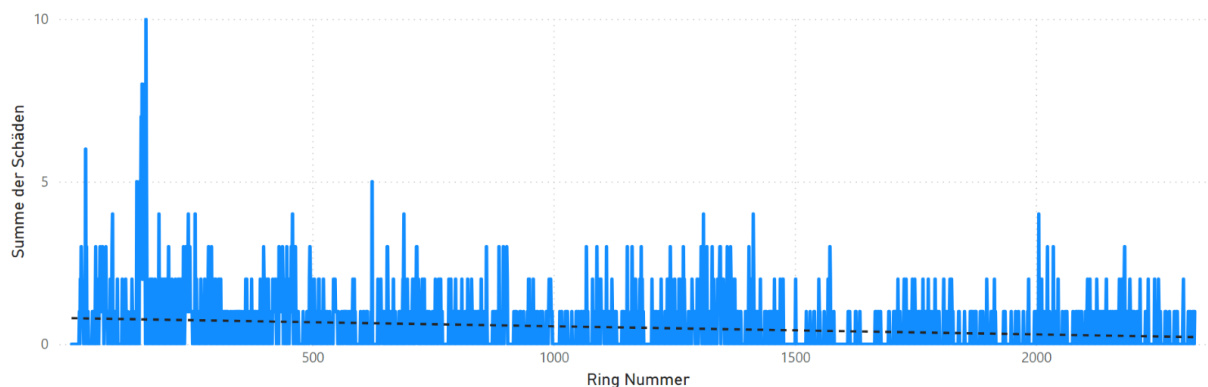


Abbildung 4-9: Summe der Schäden nach Ringnummer (Röhre 2)

In Röhre 1 ist die Schadensverteilung ungleichmäßig, gekennzeichnet durch wiederholte Schadensspitzen, die in der Regel Werte von über 5 Schäden überschreiten. Diese Spitzen treten in Röhre 2 deutlich weniger häufig und in geringerer Intensität auf. In Röhre 2 sind die Schäden insgesamt seltener und weniger intensiv, wobei insbesondere die Anfangsphase durch hohe Schadensspitzen auffällt. Im weiteren Verlauf der Röhre treten jedoch längere Abschnitte mit sehr geringen Schadenssummen auf, was insgesamt zu einer geringeren Schadenshäufigkeit im Vergleich zur Röhre 1 führt. Die vergleichende Analyse von Röhre 1 und Röhre 2 zeigt, dass in Röhre 2 mit zunehmender Ringnummer eine deutlich abnehmende Schadenshäufigkeit festzustellen ist. Dieser Trend wird durch die deutlich erkennbare Trendlinie anschaulich bestätigt.

Auch bei dieser Baustelle wurde der Zeitpunkt des Auftretens von Schäden dokumentiert, sodass im Folgenden eine Darstellung der erfassten Daten für beide Röhren erfolgen kann. Es wird darauf hingewiesen, dass in der folgenden Darstellung nur die Schäden bis zum Feststellungspunkt n-5 berücksichtigt werden, da die Häufigkeit der Schäden ab den späteren Feststellungspunkten stark abnimmt und daher von geringer Bedeutung ist. In den ersten tausend Metern des Tunnelvortriebs wurde der Zeitpunkt des Schadensauftritts für einen erheblichen Teil der Schäden nicht dokumentiert. Diese Daten werden daher in der Abbildung



4-10 ausgeschlossen, um die Übersichtlichkeit der Grafik sowie die Qualität der daraus abgeleiteten Auswertung nicht zu beeinträchtigen.

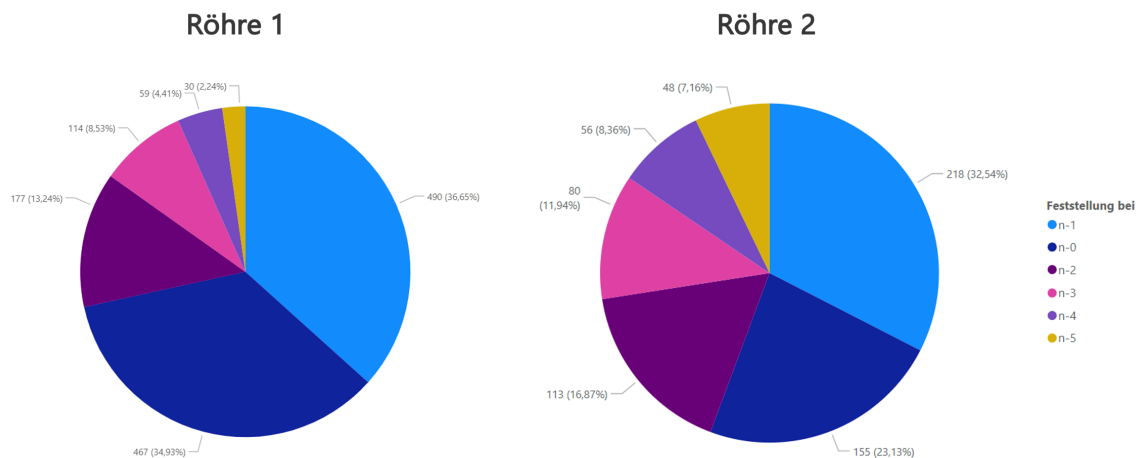


Abbildung 4-10: Zeitliche Dokumentation der Schäden

Aus der vorliegenden Abbildung geht hervor, dass die meisten Schäden bei beiden Röhren zum Zeitpunkt n-1 dokumentiert wurden. In Röhre 1 entfällt der größte Anteil der Schäden auf den Zeitpunkt n-1 mit 36,65 %, gefolgt von n-0 mit 34,93 %. Auch in Röhre 2 treten die meisten Schäden bei n-1 auf (32,54 %), wobei bei n-0 mit 23,13 % ein geringerer Anteil der Schäden dokumentiert wird als in Röhre 1. Ein deutlicher Rückgang der Häufigkeit zeigt sich bei den dokumentierten Schäden zum Zeitpunkt n-2. In Röhre 1 werden bei n-2 noch 13,24 % der Schäden verzeichnet, während in Röhre 2 in dieser Phase ein etwas höherer Anteil von 16,87 % dokumentiert wird. Die verbleibenden Zeitpunkte n-3, n-4 und n-5 zeigen jeweils deutlich geringere Anteile, die der Abbildung entnommen werden können.

Nach einer eingehenden mündlichen Befragung der involvierten Personen dieser Baustelle wurde bestätigt, dass die vorliegenden Dokumentationen für diese Auswertung als authentisch und zuverlässig betrachtet werden können. Infolgedessen erfolgt weiters eine detailliertere Analyse der vorherigen Ergebnisse. Dabei werden für beide Röhren Risse und Abplatzungen separat evaluiert. Im Rahmen der separaten Evaluierung erfolgt eine Bewertung der Zeitpunkte bis n-3, um eine übersichtlichere und sinnvollere Darstellung zu ermöglichen. Da die Zeitpunkte n-4 und n-5 mit einer sehr geringen Häufigkeit auftreten, ist deren Berücksichtigung in dieser Evaluierung nicht erforderlich.

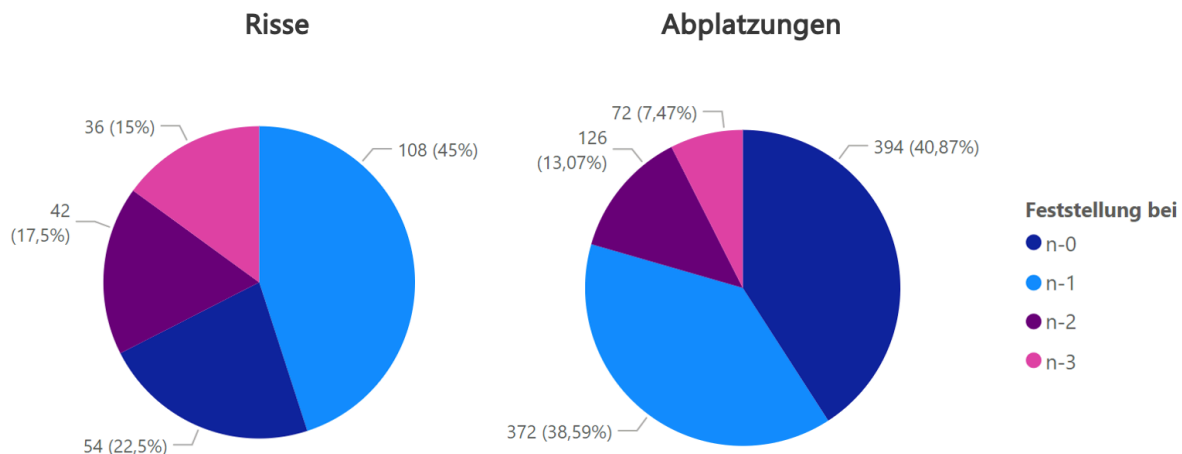


Abbildung 4-11: Zeitliche Dokumentation der Risse und Abplatzungen (Röhre 1)



In der Abbildung ist deutlich erkennbar, dass die meisten Abplatzungen (40,87 %) unmittelbar beim Einbau, d. h. bei n-0, auftreten. Etwa 2 % weniger, also 38,59 %, der Abplatzungen treten beim Verlassen des Schildes auf, also bei n-1. Nachdem der Ring das Schild vollständig verlassen hat (n-2), treten nur noch 13 % der Abplatzungen auf. Bei den Rissen zeigt sich, dass die meisten Risse mit 45 % bei n-1 auftreten, wenn der Tübbing das Schild verlässt. Risse treten zu 22,5 % auch direkt beim Einbau auf. Beim vollständigen Verlassen des Schildes (n-2 und n-3) treten Risse nahezu gleich häufig auf, mit 17,5 % bzw. 15 %, wie aus der Abbildung 4-11 ersichtlich ist.

Im Weiteren wird auch Röhre 2 genauer analysiert:

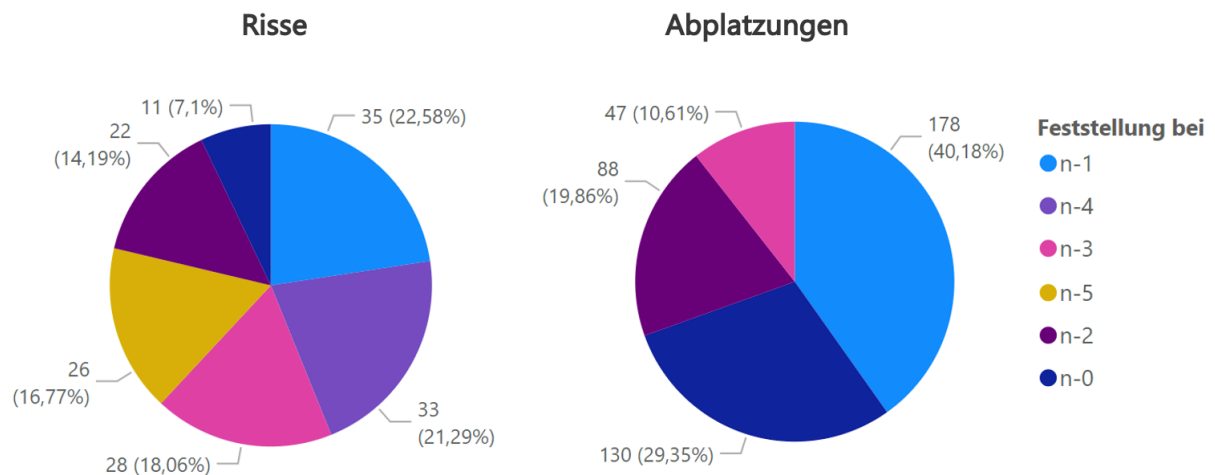


Abbildung 4-12: Zeitliche Dokumentation der Risse und Abplatzungen (Röhre 2)

Eine interessante Beobachtung lässt sich aus den Daten der 2. Röhre ableiten. Im Vergleich zu Röhre 1 treten bei Röhre 2 die meisten Abplatzungen mit 40,18 % bei n-1 auf, was bedeutet, dass die häufigsten Abplatzungen beim Verlassen des Schildschwanzes auftreten. Die zweithäufigsten Abplatzungen mit 29,35 % treten während des Einbaus bei n-0 auf. Nachdem der Ring das Schild vollständig verlassen hat (n-2), treten immer noch ca. 20 % der Abplatzungen auf. In Bezug auf die Risse lässt sich zu Beginn ein ähnliches Muster wie bei Röhre 1 beobachten. Auch hier treten die meisten Risse mit einer Häufigkeit von 22,58 % bei n-1 auf. Nach dieser Feststellung lässt sich jedoch ein abweichendes Schadenmuster im Vergleich zu Röhre 1 beobachten. So treten die zweithäufigsten Risse bei n-4 (21,29%), gefolgt von n-3 (18,06%), n-5 (16,77%) und n-2 (14,19%) auf. Bemerkenswert ist, dass all diese Zeitpunkte der Rissfeststellung nach dem Verlassen des gesicherten Schildbereichs liegen. Erst am fünft häufigsten treten Risse bei n-0 auf, mit einem Anteil von 7,1 %.

## 4.3 Baustelle C

Auf Grundlage des vorliegenden Dokumentationsmaterials werden bei dieser Baustelle zwei Tunnelröhren untersucht. Die beiden Tunnelröhren werden im Rahmen dieser Analyse zur Anonymisierung als "Röhre 1" und "Röhre 2" bezeichnet.

Bei der Schadensanalyse von Röhre 1 werden insgesamt 4.147 Ringe untersucht. Es zeigt sich, dass 2.531 Ringe (61,03%) keine Schäden aufweisen, während 1.616 Ringe (38,97 %) beschädigt sind. Für die Analyse der zweiten Röhre werden insgesamt 4.085 Ringe betrachtet. Dabei weisen 2.487 Ringe (60,88%) keine Schäden auf, während 1.598 Ringe (39,12%) beschädigt sind. Ein Vergleich der beiden Röhren zeigt, dass der Anteil unbeschädigter Ringe bei beiden ähnlich ist, wobei Röhre 1 einen leicht höheren Anteil an unbeschädigten Ringen aufweist (61,03 % gegenüber 60,88 % bei Röhre 2).

Auch für Baustelle C wird eine umfassende Schadensanalyse vorgenommen, bei der die beschädigten Ringe aller Röhren systematisch nach Schadensarten kategorisiert werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der untenstehenden Grafik zusammengefasst und erläutert. In Bezug auf die vorliegende Auswertung ist jedoch auf die Datengrundlage hinzuweisen, wie sie in Tabelle 3-3: Rahmenbedingungen Baustelle C dargestellt ist. Während die Schadensarten in quantitativer Hinsicht gut dokumentiert wurden, weisen sie im Vergleich zu anderen Baustellen qualitative Defizite auf. Diese Einschränkungen werden ausführlich im Kapitel "Datengrundlage Baustelle C " erläutert.

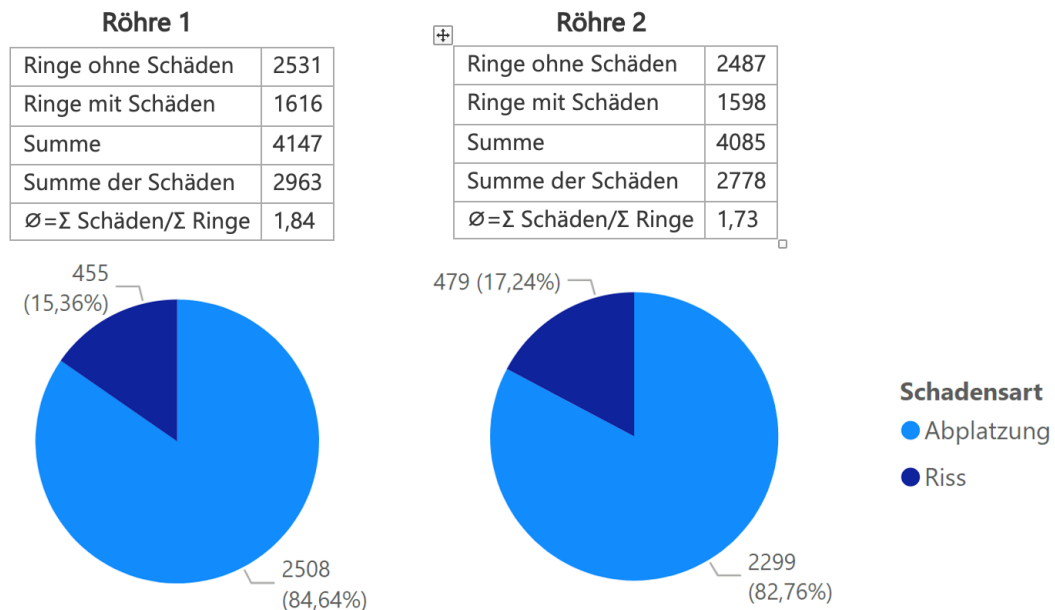


Abbildung 4-13: Anzahl der Schäden nach der Schadensart beider Röhren

Die Schadensanalyse der beiden Röhren zeigt insgesamt ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Art und Häufigkeit der Schäden. Bei Röhre 1 sind 38,97 % der Ringe beschädigt, wobei im Durchschnitt 1,84 Schäden pro beschädigten Ring auftreten. Die häufigste Schadensart ist Abplatzung, die 84,64 % der Schäden ausmacht, gefolgt von Rissen mit einem Anteil von 15,36 %. Bei Röhre 2 liegt der Anteil der beschädigten Ringe bei 39,12 %, mit einem durchschnittlichen Schaden von 1,73 pro beschädigten Ring. Auch hier dominieren Abplatzungen, die 82,76 % der Schäden ausmachen, während Risse 17,24 % ausmachen. Im Vergleich zeigen beide Röhren eine sehr ähnliche Verteilung der Schadensarten, wobei Röhre 2 einen leicht höheren Anteil an Rissen aufweist.

Um die Verteilung der Schäden entlang der Röhren weiter zu veranschaulichen, wird in der folgenden Visualisierung eine Auflistung der Schäden nach Ringnummern vorgenommen. Diese beginnt mit dem ersten Ring und setzt sich fort bis zum Ring 4147 in Röhre 1 und bis zum Ring 4085 in Röhre 2. Weiters ist wieder eine schwarz gestrichelte Trendlinien in den Visualisierungen eingezeichnet, die den Schadenstrend darstellen.

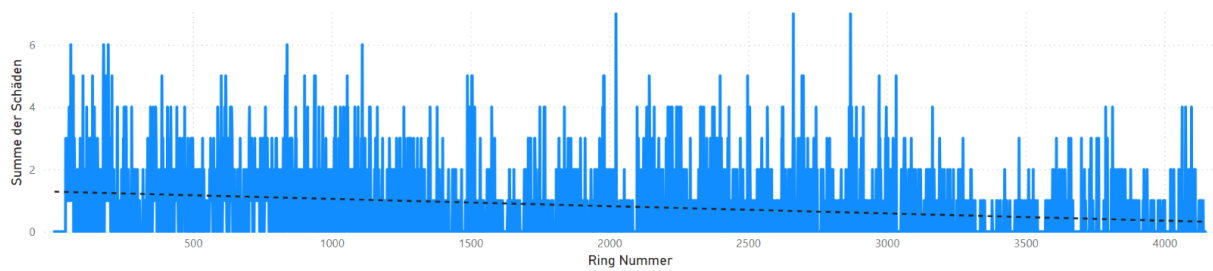


Abbildung 4-14: Summe der Schäden nach Ringnummer (Röhre 1)

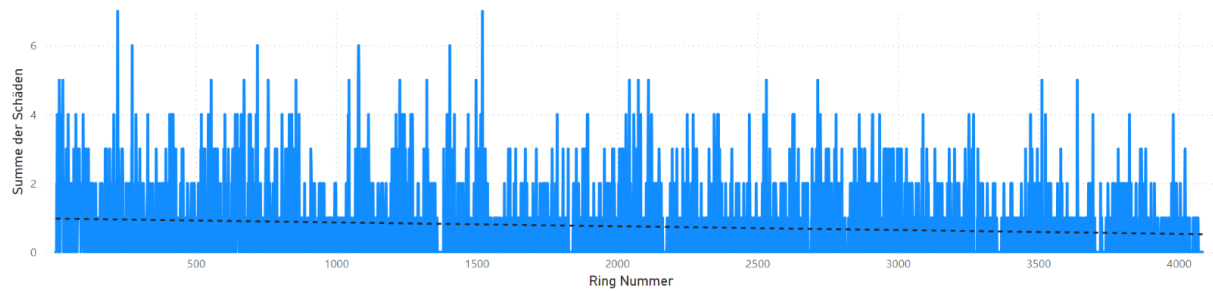


Abbildung 4-15: Summe der Schäden nach Ringnummer (Röhre 2)

Die Schadensverteilung in den abgebildeten Grafiken zeigt deutliche Unterschiede zwischen den beiden Röhren. In Röhre 1 (Abbildung 4-14) ist die Verteilung der Schäden ungleichmäßiger als in Röhre 2 (Abbildung 4-15). Insgesamt treten in Röhre 1 mehr Schäden auf, wobei die Balken entlang der Tunnelachse eine größere Streuung und ausgeprägte Schadensspitzen zeigen. Die Trendlinie verdeutlicht, dass zu Beginn der Untersuchung eine deutlich höhere Schadenshäufigkeit vorliegt, die mit zunehmender Ringnummer stärker abnimmt. In Röhre 2 ist die Schadensverteilung gleichmäßiger und es treten insgesamt weniger Schäden auf. Die Balken sind hier niedriger, und es gibt weniger ausgeprägte Schadensspitzen. Die Trendlinie in Röhre 2 verläuft flacher, was darauf hinweist, dass die Reduktion der Schäden mit zunehmender Anzahl der untersuchten Ringe weniger stark ausgeprägt ist als in Röhre 1. Dies bedeutet, dass in Röhre 1 eine deutlichere Abnahme der Schäden entlang der Tunnelachse zu verzeichnen ist.

Darüber hinaus erlaubt die Schadensdokumentation dieser Baustelle auch eine Auswertung der Schäden nach deren Feststellung für beide Röhren. Es ist zu beachten, dass die Datengrundlage lediglich die Schäden bis zum Feststellungspunkt n-2 erfasst. Folglich konnten nur diese Schäden in die Analyse einbezogen werden.

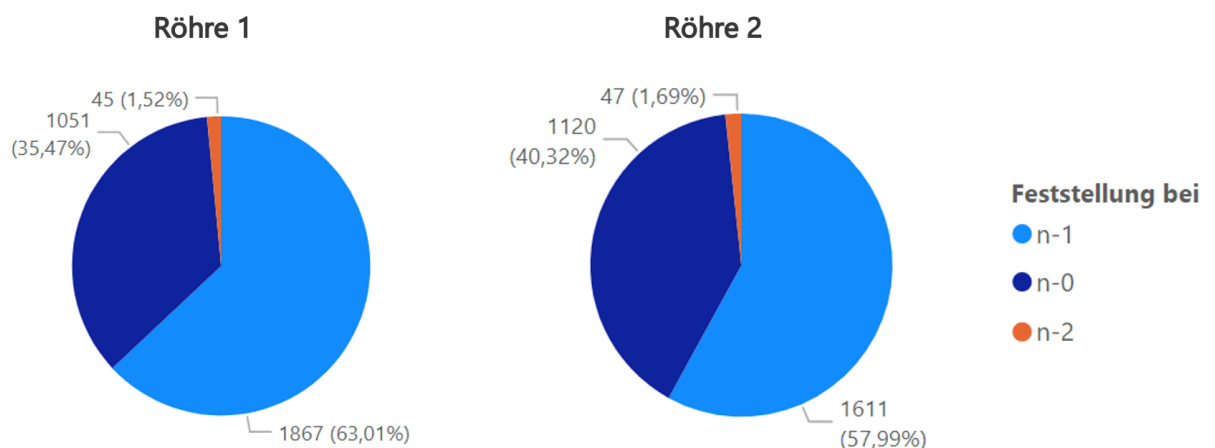


Abbildung 4-16: Zeitliche Dokumentation der Schäden

Diese Abbildung zeigt, dass die meisten Schäden bei beiden Röhren zum Zeitpunkt n-1 dokumentiert wurden. In Röhre 1 entfällt der größte Anteil der Schäden auf den Zeitpunkt n-1 mit 63,01 %, gefolgt von n-0 mit 35,47 %. Ein ähnliches Muster zeigt sich in Röhre 2, wo 57,99 % der Schäden bei n-1 und 40,32 % bei n-0 dokumentiert wurden. Ein deutlicher Rückgang der Häufigkeit ist bei den dokumentierten Schäden zum Zeitpunkt n-2 erkennbar. Die Anteile der dokumentierten Schäden zum Zeitpunkt des Auftretens sind in beiden Röhren etwa gleich, mit 1,52 % in Röhre 1 und 1,69 % in Röhre 2.

## 4.4 Baustelle D

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden lediglich die Risse analysiert, wie dies bereits für die Baustelle D in der zugrunde liegenden Datengrundlage beschrieben wurde. Bei dieser Schadensanalyse wurden über 3.000 Ringe untersucht. Es wurde festgestellt, dass 45,37 % der Ringe unbeschädigt blieben, während an 54,63 % der Ringe Schäden dokumentiert wurden.

Das Tunnelprojekt verzeichnet insgesamt 2.348 Risse. Aufgrund der vorliegenden Datengrundlage lässt sich schließen, dass ein durchschnittlich beschädigter Ring etwa 1,32 Risse aufweist. Des Weiteren erlaubt die vorliegende, qualitativ hochwertige Schadensdokumentation eine Unterteilung der Risse in verschiedene Größenkategorien, welche in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist.

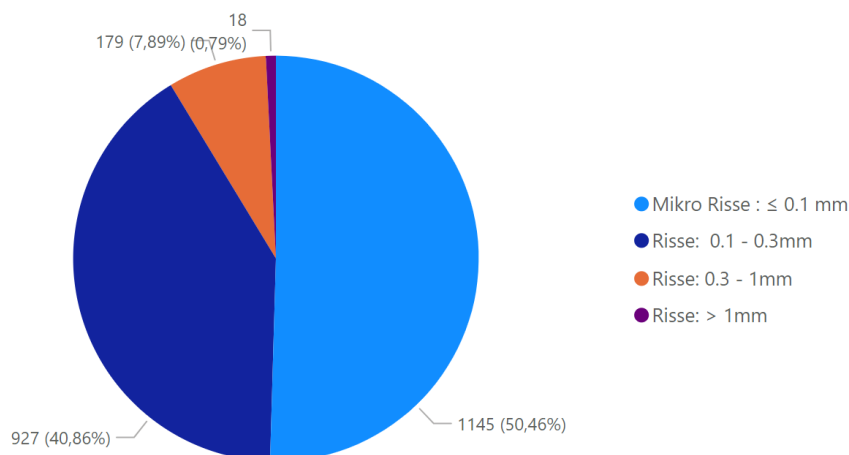


Abbildung 4-17: Rissverteilung nach deren Größe

Die Abbildung zeigt ein Kreisdiagramm, welches die Verteilung von Rissen nach ihrer Größe darstellt. Die Risse werden in vier Kategorien unterteilt: Mikro-Risse ( $\leq 0,1$  mm), Risse zwischen 0,1 und 0,3 mm, Risse zwischen 0,3 und 1 mm sowie Risse größer als 1 mm. Mikro-Risse machen mit 1.145 Einträgen den größten Anteil aus, was 50,46 % der gesamten Risse entspricht. Risse zwischen 0,1 und 0,3 mm stellen mit 927 Einträgen 40,86 % dar und bilden die zweitgrößte Kategorie. Im Vergleich dazu sind Risse zwischen 0,3 und 1 mm mit 179 Einträgen und einem Anteil von 7,89 % seltener, während Risse größer 1 mm mit lediglich 18 Einträgen und einem Anteil von 0,79 % die kleinste Kategorie darstellen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Mikrorissen am höchsten ist.

Zur Veranschaulichung der Rissverteilung entlang der Tunnelröhre wird im Folgenden eine weitere Abbildung angeführt. Dazu wird die Anzahl der Risse entsprechend der Ringnummern entlang der Tunnelachse dargestellt.

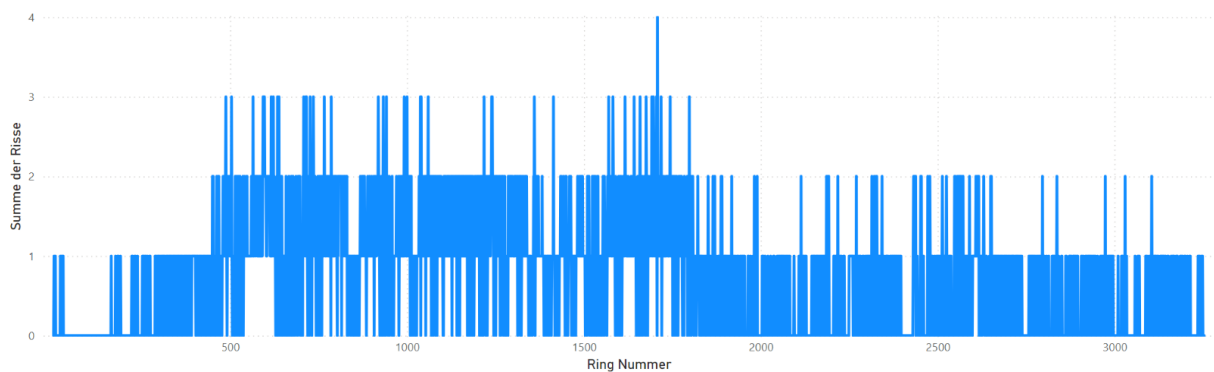


Abbildung 4-18: Summe der Risse nach Ringnummer

Zu Beginn des Vortriebs ist die Anzahl der Schadensrisse gering und unregelmäßig verteilt. Es treten vereinzelt Risse auf, wobei die Häufigkeit insgesamt niedrig bleibt. In der Mitte der Darstellung steigt die Anzahl der Risse deutlich an. Hier zeigt sich eine dichte und häufigere Verteilung von Rissen, wobei einzelne Ringe Spitzenwerte von drei bis vier Rissen erreichen. Dieser Abschnitt weist die höchste Konzentration an Schäden auf. Im Endbereich des Vortriebs ist wiederum eine Abnahme der Rissbildung zu verzeichnen. Die Verteilung wird weniger dicht, und es sind zunehmend Ringe ohne erkennbare Schäden zu beobachten. Insgesamt verdeutlicht die Grafik eine Entwicklung von geringer Riss Häufigkeit am Anfang, über eine Phase mit einer hohen Konzentration in der Mitte, bis hin zu einem deutlichen Rückgang der Schäden am Ende der analysierten Ringe. Es wäre empfehlenswert, bei einer solchen Rissanalyse die Risse mit geologischen Daten zu korrelieren, um eine differenzierte Klassifizierung vorzunehmen. Auf diese Weise könnte festgestellt werden, inwiefern die Risse gebirgsbedingt sind. Aufgrund der zur Verfügung gestellten Datengrundlage ist eine solche Analyse jedoch nicht möglich.

Aufgrund der qualitativ hochwertigen Schadensdokumentation der Risse an dieser Baustelle kann die Analyse entlang der Tunnelachse noch weiter präzisiert werden. Dabei erfolgt eine Einteilung der Risse nach ihrer Größe. Mikrorisse sowie Risse mit einer Breite von weniger als 0,3 mm werden in dieser Analyse nicht weiter betrachtet, da sie häufig auftreten und über das gesamte Tunnelbauwerk verteilt sind, wodurch sie keine signifikante Aussagekraft besitzen. Stattdessen konzentriert sich die Untersuchung auf relevante Risse mit Breiten zwischen 0,3 mm und 1 mm sowie auf Risse mit einer Breite von über 1 mm. Diese werden detailliert analysiert und in der folgenden Grafik entlang der Tunnelachse dargestellt.

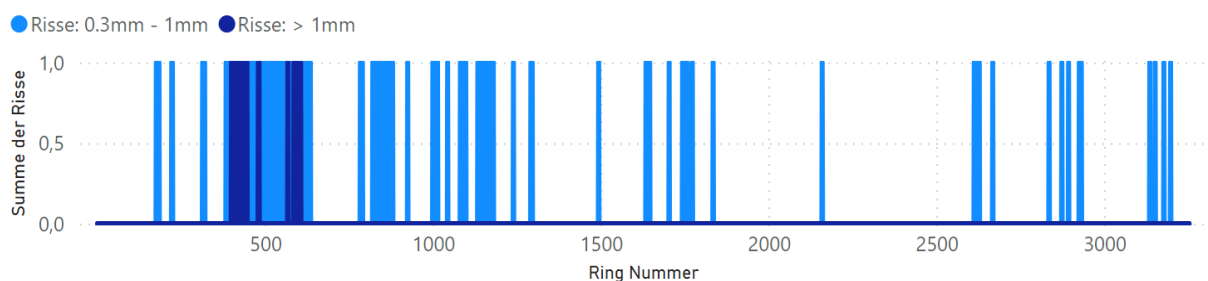


Abbildung 4-19: Summe der Risse nach Ringnummer und Größe

Im Bereich um Ring Nr. 500 lässt sich eine signifikante Häufung von Rissen mit einer Größe von über 1 mm feststellen. In diesem Bereich gab es sehr starke seitliche Gebirgsdrücke, welche zur Optimierung des Bewehrungskorbes geführt haben. Zur Minderung des Schadensausmaßes in diesem Bereich wurden als Gegenmaßnahme ein alternativer Tübbing-Typ eingebaut und

Anpassungen der Ringspaltfüllung vorgenommen, wie in der Tabelle 3-4: Rahmenbedingungen Baustelle D beschrieben. Die Grafik verdeutlicht, dass die ergriffenen Maßnahmen erfolgreich waren, da im weiteren Verlauf des Tunnels keine Risse größer als 1 mm festgestellt werden konnten. Im weiteren Verlauf des Tunnels lassen sich moderate Schadensspitzen mit einer Größe von 0,3–1 mm beobachten. Die beobachteten Schadensspitzen treten in unregelmäßigen Abständen auf und lassen sich keiner spezifischen Ursache zuordnen. Zudem kann kein Zusammenhang mit der Schadensdokumentation hergestellt werden, der mögliche Ursachen erklären könnte. Aus der Tabelle 3-4 geht weiters hervor, dass eine zweite Konvergenzzone im Bereich der Ringe Nr. 2.500 bis 3.000 aufgetreten ist. Hierauf wird mit dem Einsatz eines neuen Tübbing-Typs reagiert. Aufgrund dieses Tübbing-Typs konnten im betroffenen Bereich keine Risse größer als 1 mm festgestellt werden.

Die vorliegende Schadensdokumentation erlaubt darüber hinaus eine Differenzierung der Risse hinsichtlich ihres Auftretens, d. h. ob sie im Sohlbereich oder im Gewölbebereich lokalisiert wurden. Von den insgesamt 2.348 dokumentierten Rissen treten 1.326 im Gewölbebereich (8h–4h) auf, was einem Anteil von 56,48 % entspricht. Im Sohlbereich (4h–8h) wurden 1.022 Risse registriert, was 43,52 % der Gesamtschäden ausmacht. Die Verteilung der Risse zeigt, dass der Gewölbebereich stärker von Schäden betroffen ist als der Sohlbereich. Um die Ergebnisse besser veranschaulichen zu können, erfolgt eine grafische Darstellung.

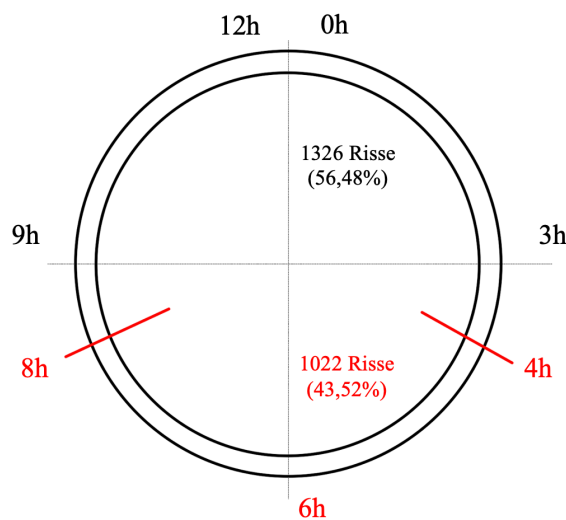


Abbildung 4-20: Grafische Darstellung der Rissverteilung anhand des Querschnitts

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im letzten Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse der vorliegenden Analyse sowie die Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen. In der Folge wird ein Ausblick gegeben und der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

### 5.1 Beantwortung der Forschungsfragen

**Forschungsfrage 1:** *In welchem Ausmaß treten Schäden bei Tübbingringen in den ausgewählten Tunnelbauprojekten auf?*

Die Schadensanalyse zeigt, dass Schäden an Tübbingringen in den untersuchten Tunnelbauprojekten in unterschiedlichem Ausmaß auftreten.

Auf Baustelle A wiesen 37,3 % der insgesamt 609 Ringe Schäden auf, was auf eine signifikante, aber nicht überwältigende Beschädigungsrate hinweist. Besonders auffällig war der Bereich der ersten 50 Ringe, der aufgrund ungünstiger geologischer Bedingungen und bautechnischer Herausforderungen eine hohe Schadenshäufigkeit von 4,38 Schäden pro Ring aufwies. Im weiteren Verlauf des Tunnelbaus konnte die Schadenshäufigkeit durch spezifische Maßnahmen, welche einen angepassten Regelvortrieb beinhalteten, reduziert werden.

In Bezug auf die Baustelle B lässt sich festhalten, dass in der ersten Röhre 54,9 % der 1.918 Ringe beschädigt sind, während in der zweiten Röhre lediglich 35,2 % der 2.329 Ringe betroffen sind. Dies entspricht einer deutlich geringeren Schadensquote. Diese Unterschiede deuten auf mögliche verschiedene geologische oder bauliche Bedingungen hin, die den Schaden begünstigen könnten. Insbesondere in Röhre 2, die eine geringere Schadensquote aufweist, könnten unterschiedliche lokale Bedingungen oder effektivere technische Maßnahmen eine Rolle spielen. Allerdings lassen sich diese Unterschiede auf Basis der vorliegenden Daten nicht eindeutig nachweisen.

Die Ergebnisse auf Baustelle C zeigen, dass in beiden Röhren etwa 39 % der Tübbingringe beschädigt waren, was im Vergleich zu den anderen Baustellen einen ähnlichen Schadensumfang darstellt.

In Baustelle D wiesen 54,63 % der untersuchten Ringe Schäden auf, wobei die Häufigkeit der Schäden in bestimmten Bereichen des Tunnels (insbesondere in konvergierenden Zonen) signifikant höher war.

Um die dargestellten Ergebnisse besser veranschaulichen zu können, erfolgt im Folgenden eine grafische Darstellung in Form einer Übersicht.



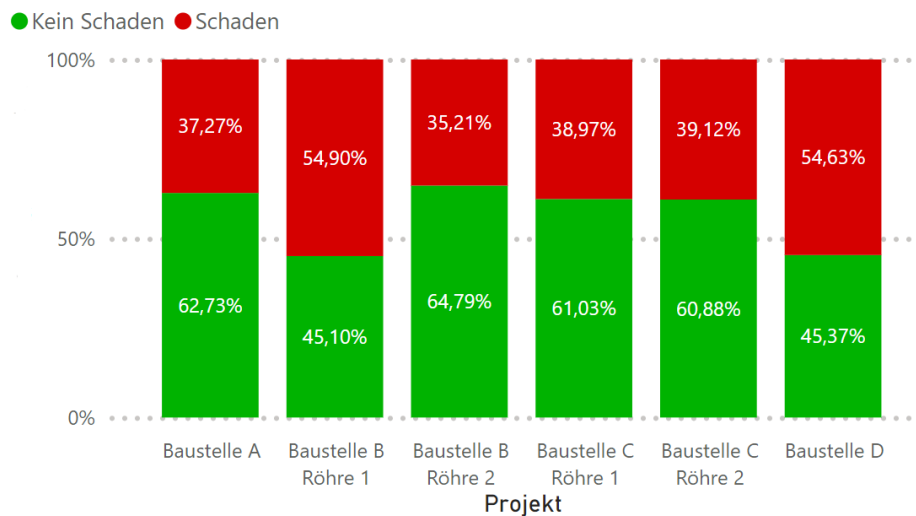


Abbildung 5-1: Zusammenfassung der gesunden und der beschädigten Ringe

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass in den meisten Projekten ein erheblicher Anteil der Tübbingringe beschädigt ist. Gleichzeitig bestehen jedoch große Unterschiede in der Schadensverteilung und -intensität. Die Schäden können durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden, darunter der Bewehrungsgehalt, die Betonrezeptur, der Produktionsprozess der Tübbingsegmente, das eingesetzte Personal (z.B. Maschinenführer, Ringbauer, ...), das Vortriebssystem (z. B. Einzelpressen, Doppelpressen, Druckring), die geologischen Bedingungen sowie die ergriffenen Maßnahmen. Aufgrund der begrenzten Datengrundlage und der Komplexität der Einflussfaktoren ist es jedoch nicht möglich, die Schäden in dieser Arbeit präzise einer spezifischen Ursache zuzuordnen.

**Forschungsfrage 2:** *Welche Arten von Tübbingschäden treten bei den einzelnen Tunnelbauprojekten auf, und wie häufig kommen sie vor?*

Die häufigsten und zugleich einzig dokumentierten Schadensarten bei den untersuchten Tunnelbauprojekten sind Risse und Abplatzungen. Bei Baustelle A dominieren die Risse mit einem Anteil von etwa 65 % im Vergleich zu den Abplatzungen. In den Baustellen B und C hingegen überwiegen die Abplatzungen mit einem signifikant hohen Anteil in beiden Röhren. Auffällig ist, dass bei Baustelle B zusätzlich Werksfehler dokumentiert wurden, was die bereits mehrfach hervorgehobene, qualitativ hochwertige Schadensdokumentation dieser Baustelle unterstreicht. Bei Baustelle D beschränkt sich die Analyse ausschließlich auf Risse, die aufgrund der detaillierten Rissdokumentation präzise klassifiziert werden konnten. Abplatzungen wurden bei Baustelle D nicht festgestellt, da diese in der Schadensdokumentation nicht verzeichnet sind. Zudem wurde durch Gespräche bestätigt, dass bei dieser Baustelle keine oder lediglich vernachlässigbare Abplatzungen auftraten.

Darüber hinaus ist zu beobachten, dass bei einigen Projekten Abplatzungen häufiger und in deutlich größerem Umfang auftreten als Risse. Diese Beobachtung lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass bei der Verwendung von Universalringen mit schrägen Längsfugen in der Herstellung von den Tübbingsegmenten eine hohe Betonüberdeckung im Spitzenwinkel sowie an den Seiten der Längsfugen entsteht. Aufgrund der Ovalisierung der Tübbingringe können an den Längsfugen hohe Kantendrucke auftreten, die zu erhöhten Kontaktspannungen zwischen den benachbarten Tübbingsegmenten führen. Diese Spannungen könnten eine Ursache für die Abplatzungen im Bereich der Längsfugen und insbesondere in den Ecken darstellen. Diese Hypothese müsste jedoch durch weitere Forschung untermauert werden und



ist daher vorerst als eine Vermutung des Autors zu betrachten. Die vorhandene Datengrundlage reicht nicht aus, um eine umfassende Evaluierung oder einen Nachweis zu ermöglichen.

**Forschungsfrage 3:** *Ist eine Vergleichbarkeit der Tunnelbauprojekte hinsichtlich des Ausmaßes der Tübbingschäden möglich?*

Um die Forschungsfrage 3 zu beantworten, ist zunächst eine Bewertung der Datengrundlage erforderlich, die im Kapitel „Datengrundlage“ für jede Baustelle vorgenommen wurde. Im Folgenden wird diese Bewertung hinsichtlich der Qualität und Quantität der Daten vorgenommen, um zu beurteilen, ob die Datengrundlage als ausreichend oder unzureichend einzustufen ist.

	Qualitativ	Quantitativ
<b>Baustelle A</b>	ausreichend	unzureichend
<b>Baustelle B</b>	ausreichend	ausreichend
<b>Baustelle C</b>	unzureichend	ausreichend
<b>Baustelle D</b>	unzureichend	ausreichend

*Tabelle 5-1: Bewertung Datengrundlage*

Ein direkter Vergleich der vier analysierten Baustellen ist aufgrund der unterschiedlichen Bewertungen der Qualität und Quantität der Datengrundlagen sowie der variierenden eingesetzten Systeme schwierig. Unterschiedliche Erhebungsmethoden und Datenverfügbarkeit erschweren einen objektiven Vergleich, weshalb jede Baustelle individuell betrachtet werden muss. Neben der unterschiedlichen Datengrundlage wirken sich auch die variierenden Rahmenbedingungen der einzelnen Baustellen so aus, dass ein direkter Vergleich nicht machbar ist.

## 5.2 Fazit und Ausblick

Wie bereits in der Beantwortung der Forschungsfrage 3 erläutert, können die Projekte aufgrund der unterschiedlichen Quantität und Qualität der Datengrundlagen nicht direkt miteinander verglichen werden. Einige Baustellen weisen eine große Anzahl dokumentierter Schäden auf, die jedoch qualitativ schlecht erfasst wurden. Andere hingegen verfügen über wenige, aber qualitativ hochwertige Schadensdokumentationen. Eine detaillierte Bewertung der Daten hinsichtlich Quantität und Qualität ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Um eine Vergleichbarkeit der Baustellen zu gewährleisten, müssten die Datengrundlagen aller Projekte hinsichtlich Qualität und Quantität auf demselben Niveau vorliegen.

Selbst unter diesen Bedingungen bleibt ein Vergleich jedoch schwierig, da die Randbedingungen der Baustellen stark variieren. Insbesondere unterscheiden sich die Baustellen im Hinblick auf das Tübbingdesign und den Ausbau (einschaliger bzw. zweischaliger Ausbau), was einen weiteren Grund darstellt, warum die Projekte nicht direkt vergleichbar sind. Die spezifischen Unterschiede der Projekte hinsichtlich der eingesetzten Systeme werden im Kapitel „Datengrundlage“ ausführlich erläutert. Eine Gemeinsamkeit aller Projekte besteht darin, dass sie mit Perlkies hinterfüllt wurden und der Einsatz einer Einfachschildmaschine mit vergleichbarem Durchmesser erfolgte. Bei der Ringspaltverfüllung ist anzumerken, dass wesentliche Unterschiede sowohl in den verwendeten Korngrößen des

Perlkieses als auch in der Methode der Einbringung bestehen. Für einen direkten Vergleich der Baustellen müssten jedoch die gesamten Randbedingungen vollständig identisch sein.

Aufgrund der aufgezeigten Unterschiede zwischen den Baustellen sowie der stark variierenden Qualität und Quantität der Baudokumentationen ist ein Vergleich der Baustellen im Rahmen dieser Masterarbeit nicht möglich, um potenzielle Schadenswiederholungen eindeutig einem bestimmten Grund zuzuordnen. Daher musste jedes Projekt isoliert betrachtet und analysiert werden. Aus der Analyse ging hervor, dass jedes Projekt erhebliche Schäden aufweist, deren Ursachen auf eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren zurückgeführt werden können. Zu diesen Faktoren zählen unter anderem der Bewehrungsgehalt der Tübbingsegmente, die Betonrezeptur, der Produktionsprozess der Tübbingsegmente, das eingesetzte Personal (z. B. Maschinenführer, Ringbauer), das Vortriebssystem (z. B. Einzelpressen, Doppelpressen, Druckring), die geologischen und geotechnischen Bedingungen sowie weitere Aspekte.

Wie in der Einleitung dieser Masterarbeit dargelegt, wurden bereits in den 1980er-Jahren Vermutungen geäußert, dass ein Zusammenhang zwischen der Ringspaltverfüllung und Schäden an den Tübbingungen besteht. Diese Problematik ist zweifellos auch heute noch aktuell, was die Relevanz einer genaueren Untersuchung unterstreicht. Im Rahmen dieser Arbeit lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Perlkiesverfüllung und den beobachteten Schäden weder eindeutig bestätigen noch vollständig ausschließen. Diese Unsicherheit spiegelt sich auch in den Ergebnissen wider, die generell auf eine potenzielle Problematik des eingesetzten Systems im Hinblick auf Tübbingschäden hinweisen. Die vorhandene Datenbasis reicht jedoch nicht aus, um andere mögliche Einflussfaktoren, die an so einer Schadensstelle zusammenwirken, mit hinreichender Sicherheit ausschließen zu können.

Um eine präzisere Zuordnung der Schäden im Zusammenhang mit der Perlkieshinterfüllung vornehmen zu können, wären weiterführende Untersuchungen erforderlich, die die Wechselwirkungen zwischen den Tübbingungen und dem Perlkies als Hinterfüllmaterial berücksichtigen. Insbesondere wäre es notwendig, den aktuellen Zustand der Gebirgsverhaltenstypen systematisch den beobachteten Schäden gegenüberzustellen, um potenzielle Einflüsse des Gebirges als Ursache der Schäden auszuschließen. Darüber hinaus könnte der Einsatz eines Vergleichstunnels mit identischer Typologie und vergleichbarem Gebirgsverhalten, jedoch einer alternativen Hinterfüllmethode oder der Einsatz einer Doppelschild TBM, wertvolle Erkenntnisse liefern. Sollten sich bei der Analyse des Vergleichstunnels mit der alternativen Hinterfüllmethode bzw. der alternativen TBM weniger Schäden zeigen, könnten die beobachteten Schäden in der untersuchten Konfiguration mit größerer Sicherheit der Perlkieshinterfüllung zugeschrieben werden. Allerdings stellt die Realisierung solcher Untersuchungen eine erhebliche Herausforderung dar, da Baustellen, wie diese Arbeit gezeigt hat, aufgrund der zahlreichen variierenden Randbedingungen nur schwer miteinander vergleichbar sind.

Über diese Überlegungen hinaus hält es der Autor für erforderlich, weitere spezifische Fragestellungen und Ansätze in zukünftigen Forschungsarbeiten zu verfolgen, um das Thema der Tübbingschäden voranzutreiben und Möglichkeiten zur Minimierung dieser Schäden zu entwickeln:

- Um die in Forschungsfrage 2 aufgestellte Hypothese gegebenenfalls zu verifizieren, sollte folgende Fragestellung in die zukünftige Forschung einbezogen werden:  
Wirkt sich die Zugabe von Stahl- oder Basaltfasern bei der Herstellung von Tübbingsegmenten auf das Abplatzverhalten in den Eck- und Randbereichen aus?

- Würde der Einsatz einer Doppelschildmaschine im Vergleich zu einer Einfachschildmaschine zu einer Verringerung von Tübbingschäden führen, da bei der Doppelschildmaschine die erforderlichen Pressenkräfte auf die Tübbinge konstant aufrechterhalten werden können?
- Um mögliche Ursachen für die Tübbingschäden zu verifizieren, sollte die Dokumentation des Schadenszeitpunkts in zukünftigen Forschungsarbeiten umfassender analysiert und systematisch berücksichtigt werden. Der Zeitpunkt des Schadenseintritts stellt einen entscheidenden Faktor dar, da er eine differenzierte Eingrenzung potenzieller Schadensursachen ermöglicht. Tritt der Schaden beispielsweise bereits bei n-0 auf, können bestimmte Faktoren wie die Perlkieshinterfüllung oder geologische Gegebenheiten des Gebirges als Ursache ausgeschlossen werden. Im Gegensatz dazu lassen sich Schäden, die in den Phasen n-1, n-2 oder später auftreten, möglicherweise auf Einflüsse der Perlkieshinterfüllung, das Gebirgsverhalten oder andere Faktoren zurückführen. Diese Schlussfolgerung ist jedoch mit Vorsicht zu interpretieren und bleibt vorerst eine Annahme des Autors. Weiterführend kann diese Analyse auch interessant für die Sphärenzuordnung der aufgetretenen Tübbingschäden sein.
- Es sollten Analysen von Projekten mit anderen Arten der Ringspaltverfüllung, wie einer vollumfänglichen Verfüllung mit Mörtel oder Zwei-Komponenten-Mörtel, durchgeführt werden.

### 5.3 TIM und Tübbing: Ein Ausblick

In dieser Arbeit wurde neben der Schadensanalyse auch aufgezeigt, wie stark die Datengrundlagen der verschiedenen Baustellen voneinander abweichen. Daher ist es notwendig, ein einheitliches, digitalisiertes System für zukünftige Bauprojekte zu etablieren. Insbesondere im Bereich des Tunnelbaus zeigt sich, dass eine durchgängige Digitalisierung des gesamten Projektprozesses, von der Planung über die Bauphase bis hin zum Betrieb und der Instandhaltung, unverzichtbar ist. Im Mittelpunkt zukünftiger Entwicklungen sollte die Schaffung benutzerfreundlicher Softwareprogramme für ausführende Bauunternehmen stehen, die direkt auf der Baustelle implementiert werden können. Ein integratives System, wie beispielsweise ein cloudbasiertes TIM, bietet hierbei die Möglichkeit, alle relevanten Dokumentationsdaten zentral verfügbar zu machen. Dies erleichtert nicht nur den Zugriff, sondern ermöglicht auch die Weiterverwendung der Daten in den verschiedenen Projektphasen. Wie bereits in dieser Masterarbeit erwähnt, verfolgt die Stiftungsprofessur der Universität Innsbruck das Ziel, digitale Werkzeuge zur erfolgreichen Realisierung von Großprojekten im Tief- und Untertagebau zu entwickeln. Dabei liegt der Fokus auf der Integration von digitalen Bauwerksmodellen, Bauwerksdatenmodellierung, mathematischer Simulation und Machine Learning. Diese Technologien sollen in enger Kooperation mit der Baupraxis erforscht werden, um ein ganzheitliches, lebenszyklusorientiertes Tunnelinformationsmodell zu entwickeln. Ein solches Tunnelinformationsmodell wird in der nachfolgenden Abbildung dargestellt, das aus der Forschung der Stiftungsprofessur entstanden ist.

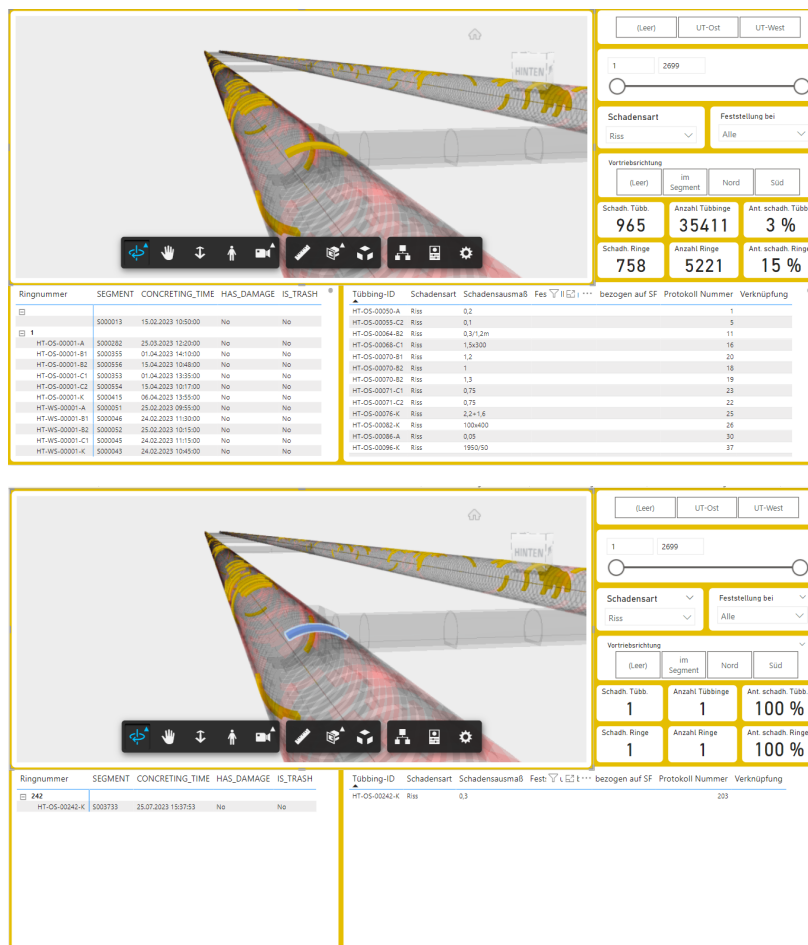


Abbildung 5-2: Forschungsergebnis aus der Stiftungsprofessur (TIM)

In diesem Tunnelinformationsmodell wurde ein 3D-Modell des Tunnels mit den Daten der Schadensdokumentation verknüpft. Im dargestellten Fall werden die Segmente mit Rissen angezeigt, wobei dieser Prozess auch für Abplatzungen und andere Schadensbilder angewendet werden kann. In diesem Modell können schadhafte Tübbingsegmente ausgewählt werden und man erhält für jedes Segment detaillierte Informationen zu den Schäden. Darüber hinaus können die Risse, Abplatzungen und anderen Schäden, sofern sie klassifiziert sind, nach ihrer Größe gefiltert werden. Dies ermöglicht es beispielsweise, Mikrorisse, die keine Auswirkungen auf die Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit haben, auszublenden. Diese Funktion vereinfacht die Identifikation und Sanierung von Schäden an den Tübbingsegmenten erheblich. Langfristig betrachtet hat ein solches digitales Gesamtsystem das Potenzial, die Effizienz, Transparenz und Qualität im Tunnelbau signifikant zu steigern. Es bildet die Grundlage für eine nachhaltige und innovative Weiterentwicklung der Branche und stellt sicher, dass zukünftige Bauprojekte sowohl technisch als auch organisatorisch optimal unterstützt werden.



## 6 Literatur

- [1] ÖBB-Infrastruktur AG. *Zielnetz 2040 – Das Bahnnetz der Zukunft* [Internet]. [zitiert 1. Oktober 2024]. Verfügbar unter: <https://infrastruktur.oebb.at/de/unternehmen/fuer-oesterreich/zukunft-bahn-zielnetz>
- [2] *U-Bahn-Ausbau U2 und U5* [Internet]. [zitiert 1. Oktober 2024]. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/projekte/verkehrsplanung/u-bahn/u2u5/>
- [3] Brenner Basistunnel BBT SE. *Europäische Dimension*. [Internet]. [zitiert 17. September 2024]. Verfügbar unter: <https://www.bbt-se.com/tunnel/europaeische-dimension/>
- [4] ÖBB-Infrastruktur AG. *Semmering-Basistunnel* [Internet]. [zitiert 17. September 2024]. Verfügbar unter: <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrecken/suedstrecke-wien-villach/semmering-basistunnel/infowelt>
- [5] *Erweiterungsprojekte: Speicherkraftwerk Kühtai* [Internet]. [zitiert 1. Oktober 2024]. Verfügbar unter: <https://www.erneuerbareplus.at>
- [6] G. Girmscheid. *Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus*. 3. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn; 2013.
- [7] A. Delisio, J. Zhao. *A new model for TBM performance prediction in blocky rock conditions*. In: *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014. S. 440–52. (43).
- [8] T. Babendererde, C. Hahn. *Einflüsse auf Tübbingschäden* [Internet]. 2012 [zitiert 18. September 2024]. (Tunnel). Report No.: 03. Verfügbar unter: [https://www.tunnel-online.info/download/446931/2012\\_03\\_Einfluesse\\_auf\\_Tuebbingschaeden.pdf](https://www.tunnel-online.info/download/446931/2012_03_Einfluesse_auf_Tuebbingschaeden.pdf)
- [9] ITA-AITES Working Group 2 - Research -Team Leader: J. Hurt, Herausgeber. *Damages of segmental lining*. 2019.
- [10] H. Stadelmann, M. Keller. *Ereignisbewältigung beim Schildvortrieb im Hartgestein*. In: *Felsabw* 21. 2003. (Nr. 5).
- [11] R. Galler. *Grundlagen maschineller Vortriebsverfahren*. Montan Universität Leoben: Lehrstuhl für Subsurface Engineering;
- [12] Herrenknecht AG. *Einfachschild-TBM* [Internet]. [zitiert 8. August 2024]. Verfügbar unter: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/einfachschild-tbm/>
- [13] P. Gehwolf. *Tragverhalten von Tübbingen im maschinellen Tunnelbau Experimentelle und numerische Analyse*. [Leoben]: Montan Universität Leoben; 2018.

- [14] W. Leitner. *Baubetriebliche Modellierung der Prozesse maschineller Tunnelvortriebe im Festgestein : von der Penetration zur Vortriebsgeschwindigkeit*. 1. Aufl. Norderstedt: Books on Demand GmbH; 2004.
- [15] FFG Projektdatenbank. *TIM: Tunnel Information Modeling*. 2024.
- [16] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik. *Richtlinie Tübbingsysteme aus Beton*. 2009.
- [17] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. German Tunnelling Committee (ITA-AITES). *Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen*. 2013.
- [18] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. German Tunnelling Committee (ITA-AITES). *Empfehlung für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen*. 2024.
- [19] B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer. *Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb*. 2. Aufl. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG; 2011.
- [20] G. Jodl Hans. *Sachstandsbericht Tübbinge*. 2005.
- [21] W. Wittke. *Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe*. Glückauf GmbH; 2006.
- [22] J. Madlmayr. *Ermittlung des Systemverhaltens von Tübbingverbindungen mittels Shearcone Dübeln bei unterschiedlichen Bewehrungslayouts*. Montan Universität Leoben; 2016.
- [23] K. Zilch, C. Diederichs, R. Katzenbach, K. Beckmann. *Geotechnik*. In Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2013. S. 1491–738. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-41872-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41872-3_1)
- [24] STUVA-Arbeitskreis „Dichtungsrahmen in Tübbingauskleidungen“. *Forschung + Praxis 54: Empfehlung für Dichtungsrahmen in Tübbingauskleidungen*. Köln: Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V. (STUVA); 2019.
- [25] S. Terfloth User: Sese\_Ingolstadt. Wikimedia Commons. 2008 [zitiert 27. August 2024]. Tübbing Katzenberg. Verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:T%C3%BCbbing\\_Katzenberg.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:T%C3%BCbbing_Katzenberg.jpg)
- [26] Bundesministerium für Digitales und Verkehr. *Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Dichtungsprofile (TL/TP-DP), TL/TP-ING*. In 2022. (Teil 7, Abschnitt 3).
- [27] H. G. Jodl, D. Kolic, W. Schlosser. *Planung, Herstellung und Anwendung von Tübbingen* [Internet]. 2003 [zitiert 27. August 2024]. Verfügbar unter: [https://neuronconsult.eu/publications/docs/Dubrovnik\\_2004\\_Jodl-Kolic.pdf](https://neuronconsult.eu/publications/docs/Dubrovnik_2004_Jodl-Kolic.pdf)
- [28] Herrenknecht AG. *Karussell-Tübbingproduktion für Boßlertunnel* [Internet]. 2015. Verfügbar unter: [https://www.bft-international.com/de/artikel/bft\\_Karussell-Tuebbingproduktion\\_fuer\\_Bosslertunnel-2451133.html](https://www.bft-international.com/de/artikel/bft_Karussell-Tuebbingproduktion_fuer_Bosslertunnel-2451133.html)



- [29] Herrenknecht Formwork [Internet]. 2024. Technologie Für die Tunnelauskleidung: Produktionsanlagen: Technik nach Maß. Verfügbar unter: <https://www.herrenknecht-formwork.com/produkte>
- [30] S. Medel. *Tübbingproduktion 3.0: Fit für die Zukunft* [Internet]. 2014. Verfügbar unter: [https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel\\_Tuebbingproduktion\\_3.0\\_Fit\\_fuer\\_die\\_Zukunft-2019603.html](https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel_Tuebbingproduktion_3.0_Fit_fuer_die_Zukunft-2019603.html)
- [31] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Herausgeber. *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)*. In 2023. (Teil 7 (Tunnelbau), Abschnitt 3 (Maschinelle Schildvortriebsverfahren)).
- [32] Richtlinie 853. *Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten*. DB Netz AG, Frankfurt; 2018.
- [33] J. Schwarz, G. Behnen. *Gekoppelte Tübbingfugen unter Verwendung thermoplastischer Elastomere und Thermoplaste für den einschaligen Ausbau*. Forschung + Technik 40; 2003.
- [34] D. Edelhoff, T. Berner. *Schäden am Tübbingausbau von Tunneln in der Bauphase - Ursachen und Vermeidungsstrategien*. In Fachzeitschrift für Ressourcen, Bergbau, Geotechnik, Tunnelbau und Equipment; 2017. S. Heft 3, 30-40.
- [35] DGGT. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Herausgeber. *Maschineller Tunnelbau: Erfahrungsstand zur Ringspaltverfüllung bei einschaligen Tunneln mit Schwerpunkt deutsche Eisenbahntunnel*. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2022: Kompendium der Tunnelbautechnologie Planungshilfe für den Tunnelbau. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG; S. 53–137.
- [36] C. Boley. Universität der Bundeswehr München. TBM Ringspaltverpressung. Verfügbar unter: <https://www.unibw.de/geotechnik/tbm-ringspaltverpressung>
- [37] M. Thews, C. Budach. *Mörtel im Tunnelbau - Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen zur Verfüllung des Ringspalts bei Tunnelvortriebsmaschinen*. In: BauPortal. 2009. S. 706–11. (Jg. 121, Nr. 12).
- [38] M. Husmann. *Einfluss der Ringspaltverpressung auf die Beanspruchung der Tübbingröhre in Tunnellängsrichtung*. [Essen]: Universität Duisburg-Essen Fakultät für Ingenieurwissenschaften Abteilung Bauwissenschaften, Fachgebiet Geotechnik; 2020.
- [39] J. Y. Oh. *Interaktion der Ringspaltverpressung mit dem umgebenden Baugrund und der Tunnelauskleidung*. Rheinisch-Westfälische technische Hochschule Aachen; 2013.
- [40] S. Babendererde, L. Babendererde, J. Holzhäuser. *Verpressen der Schildschwanzfuge hinter einer Tunnelvortriebsmaschine mit Tübbingausbau*. Taschenbuch für den Tunnelbau. 2002.
- [41] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. *Empfehlung zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen*. 2010.

- [42] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen*. 2021.
- [43] A. Vigl. *TBM Support in Squeezing Rock – A Convergence-Compatible Segmental Lining System*. In: FELSBAU / ROCK AND SOIL ENGINEERING. GLUECKAUF GMBH; 2003. (21 (6)).
- [44] M. Thews, M. Flora. *Maschinelles Tunnelvortrieb - Verfahrenstechniken, Planungsgrundlagen und Herausforderungen*. In: K. Bergmeister, F. Fingerloos, J. D. Wörner, Herausgeber. *Beton-Kalender 2025* [Internet]. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG; 2025. S. 31–76. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/9783433611999.ch2>
- [45] C. Thienert. *Zementfreie Mörtel für die Ringspaltverpressung beim Schildvortrieb mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust*. Bergische Universität Wuppertal; 2010.
- [46] A. Feddema, M. Möller, W.H. van der Zon, T. Hashimoto. *ETAC two-component grout field test at Boltek rail tunnel. Modern Tunneling Science and Technology*. Swet & Zeitlinger; 2001.
- [47] C. Schulte-Schrepping. *Materialkonzepte zur Aktivierung von Ringspaltverfüllmaterialien im maschinellen Tunnelbau*. Ruhr-Universität Bochum; 2020.
- [48] *Post graduate Master Course Politecnico di Torino*. 2016.
- [49] F. Grübl. *Principal of Segmental Lining design, TBM-Drive and segmental linings*. Post Graduate Master Course Politecnico di Torino; 2016.
- [50] J. Hurt. *Precast concrete segmental liners*. 2016.
- [51] M. Flora, G. Fröch, W. Gächter. *Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle*. In *Bautechnik* 97; 2020. S. 780–8. Verfügbar unter: <http://doi.org/10.1002/bate.201900095>
- [52] FFG Projektdatenbank. *TIM: Tunnel Information Modelling* [Internet]. 2024. Verfügbar unter: <https://projekte.ffg.at/projekt/3368110>
- [53] W. Fentzloff, S. Rothe, C. Stahn, D. Papantonakis. *BIM meets Lean – Logistics study of a long tunnel using BIM and Lean methods*. In *Geomechanics and Tunnelling* 14; 2021. S. 286–97. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/geot.202100012>
- [54] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. *BIM im Untertagebau: Digitales Planen, Bauen, und Betreiben von Untertagebauten* [Internet]. 2019. Verfügbar unter: [https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec5/2019-05\\_DAUB\\_BIM\\_im\\_Untertagebau\\_DE.pdf](https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec5/2019-05_DAUB_BIM_im_Untertagebau_DE.pdf)
- [55] B. Kohlböck, E. Griesser, S. Hillisch, H. Birgmann, A. Fasching. *Das BIM-Pilotprojekt Köstendorf*. In: *Geomechanics and Tunnelling* 11. Salzburg: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG; 2018. S. 325–34.

- 
- [56] A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz. *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2021.
- [57] Microsoft. *Power BI* [Internet]. 2015. Verfügbar unter: <https://www.microsoft.com/de-at/power-platform/products/power-bi>