

# **Ein Vergleich von internationalen Abrechnungsmodellen im kontinuierlichen Tunnelvortrieb mit Fokus auf die neue ÖNORM B 2203-2**

Christian Öfner, BSc

Innsbruck, Oktober 2024

## **Masterarbeit**

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

## **Diplomingenieur**

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

Beurteiler:

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



Betreuer:

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



# Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Masterarbeitsbetreuer Herrn Prof. Matthias Flora für seine wertvolle Unterstützung, seine hilfreichen Ratschläge und seine tatkräftige Mithilfe bei der Erstellung dieser Masterarbeit. Seine Expertise und sein Engagement haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso möchte ich mich herzlich beim Team des Arbeitsbereichs Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau bedanken, insbesondere bei Hannah Salzgeber und Hans Exenberger. Ihre Unterstützung bei zahlreichen Fragestellungen war von unschätzbarem Wert und hat mir sehr geholfen.

Ein großer Dank gebührt auch meinen Freunden, meiner Familie und meinen Mitstudierenden. Danke an meine Familie für ihre kontinuierliche Unterstützung während meiner gesamten Lebenslagen, besonders während der Schulzeit und den Jahren auf der Universität. Ihr Beistand hat mir stets den Rücken gestärkt.

Danke an meine Freunde, die immer gute Worte für mich gefunden, mich motiviert und vorangetrieben haben. Eure Ermutigung war für mich von unschätzbarem Wert.

Danke an meine Mitstudierenden für ihre Unterstützung bei all den Prüfungen und Projekten sowie für die gemeinsame Freude an der Universität. Eure Kameradschaft und Zusammenarbeit haben diese Jahre unvergesslich gemacht.



# Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit widmet sich einem internationalen Vergleich der Abrechnungsmodelle im maschinellen Tunnelbau. Dabei werden die nationalen und internationale Richtlinien eingehend analysiert und miteinander verglichen.

Zu Beginn dieser Arbeit werden auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche die Historie und die Grundlagen des Tunnelbaus erläutert. Mit diesen Erkenntnissen als Fundament wird anschließend die neue ÖNORM B 2203-2 (Ausgabe 2023-03-01) genauer untersucht und die wesentlichen Änderungen im Vergleich zum Vorgängerdokument im Detail beschrieben. Folgend werden die Besonderheiten der nationalen Standards der Schweiz („SIA 197“, „SIA 197/1“, „SIA 197/2“, „SIA 198“, „SIA 118/198“), Deutschland (DIN 18312), Südtirol (Allgemeine Technische Vertragsbestimmungen 2019) und Norwegen (NS 3420) charakterisiert sowie der Allianzvertrag und das ITA/FIDIC Emerald Book als alternative Vertragsmodelle vorgestellt.

Im Anschluss werden die Unterschiede der internationalen Standards zu einem Vergleich herangezogen, die zentralen Themen dabei umfassen Bodenklassifizierungen, Risikozeugordnungen, Vortriebsklassifizierungen und auftretende Erschwernisse.

Abschließend wird ein kurzer Ausblick über digitale Vortriebs- und Prozessdaten gegeben, um zukünftige Entwicklungen und mögliche Verbesserungen im maschinellen Tunnelbau aufzuzeigen.

# Abstract

This master's thesis is dedicated to an international comparison of billing models in mechanised tunnelling. The national and international guidelines are analysed in detail and compared with each other.

At the beginning of this thesis, the history and basics of tunnelling are explained on the basis of an extensive literature research. With these findings as a foundation, the new ÖNORM B 2203-2 (edition 2023-03-01) is then analysed in more detail and the main changes compared to the previous document are described in detail. The special features of the national standards of Switzerland ("SIA 197", "SIA 197/1", "SIA 197/2", "SIA 198" "SIA118/198"), Germany (DIN 18312), South Tyrol (General Technical Contract Conditions 2019) and Norway (NS 3420) are then characterised and the Alliance Contract and the ITA/FIDIC Emerald Book are presented as alternative contract models.

The differences between the international standards are then compared with the central topics including soil classifications, risk allocations, tunnelling classifications and complications that arise.

Finally, a brief outlook on digital tunneling and process data is provided to highlight future developments and potential improvements in mechanized tunneling.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| <b>Danksagung.....</b>                                | <b>I</b>   |
| <b>Kurzfassung .....</b>                              | <b>III</b> |
| <b>Abstract .....</b>                                 | <b>IV</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>                       | <b>V</b>   |
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>                    | <b>IX</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>                      | <b>XI</b>  |
| <b>1 Die Geschichte des Tunnelbaus .....</b>          | <b>1</b>   |
| 1.1 Antike .....                                      | 1          |
| 1.1.1 Qanat-Verfahren .....                           | 1          |
| 1.1.2 Gegenort-Verfahren.....                         | 2          |
| 1.1.3 Römisches Reich .....                           | 2          |
| 1.2 Mittelalter .....                                 | 3          |
| 1.3 Neuzeit.....                                      | 3          |
| 1.3.1 Sprengstoff .....                               | 3          |
| 1.3.2 Spritzbeton.....                                | 3          |
| 1.3.3 Tunnelvortriebsmaschinen .....                  | 4          |
| <b>2 Grundlagen .....</b>                             | <b>7</b>   |
| 2.1 Tunnelvortriebsmaschinen.....                     | 7          |
| 2.1.1 Tunnelbohrmaschinen (TBM).....                  | 7          |
| 2.1.1.1 Tunnelbohrmaschine ohne Schild.....           | 8          |
| 2.1.1.2 Tunnelbohrmaschine mit Schild .....           | 8          |
| 2.1.2 Schildmaschinen (SM) .....                      | 10         |
| 2.1.2.1 Schildmaschinen mit Vollschnittabbau .....    | 12         |
| 2.1.2.2 Schildmaschinen mit teilflächigem Abbau ..... | 12         |
| 2.1.3 Sonderformen .....                              | 12         |
| 2.2 Stützmittel.....                                  | 13         |
| 2.2.1 Tübbinge.....                                   | 14         |
| 2.2.2 Spritzbeton.....                                | 18         |
| 2.2.3 Bewehrungsmatten .....                          | 19         |
| 2.2.4 Anker .....                                     | 20         |
| 2.2.5 Spieße .....                                    | 24         |
| 2.2.6 Ausbaubögen .....                               | 24         |
| 2.3 Ringspaltverfüllung .....                         | 25         |
| <b>3 ÖNORM B 2203-2 .....</b>                         | <b>29</b>  |
| 3.1 Geschichte .....                                  | 29         |
| 3.2 Grundprinzipien eines Tunnelbauvertrages.....     | 29         |
| 3.3 Der österreichische Tunnelbauvertrag.....         | 30         |
| 3.4 Neuerungen der ÖNORM B 2203-2.....                | 31         |
| 3.5 Gebirgsklassifizierung .....                      | 33         |

|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.6      | Vortriebsklassen.....                                           | 35        |
| 3.6.1    | Erste Ordnungszahl.....                                         | 35        |
| 3.6.2    | Zweite Ordnungszahl.....                                        | 36        |
| 3.6.2.1  | TBM-O und TBM-A.....                                            | 36        |
| 3.6.2.2  | TBM-S und TBM-DS .....                                          | 36        |
| 3.6.2.3  | SM.....                                                         | 37        |
| 3.6.3    | Positionen des Ausbruchs .....                                  | 37        |
| <b>4</b> | <b>Internationale Vertragsmodelle.....</b>                      | <b>39</b> |
| 4.1      | Schweiz .....                                                   | 39        |
| 4.1.1    | Die Tunnelnorm der Schweiz .....                                | 39        |
| 4.1.2    | SIA 197 – Projektierung Tunnel - Grundlagen.....                | 40        |
| 4.1.3    | Risiko.....                                                     | 43        |
| 4.1.4    | Ausschreibung und Vertrag .....                                 | 43        |
| 4.1.5    | Umsetzung im Beispiel des Gotthard Basistunnels .....           | 45        |
| 4.1.6    | Ausbruchpositionen .....                                        | 46        |
| 4.2      | Deutschland.....                                                | 48        |
| 4.2.1    | DIN 18312 .....                                                 | 49        |
| 4.2.2    | Ausführung .....                                                | 50        |
| 4.2.3    | Abrechnung.....                                                 | 51        |
| 4.2.4    | Risikozuordnung.....                                            | 52        |
| 4.2.5    | Tunnelentwurf.....                                              | 52        |
| 4.3      | Italien – Südtirol.....                                         | 52        |
| 4.3.1    | Italien .....                                                   | 52        |
| 4.3.2    | Autonome Provinz Bozen - Südtirol.....                          | 53        |
| 4.3.2.1  | Allgemeine Technische Vertragsbestimmungen 2019 (ATV 2019)..... | 53        |
| 4.3.2.2  | Gebirgsbeschreibung.....                                        | 55        |
| 4.3.2.3  | Vortriebsklassen.....                                           | 56        |
| 4.3.2.4  | Ausführung.....                                                 | 57        |
| 4.3.2.5  | Abrechnung.....                                                 | 57        |
| 4.4      | Norwegen .....                                                  | 57        |
| 4.4.1    | Geschichte.....                                                 | 57        |
| 4.4.2    | Das norwegische Vertragsmodell .....                            | 59        |
| 4.4.3    | Risikoverteilung.....                                           | 60        |
| 4.4.4    | Nationaler Standard NS 3420 .....                               | 61        |
| <b>5</b> | <b>Alternative Vertragsmodelle.....</b>                         | <b>64</b> |
| 5.1      | Allianzvertrag.....                                             | 64        |
| 5.1.1    | Vergütungsmodell.....                                           | 64        |
| 5.1.2    | Risikoübernahme .....                                           | 65        |
| 5.1.3    | Organisationsstruktur.....                                      | 65        |
| 5.1.4    | Konfliktbehandlung .....                                        | 65        |
| 5.1.5    | Vorteile Auftraggeber:.....                                     | 66        |
| 5.1.6    | Vorteile Auftragnehmer:.....                                    | 66        |
| 5.2      | ITA/FIDIC Emerald Book .....                                    | 66        |
| 5.2.1    | Baugrundrisiko – Auftraggeber .....                             | 67        |
| 5.2.2    | Ausführungsrisiko – Auftragnehmer .....                         | 67        |
| 5.2.3    | Bill of Quantities – Für Ausbruch und Sicherung .....           | 67        |
| 5.2.4    | The Engineer – „Der Ingenieur“ .....                            | 68        |
| <b>6</b> | <b>Vergleich .....</b>                                          | <b>69</b> |
| 6.1      | Standards.....                                                  | 69        |

---

|         |                                                           |    |
|---------|-----------------------------------------------------------|----|
| 6.1.1   | DACH-Raum .....                                           | 69 |
| 6.1.2   | Norwegen als „Exot“ .....                                 | 70 |
| 6.2     | Aufbau der Normen .....                                   | 70 |
| 6.2.1   | Österreich .....                                          | 70 |
| 6.2.2   | Deutschland und Südtirol .....                            | 70 |
| 6.2.3   | Schweiz .....                                             | 71 |
| 6.2.4   | Norwegen .....                                            | 72 |
| 6.3     | Beschreibung von Boden und Fels .....                     | 72 |
| 6.3.1   | Österreich .....                                          | 72 |
| 6.3.2   | Deutschland .....                                         | 73 |
| 6.3.3   | Südtirol .....                                            | 73 |
| 6.3.4   | Schweiz .....                                             | 73 |
| 6.3.5   | Norwegen .....                                            | 74 |
| 6.4     | Risikozuordnung .....                                     | 75 |
| 6.4.1   | DACH-Raum .....                                           | 75 |
| 6.4.2   | Norwegen .....                                            | 76 |
| 6.5     | Vortriebsklassifizierungen .....                          | 76 |
| 6.5.1   | Österreich .....                                          | 76 |
| 6.5.2   | Deutschland .....                                         | 76 |
| 6.5.3   | Südtirol .....                                            | 77 |
| 6.5.4   | Schweiz .....                                             | 77 |
| 6.5.5   | Norwegen .....                                            | 78 |
| 6.6     | Tübbing und Ringspalt .....                               | 80 |
| 6.6.1   | Österreich .....                                          | 80 |
| 6.6.2   | Deutschland .....                                         | 80 |
| 6.6.3   | Südtirol .....                                            | 80 |
| 6.6.4   | Schweiz .....                                             | 81 |
| 6.6.5   | Norwegen .....                                            | 81 |
| 6.7     | Mehrausbruch .....                                        | 81 |
| 6.7.1   | Österreich .....                                          | 81 |
| 6.7.2   | Deutschland .....                                         | 83 |
| 6.7.3   | Südtirol .....                                            | 84 |
| 6.7.4   | Schweiz .....                                             | 86 |
| 6.7.5   | Norwegen .....                                            | 86 |
| 6.7.6   | Vergleich Vorhaltemaß und Überhöhung .....                | 87 |
| 6.8     | Arbeitsbereiche .....                                     | 89 |
| 6.8.1   | Österreich .....                                          | 89 |
| 6.8.2   | Deutschland .....                                         | 90 |
| 6.8.3   | Südtirol .....                                            | 90 |
| 6.8.4   | Schweiz .....                                             | 90 |
| 6.9     | Erschwernisse .....                                       | 91 |
| 6.9.1   | Österreich .....                                          | 91 |
| 6.9.1.1 | Wassererschwernisse: .....                                | 91 |
| 6.9.1.2 | Erschwernisse aufgrund von Klebrigkeit: .....             | 91 |
| 6.9.2   | Deutschland .....                                         | 92 |
| 6.9.2.1 | Wasserhaltung und Erschwernisse aufgrund von Wasser ..... | 92 |
| 6.9.3   | Südtirol .....                                            | 92 |
| 6.9.3.1 | Wasserhaltung und Erschwernisse aufgrund von Wasser ..... | 92 |
| 6.9.3.2 | Weitere Erschwernisse .....                               | 94 |
| 6.9.4   | Schweiz .....                                             | 94 |

---

|                                                          |                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.9.4.1                                                  | Wasserhaltung und Erschwernisse aufgrund des Wassers beim Vortrieb ..... | 94         |
| 6.9.4.2                                                  | Sonstige Erschwernisse .....                                             | 95         |
| 6.9.5                                                    | Norwegen.....                                                            | 95         |
| 6.10                                                     | Übersicht .....                                                          | 97         |
| <b>7</b>                                                 | <b>Ausblick .....</b>                                                    | <b>101</b> |
| 7.1                                                      | Ausblick digitaler Vortriebs- und Prozessdaten.....                      | 101        |
| 7.1.1                                                    | Ausgangssituation.....                                                   | 101        |
| 7.1.2                                                    | Prozessdatenanalyse als Qualitätssicherung .....                         | 103        |
| 7.1.3                                                    | Daten und künstliche Intelligenz .....                                   | 104        |
| <b>8</b>                                                 | <b>Fazit.....</b>                                                        | <b>105</b> |
| 8.1                                                      | Vergleich.....                                                           | 105        |
| 8.1.1                                                    | Normen .....                                                             | 105        |
| 8.1.2                                                    | Boden- und Vortriebsklassifizierung .....                                | 105        |
| 8.1.3                                                    | Risiko, Erschwernisse und Mehrausbrüche .....                            | 106        |
| 8.1.4                                                    | Alternative Vertragsmodelle .....                                        | 106        |
| 8.2                                                      | ÖNORM B 2203-2 Neuerungen – Einschätzung des Autors .....                | 107        |
| 8.2.1                                                    | Matrix .....                                                             | 107        |
| 8.2.2                                                    | Erschwernisse .....                                                      | 107        |
| 8.2.3                                                    | Drehmomentenfaktor.....                                                  | 108        |
| 8.2.4                                                    | Regelvortrieb, Sondervortrieb, Ereignisbewältigung .....                 | 108        |
| <b>Verpflichtungs- und Einverständniserklärung .....</b> |                                                                          | <b>109</b> |
| <b>9</b>                                                 | <b>Literatur.....</b>                                                    | <b>110</b> |

# Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Gripper-TBM .....                                                                  | 8  |
| Abbildung 2: Einfachschild-TBM .....                                                            | 9  |
| Abbildung 3: Doppelschild-TBM [11] .....                                                        | 9  |
| Abbildung 4: AVN-Maschine (Automatische Vortriebsmaschine Nass).....                            | 11 |
| Abbildung 5: EPB-Schild (Earth Pressure Balance Shield) .....                                   | 11 |
| Abbildung 6: Ringformen.....                                                                    | 17 |
| Abbildung 7: Ankersysteme [14] .....                                                            | 23 |
| Abbildung 8: Ankersysteme - Klassifikationsmatrix .....                                         | 23 |
| Abbildung 9: Ringspaltverfüllung .....                                                          | 25 |
| Abbildung 10: Anforderungen zementhaltiger Ringspaltmörtel .....                                | 26 |
| Abbildung 11: Rezeptur zementarmer Ringspaltmörtel.....                                         | 27 |
| Abbildung 12: Rezeptur Zweikomponenten-Ringspaltmörtel .....                                    | 27 |
| Abbildung 13: Vortriebsklassenmatrix TBM-O und TBM-A.....                                       | 36 |
| Abbildung 14: Vortriebsklassenmatrix TBM-S und TBM-DS .....                                     | 36 |
| Abbildung 15: Vortriebsklassenmatrix SM.....                                                    | 37 |
| Abbildung 16: Planungsphasen und Ziele der SIA 197 .....                                        | 41 |
| Abbildung 17: Gliederung der Ausbruchpositionen .....                                           | 48 |
| Abbildung 18: Begriffe für Tunnelvortriebsmaschinen – Vergleich.....                            | 54 |
| Abbildung 19: Ablauf bis zur Ausbaufestlegung .....                                             | 55 |
| Abbildung 20: Bonus-Malus-System .....                                                          | 65 |
| Abbildung 21: Aufgabenzuteilung AG / AN.....                                                    | 67 |
| Abbildung 22: Einteilung Gesteinsmassenklasse und Gesteinsunterstützung .....                   | 74 |
| Abbildung 23: Klassifikation geotechnischer Kategorien.....                                     | 78 |
| Abbildung 24: Klassifikation Untersuchungsklassen.....                                          | 78 |
| Abbildung 25: Zuordnung von Sicherungsmaßnahmen.....                                            | 79 |
| Abbildung 26: Beschreibung von Gebirgsunterstützende Maßnahmen auf Basis des Q-<br>Systems..... | 79 |
| Abbildung 27: Grenzflächen Mehrausbruch ÖNORM B 2203-2 .....                                    | 82 |
| Abbildung 28: Grenzflächen Mehrausbruch Legende ÖNORM B 2203-2.....                             | 82 |
| Abbildung 29: Grenzflächen Mehrausbruch DIN 18312 .....                                         | 83 |
| Abbildung 30: Grenzflächen Mehrausbruch Legende DIN 18312 .....                                 | 84 |
| Abbildung 31: Grenzflächen Mehrausbruch ATV 2019 .....                                          | 85 |
| Abbildung 32: Grenzflächen Mehrausbruch Legende ATV 2019 .....                                  | 85 |
| Abbildung 33: Grenzflächen Mehrausbruch SIA 118/198.....                                        | 86 |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 34: Grenzflächen Mehrausbruch Legende SIA 118/198 .....                       | 86  |
| Abbildung 35: Mehrausbruch Regelung Norwegen .....                                      | 87  |
| Abbildung 36: Arbeitsbereich TBM-O .....                                                | 89  |
| Abbildung 37: Arbeitsbereich TBM-S.....                                                 | 90  |
| Abbildung 38: Arbeitsbereich TBM ohne Schild .....                                      | 91  |
| Abbildung 39: Arbeitsbereiche SPV, MUF, MUL .....                                       | 91  |
| Abbildung 40: Reduktionsfaktor der Gruppenstunden bei Wasseranfall .....                | 94  |
| Abbildung 41: Vergleich prognostizierte und tatsächliche Vortriebsgeschwindigkeit ..... | 101 |
| Abbildung 42: Risikozuteilung .....                                                     | 103 |
| Abbildung 43: Einflussbereich der Bauzeit .....                                         | 103 |

# Tabellenverzeichnis

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 1: Vortriebsklassifizierung ÖNORM B 2203-2 .....     | 35  |
| Tabelle 2: Normenaufbau Deutschland und Südtirol .....       | 70  |
| Tabelle 3: Einteilung Vortriebsklassifizierung.....          | 76  |
| Tabelle 4: Vergleich Übermaß und Überhöhung .....            | 87  |
| Tabelle 5: Unterscheidungsmerkmale .....                     | 100 |
| Tabelle 6: Vor- und Nachteile eines Prozesscontrolling ..... | 104 |



# 1 Die Geschichte des Tunnelbaus

Um die historische Entwicklung genauer zu verstehen, ist es zunächst entscheidend, eine klare Unterscheidung zwischen zwei grundlegenden Typen zu treffen: dem "Stollen" und dem "Tunnel". Ein Stollen ist üblicherweise eine Bergbauanlage, die lediglich über einen Zugang verfügt und vorrangig für bergbauliche Zwecke genutzt wird. Ein bemerkenswertes Beispiel für diese Art von Bergwerk findet sich in Nazlet Khater, Ägypten, wo vor mehr als 30.000 Jahren Feuerstein abgebaut wurde. [1]

Der Tunnel hingegen repräsentiert ein künstliches Bauwerk mit zwei Durchgängen, dessen primärer Zweck darin besteht, Hindernisse zu überwinden. Die Geschichte des Tunnelbaus ist im Vergleich zum Stollenbau verhältnismäßig jung, da er erst mit der Entwicklung von fortschrittlichen Eisenwerkzeugen verwirklicht werden konnte. Für die Errichtung dieser Tunnel kamen Instrumente wie Spaten, Hacken und Handmeißel zum Einsatz. [2]

## 1.1 Antike

### 1.1.1 Qanat-Verfahren

Die frühesten Formen von Tunnelbauwerken manifestierten sich in den sogenannten "Qanaten", die bereits um 2000 v. Chr. im alten Iran entwickelt wurden und zum Teil noch heute verwendet werden. Ein Qanat ist ein ausgeklügeltes Netzwerk von unterirdischen Kanälen, das dazu dient, Wasser aus entfernten Quellen zu fördern. Eines der beeindruckendsten Beispiele für diese Technologie ist das "Zavareh's Kariz Qanat", das als eines der ältesten bekannten Bauwerke seiner Art gilt und auf ein Alter von über 5.000 Jahren geschätzt wird. Diese innovative Technik breitete sich im gesamten Persischen Reich aus und erreichte vor etwa 2.500 Jahren auch Ägypten. Ein Qanat besteht aus drei wesentlichen Komponenten: dem Mutterbrunnen, einem unterirdischen Tunnel und vertikalen Schächten. Der Mutterbrunnen wird unterhalb des Grundwasserspiegels angelegt. Die vertikalen Schächte werden in regelmäßigen Abständen von etwa 20 Metern gegraben und miteinander durch Verbindungstunnel zusammengeschlossen. Auf diese Weise kann das Wasser mit einer Neigung von etwa 0,3-0,5 % von der Quelle aus abwärts fließen. Die Tiefe der Mutterbrunnen variiert normalerweise zwischen 10 und 250 Metern, wobei in Extremfällen Tiefen von bis zu 450 Metern erreicht wurden. Die Länge der Tunnel erstreckt sich von einigen hundert Metern bis hin zu 120 Kilometern, wobei die durchschnittliche Länge in der Regel zwischen 6 und 25 Kilometern liegt. [3]

### 1.1.2 Gegenort-Verfahren

Eine weitere frühe Methode des Tunnelvortriebs war das sogenannte Gegenort-Verfahren. Dabei wurden zwei Tunnel von gegenüberliegenden Seiten aus vorangetrieben und in der Mitte miteinander verbunden. Im Vergleich zum Qanat-Verfahren wies diese Methode eine kürzere Bauzeit auf, da keine vertikalen Schächte erforderlich waren. Allerdings erforderte sie präzise Vermessungstechniken, um sicherzustellen, dass die Tunnelvortriebe in der Mitte aufeinandertrafen. Beispiele für Tunnelbauwerke, die mit dem Gegenortvortriebsverfahren errichtet wurden, sind der Hiskija-Tunnel, der im 8. Jahrhundert v. Chr. in Jerusalem angelegt wurde, sowie der Tunnel des Eupalinos aus dem 6. Jahrhundert v. Chr. in der antiken griechischen Stadt Samos. [4]

### 1.1.3 Römisches Reich

Während die frühen Tunnelbauwerke im Irak, in Jerusalem und auf Samos in erster Linie für die Sicherstellung der Wasserversorgung dienten, waren die Römer weitaus vielseitiger in ihren Anwendungen. Bereits im 6. Jahrhundert v. Chr. errichteten die Etrusker die ersten Tunnel in den Albaner Bergen, um den Wasserspiegel des Nemi-Sees abzusenken. Die Römer nutzten Tunnel zudem für Aquädukte, Entwässerungssysteme, Hochwasserschutz und die Umleitung von Flüssen sowie für den Ausbau ihres Straßennetzes.

Durch die breite Anwendung von Tunnelbauwerken konnten die Römer die Techniken des Tunnelbaus perfektionieren. Sie setzten sogar das Verfahren des Brandsprengens ein, um Tunnel zu schaffen. Hierbei wurde der zu entfernende Fels durch kontrolliertes Erhitzen und anschließendes Übergießen mit kaltem Wasser bearbeitet. Dieser Temperaturschock verursachte Risse im Gestein, die dann mit Eisenwerkzeugen weiterbearbeitet werden konnten. Abhängig von der örtlichen Gegebenheit wurden die Tunnel im Römischen Reich entweder nach dem Qanat-Verfahren oder Gegenort-Verfahren konstruiert. Dank dieser technologischen Fortschritte verbreitete sich das Wissen über den Tunnelbau in die gesamten Provinzen Europas, Afrikas und Asiens.

Pionierleistungen des römischen Tunnelbaus:

- Claudius-Tunnel (41 -52 n. Chr.)

Der Claudius-Tunnel wurde gebaut, um den Wasserspiegel des Fulciner Sees abzusenken. Mit einer Länge von 5,6 Kilometern galt er bis zur Eröffnung des Mont-Cenis-Eisenbahntunnels im Jahr 1871 als der längste Tunnel der Welt

- Vespasian-Titus-Tunnel (Begonnen unter Vespasian (69-79 n. Chr.); Beendet erst im 2. Jhd. n. Chr.)

Dieses Bauwerk diente der Umleitung eines Flusses in der südtürkischen Stadt Seleukia Pierie. Regelmäßige Überschwemmungen und die jährliche Schneeschmelze führten regelmäßig zur Verlandung der Stadt und des Hafens. Der Tunnel, der sich über 875 Meter erstreckt und aus verschiedenen Tunnelabschnitten, offenen Kanälen und Brückenbögen besteht, wurde im Jahr 2014 in die Tentativliste des UNESCO-Welterbes aufgenommen.

- Crypta Neapolitana (37 v. Chr.)

Die Crypta Neapolitana erstreckt sich über mehr als 700 Meter und ist einer von vier Straßentunneln, die von Cocceius in der Region rund um Neapel erbaut wurden. Sie sind Teil eines umfangreichen Netzwerks von militärischen Infrastrukturen. [2]

## 1.2 Mittelalter

Mit dem Untergang des Römischen Reiches kam auch der Bau neuer Tunnelbauwerke zum Erliegen. Dies verdeutlicht, dass der Tunnelbau eine enorme Macht, sei es staatlich oder kirchlich, erhebliche finanzielle Ressourcen und ein tiefgreifendes technisches Wissen erfordert. In der Zeit nach der Antike vergingen beinahe tausend Jahre, bis die ersten Tunnel in Mitteleuropa wieder errichtet wurden.

Das älteste bekannte frühmittelalterliche Wasserbauwerk dieser Art entstand erst im Jahr 1143 in Salzburg, als der Mönchsberg durchquert wurde. Der Auftraggeber für dieses Projekt war die Kirche und das Hauptziel bestand darin, das Wasser des Almkanals auf die Stadtseite des Mönchbergs zu leiten. Dieses Ereignis markiert den bescheidenen Neuanfang des Tunnelbaus in Mitteleuropa nach einer langen Periode des Stillstands. [4]

## 1.3 Neuzeit

Der Tunnelbau wurde vom Mittelalter bis zur Gegenwart durch drei bedeutende Errungenschaften stark geprägt: die Entwicklung von Sprengstoff, die Anwendung von Spritzbeton und der Einsatz von Tunnelvortriebsmaschinen.

### 1.3.1 Sprengstoff

Die erste dokumentierte Verwendung von Sprengstoff als Vortriebswerkzeug datiert auf die Jahre 1661-1681 beim Bau des "Canal du Midi" in Frankreich zurück. Der Haupttunnel erstreckte sich über eine Länge von 157 Metern und schuf eine Verbindung zwischen Toulouse und dem Mittelmeer. Im Jahr 1996 wurde der Kanal zum UNESCO-Weltkulturerbe erklärt.

Im 18. Jahrhundert wurden im Vereinigten Königreich weitere Tunnel unter Einsatz von Sprengstoff errichtet. Zu diesen zählten der 2060 Meter lange Harecastle-Tunnel und der 5000 Meter lange Tunnel bei Standedge. [5]

### 1.3.2 Spritzbeton

Im Jahr 1907 entwickelte der amerikanische Ingenieur Carl Ethan Akeley die erste "plastergun" (Gipsspritze), basierend auf einem Druckluftgebläse. Das Funktionsprinzip war einfach: Trockener Gips wurde durch einen Schlauch unter Druckluft hindurchgepresst und an einer Düse mit Wasser vermischt. Zwei Jahre später meldete er seine Maschine zum Patent an und erhielt dieses 1911 unter dem Namen "Apparatus for mixing and applying plastic or adhesive materials".

Der deutsche Ingenieur Carl Weber, der seit 1902 in den Vereinigten Staaten lebte und beruflich mit der sogenannten "Cement Gun" arbeitete, kehrte im Jahr 1919 nach Deutschland zurück. Dort gründete er sein eigenes Unternehmen, die "Torkret-Gesellschaft", und brachte die Spritzmaschine nach Deutschland.

Die erste dokumentierte Verwendung von Spritzbeton zur Sicherung im Tunnelvortrieb erfolgte im Jahr 1953 im Druckstollen Runserau-Imsterau des Inntalkraftwerks Prutz-Imst. Dies markierte einen Meilenstein in der Entwicklung der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise, die seitdem revolutioniert und weiterentwickelt wurde. [6]

### **1.3.3 Tunnelvortriebsmaschinen**

Die Geschichte der Tunnelvortriebsmaschine ist geprägt von einer kontinuierlichen Entwicklung und Innovation im Laufe der letzten 2 Jahrhunderte.

Im Jahr 1806 hatte Marc Isambard Brunel die visionäre Idee einer Schildmaschine. Seine Konstruktion hatte einen rechteckigen Querschnitt, der in 12 Rahmen mit jeweils 3 Kammern unterteilt war. Jeder Kammer war ein Mineur zugeteilt, wobei lediglich eine Vortriebsgeschwindigkeit von 3 bis 4 Metern pro Woche erreicht werden konnte. Der Vortriebskasten wurde schrittweise nachgerückt, währenddessen seitlich Wände gemauert wurden [7]

Die praktische Umsetzung erfolgte schließlich im Jahr 1825, als Brunel seine Maschine erstmals beim Bau eines Tunnels unter der Themse in London einsetzte. Aufgrund wiederholter Wassereintritte verzögerte sich jedoch die Fertigstellung dieses Projekts, das schließlich erst im Jahr 1843 abgeschlossen wurde.

Im Jahr 1869 entwickelte der Ingenieur Henry Greathead die erste runde Schildmaschine, ebenfalls für einen Themsetunnel. Dieser Tunnel war jedoch nur etwa 400 Meter lang und hatte einen Durchmesser von 2,18 Meter. Anstatt des Mauerwerks seitlich des Tunnels verwendete Greathead Eisensegmente für die Abstützung. Sie sind quasi die Vorgänger der heutigen Tübbings. Der Schild diente hierbei hauptsächlich dem Schutz der Mineure, die weiterhin händisch gruben. [8]

Die erste Vorläufergeneration mechanischer Tunnelvortriebsmaschinen geht auf das Jahr 1846 zurück, als der Belgier Henri Maus eine Art Schlagbohrmaschine entwickelte, um den Mont-Cenis-Tunnel zu errichten. Seine Maschine ritzte tiefe ringförmige Rillen in den Felsen, aus denen dann jeweils vier Blöcke von circa 2x0,5 Metern entstanden und anschließend leichter abgebaut werden konnten. Obwohl diese Methode prinzipiell funktionierte, wurde sie letztendlich nicht für den Bau des Mont-Cenis-Tunnels verwendet, der stattdessen mittels Sprengverfahren fertiggestellt wurde.

Die eigentliche Geburtsstunde der modernen Tunnelbohrmaschine erfolgte im Jahr 1851, als der Amerikaner Charles Wilson die erste TBM mit den charakteristischen Merkmalen einer heutigen TBM entwickelte. Seine Maschine war mit Scheibenfräsen an der gesamten Vorderseite ausgestattet, die er bereits einige Jahre zuvor patentiert hatte. Die Abbaugeräte waren auf einem rotierenden Bohrkopf angeordnet, und der notwendige Druck zum Abtrennen

des Felsens wurde durch seitlichen Druck auf das Gestein ausgeübt. Ein bedeutender Unterschied zu den heutigen TBMs bestand darin, dass die Drehachse der "Bohrkopfhalterung" senkrecht zur Tunnelmittellinie angeordnet war, was in Verbindung mit der Rotation des äußeren Bohrkopfes eine halbkugelförmige Tunnelwand schuf. Wilson setzte seine Tunnelbohrmaschine für den Bau des Hoosac-Tunnels ein, stieß jedoch in den ersten 3 Metern auf erhebliche Komplikationen mit den Scheibenfräsen, sodass der Rest des Tunnels letztendlich mittels Sprengvortrieb fertiggestellt wurde. Im Jahr 1875 überarbeitete er seine Erfindung und verfolgte einen neuen Ansatz. Er installierte nicht mehr die Scheibenfräsen an der gesamten Vorderseite, sondern platzierte Fräsen sowohl in der Mitte des Bohrkopfes als auch an einem äußeren Ring, während der Rest des Gesteins durch Sprengstoff entfernt wurde. Der Brite Frederick Edward Blackett Beaumont erhielt sein erstes Patent für eine Tunnelbohrmaschine im Jahr 1863, doch seine Konstruktion konnte nicht überzeugen. Im Jahr 1875 überarbeitete er seine Idee und meldete erneut ein Patent an. Seine Tunnelbohrmaschine verwendete ein Schneiderad mit mehreren radialen Armen, die am Ende einer horizontalen Welle montiert waren. Die Spitze des Bohrers bildete einen großen, kegelförmigen Meißel. Colonel Thomas English übernahm Beaumonts Idee im Jahr 1880 und entwickelte sie weiter. In den Schneidearmen waren zylinderförmige Hohlräume angeordnet, in denen die Fräsen montiert waren. Dank dieser Methode konnten die Fräsen ausgetauscht werden, ohne dass man zur Vorderseite der Bohrmaschine gelangen musste. Bereits 1881 wurden von Beaumont zwei Vortriebsmaschinen nach dem Patent von T. English gebaut und für den Channel-Tunnel eingesetzt. In den Jahren 1882-1883 gruben diese beiden Maschinen jeweils 1.840 Meter und 1.850 Meter mit beeindruckenden Spitzengeschwindigkeiten von 25 Metern pro Tag. Trotz ihrer Erfolge wurde der Bau des Channel-Tunnels aus politischen Gründen gestoppt.

Mehrere Jahrzehnte konnten keine nennenswerten Fortschritte erzielt werden, die erste wichtige Neuerung stammte von einer Erfindung von Schmid, Kranz und Co. Im Jahr 1931. Diese Maschine bestand aus Bohrwagen, Ankerwagen, Kabelwagen, Förderband und einem dreiarmligen Schneiderad. Dank dieser Innovation konnten fünf Mineure eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 5 Metern pro Schicht erreichen. Allerdings wiesen diese Maschinen einige Nachteile auf, darunter die Größe, das Gewicht, die eingeschränkte Mobilität und die Zeitverzögerung beim Zurückholen der Maschine.

Die letzte revolutionäre Veränderung in der Welt der Tunnelbohrmaschinen trat in den 1950er Jahren ein, als James S. Robbins die erste offene Gripper-TBM entwickelte, die ausschließlich Scheibenfräsen als Werkzeug nutzte. Die heutigen Tunnelbohrmaschinen basieren auf dem Prinzip, das Robbins damals entwickelte, und sie ähneln in vielerlei Hinsicht immer noch seinem ursprünglichen Konzept. [9]

Seit der Einführung der Schildmaschinen sind die Schilddurchmesser, die Antriebsleistung, das Drehmoment und die Vortriebsleistung ständig gewachsen. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Antriebsleistung und das Drehmoment stark von der Größe des Schilddurchmessers abhängen, während die Vortriebsleistung je nach den örtlichen geologischen Bedingungen stark variieren kann. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass die

technisch möglichen Grenzen für Schilddurchmesser und Vortriebsleistung noch nicht erreicht sind.

**Schilddurchmesser:** Für eine lange Zeit lagen die größten Schilddurchmesser bei etwa 10 Metern. Jedoch hat seit den 1990er Jahren eine bemerkenswerte Zunahme der Schilddurchmesser stattgefunden. Die neuesten Tunnelvortriebsmaschinen erreichen bereits das Doppelte dieses Durchmessers. Dies ist insbesondere auf den Bedarf an mehrspurigen Straßentunneln und mehrstöckigen Fahrebenen zurückzuführen.

**Antriebsleistung:** Die meisten Maschinen verfügen über eine Antriebsleistung von etwa 4.000 kW. Es gibt jedoch vereinzelt größere Maschinen, die Antriebsleistungen von bis zu 12.000 kW aufweisen.

**Drehmoment:** Neben dem Schilddurchmesser wird das erforderliche Drehmoment auch durch die Auslegung der Abbauwerkzeuge, insbesondere das Design des Schneidrades, beeinflusst. Die Mehrzahl der Maschinen verfügt über ein Drehmoment von bis zu etwa 40.000 kNm. Größere Maschinen können jedoch Drehmomente von 100.000 kNm und mehr erreichen.

**Vortriebsleistung:** Im Jahr 1950 konnte bereits eine starke Steigerung der Vortriebsleistung von 10 m pro Tag auf 30 m pro Tag erzielt werden. In den folgenden Jahrzehnten konnte keine nennenswerte Steigerung der Vortriebsgeschwindigkeit verzeichnet werden, diese wurde nämlich erst wieder seit circa 1995 stetig erhöht. Heute sind Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 60 m pro Tag möglich. Dabei ist zu beachten, dass erddruckgestützte Schildmaschinen tendenziell eine bessere Leistung erbringen als flüssigkeitsgestützte Schildmaschinen. [7]

## 2 Grundlagen

### 2.1 Tunnelvortriebsmaschinen

Tunnelvortriebsmaschinen stellen eine hervorragende Alternative zum Sprengvortrieb dar. Um den Einsatz einer TVM wirtschaftlich zu gestalten, sollte die Länge des zu bearbeitenden Abschnitts idealerweise mindestens 2.000 Meter betragen. Weitere Gründe für einen sinnvollen Einsatz einer Tunnelvortriebsmaschine sind ungünstige Boden- und Grundwasserverhältnisse, die ein geschlossenes System erfordern. Ebenso ist dies eine empfehlenswerte Wahl, wenn an der Oberfläche nur minimale Setzungen, Erschütterungen oder Lärmereignisse tolerierbar sind. Die Nutzung einer TVM ist jedoch nur dann wirklich wirtschaftlich, wenn sie auch eine hohe Vortriebsleistung erbringt und somit die Bauzeit erheblich verkürzt. Es ist jedoch zu beachten, dass für einen erfolgreichen Einsatz einer Tunnelvortriebsmaschine eine präzise Kenntnis der Baugrundverhältnisse unerlässlich ist, da eine Tunnelvortriebsmaschine immer speziell auf die vorherrschenden Bedingungen zugeschnitten ist. Zudem ist bei der Baustelleneinrichtung mit erheblichen Investitionskosten zu rechnen, was ein weiterer Aspekt ist, der berücksichtigt werden muss. Des Weiteren ist ein fundiertes Fachwissen des gesamten Personals von entscheidender Bedeutung, um einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der Tunnelvortriebsmaschine zu gewährleisten.

Tunnelvortriebsmaschinen werden in drei übergeordnete Kategorien unterteilt:

- Tunnelbohrmaschinen
- Schildmaschinen
- Sonderformen

Die Auswahl der geeigneten Vortriebsmaschine hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, darunter die geologischen Bedingungen wie Bodenart, Bodenüberdeckung und Grundwasserverhältnisse. Ebenso spielen die Größe und Verwendungszweck des Bauwerks, Umwelteinflüsse und weitere Aspekte eine entscheidende Rolle. In der Vergangenheit wurden Tunnelbohrmaschinen vermehrt für den Vortrieb in Felsgestein eingesetzt, während Schildmaschinen für Lockergestein bevorzugt wurden.

In den letzten Jahren sind jedoch Tunnelvortriebsmaschinen entwickelt worden, die sich gleichermaßen für beide Gesteinsarten eignen. Dies hat den Vorteil, dass auch in Bereichen mit kleineren Störzonen effizient gearbeitet werden kann, ohne dass es zu erheblichen Verzögerungen und zusätzlichen Kosten kommt. [10]

#### 2.1.1 Tunnelbohrmaschinen (TBM)

- TBM ohne Schild (TBM)
- TBM mit Schild (TBM-S)

Durch die spezifische Bauart von Tunnelbohrmaschinen (TBM) sind die erzeugten Querschnitte immer rund. TBM ohne Schutzschild können den Durchmesser leicht anpassen,

während bei Verwendung eines Schutzschilds der Durchmesser nicht mehr verändert werden kann. Der Bohrkopf rotiert und drückt die Schneidwerkzeuge gegen die Ortsbrust. Dabei erfolgt das Zerschneiden des Gesteins in kleine Bruchstücke und Staub. Um die Staubentwicklung zu kontrollieren, sind spezielle Maßnahmen erforderlich.

#### 2.1.1.1 Tunnelbohrmaschine ohne Schild

Die Tunnelbohrmaschine ohne Schutzschild, auch bekannt als "offene TBM" oder "Gripper-TBM", zeichnet sich dadurch aus, dass sie entweder über einen kurzen Staubschild oder gar keinen Schutzschild zum Schutz der Mineure verfügt. Daher kommt sie ausschließlich in Gebieten mit stabilem Gestein und ohne störende geologische Zonen zum Einsatz. Dies bedeutet, dass im gesamten Tunnelabschnitt mindestens 80 bis 90 Prozent weitgehend stabiles Gestein vorliegen muss und nur wenige Stützmaßnahmen erforderlich sind.

Die Sicherungsmaßnahmen für den Tunnel werden etwa 15 Meter hinter der Maschine auf einem Nachläufer durchgeführt. Dabei kommen konventionelle Methoden wie Bögen, Spritzbeton oder Anker zum Einsatz. Die TBM drückt sich seitlich gegen das Gestein und stützt sich auf diese Weise während des Vortriebs ab.

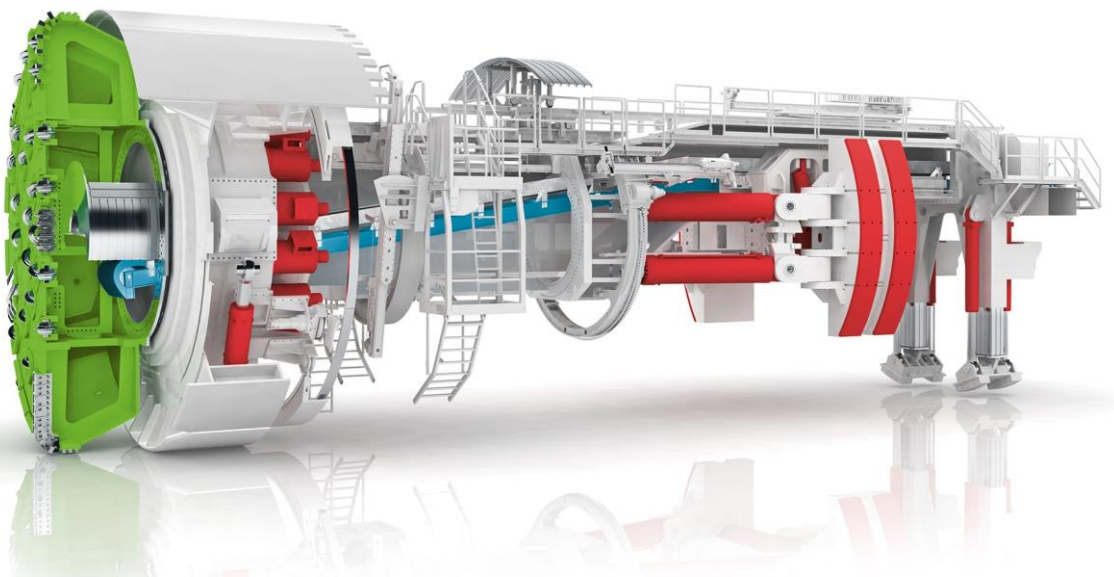


Abbildung 1: Gripper-TBM [11]

#### 2.1.1.2 Tunnelbohrmaschine mit Schild

Tunnelbohrmaschinen mit Schutzschild sind durchgängig von einem geschlossenen Schildmantel umgeben. Sie kommen in Gebirgen mittlerer Qualität zum Einsatz, die tendenziell nachbrüchig bis gebräch sind. Die Festigkeit des Gesteins liegt etwa auf dem Niveau von TBM ohne Schutzschild, allerdings weisen diese Gebirge eine geringere Verbandsfestigkeit, einachsiale Gesteinsdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit auf. Daher sind in solchem Gestein vergleichsweise viele Stützmaßnahmen erforderlich, die unmittelbar hinter dem Schneidrad

installiert werden müssen. Zusätzlich werden bei Tunnelbohrmaschinen mit Schild Tübbings verwendet. Insbesondere bei TBM mit großen Durchmessern ist der Einsatz eines Schutzschilds von Vorteil, da hier die Installation von Sicherungsmaßnahmen erschwert wird und das Risiko von lokalen Nachbrüchen erhöht ist. Im Gegensatz zu TBM ohne Schutzschild stützen sich TBM mit Schutzschild durch Vorschubpressen an den Tübbings ab. Bei Doppelschildmaschinen werden die Schilde abwechselnd vorwärtsbewegt, wobei die Sicherung sowohl mit Schildpratzen seitlich am Gestein als auch mit den Vorschubpressen an den Tübbings erfolgt. [10]

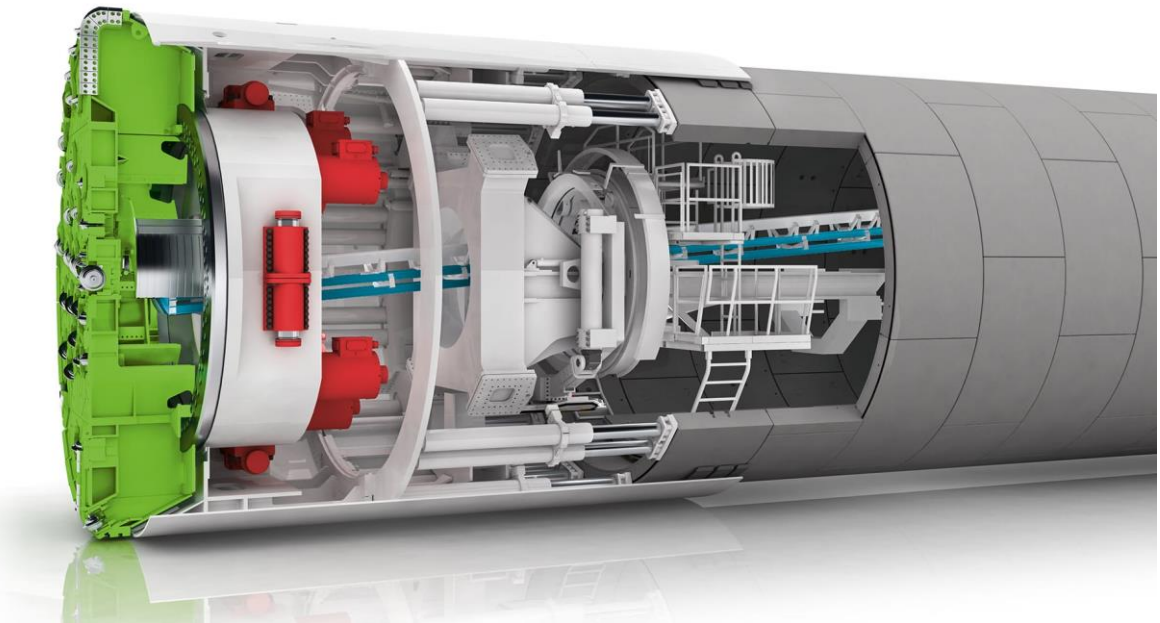


Abbildung 2: Einfachschild-TBM [11]

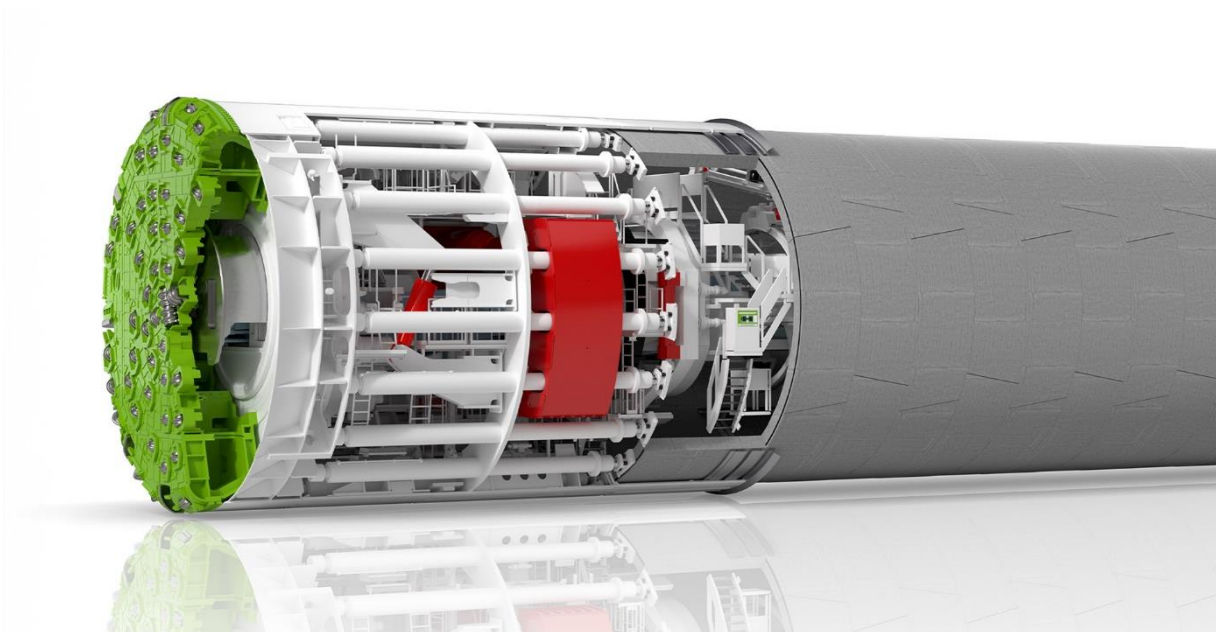


Abbildung 3: Doppelschild-TBM [11]

### 2.1.2 Schildmaschinen (SM)

- Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (SM-V)
  - Ortsbrust ohne Stützung (SM-V1)
  - Ortsbrust mit mechanischer Stützung (SM-V2)
  - Ortsbrust mit Druckluft-Beaufschlagung (SM-V3)
  - Ortsbrust mit Flüssigkeits-Stützung (SM-V4)
  - Ortsbrust mit Erddruck-Stützung (SM-V5)
- Schildmaschinen mit teilflächigem Abbau (SM-T)
  - Ortsbrust ohne Stützung (SM-T1)
  - Ortsbrust mit mechanischer Teilstützung (SM-T2)
  - Ortsbrust mit Druckluft-Beaufschlagung (SM-T3)
  - Ortsbrust mit Flüssigkeits-Stützung (SM-T4)

Für den Vortrieb im Lockergestein oder mit einer wenig beständigen Ortsbrust werden in der Regel eine Vortriebsmaschine mit einem Schild zum Schutz eingesetzt. Abhängig von den geologischen und hydrologischen Gegebenheiten kommen entweder offene oder geschlossene Schilde zum Einsatz. Zu den Aufgaben der Schildmaschinen gehören der Abbau des Bodenmaterials, das Sichern der Ortsbrust und die Minimierung der Setzungen. Im Gegensatz zu einer Tunnelbohrmaschine, welche nur Vollaussbrüche erzeugen kann, bieten Schildmaschinen je nach Ausführung die Möglichkeit, auch nur Teilschnitte voranzutreiben.

#### **Ortsbrust ohne Stützung:**

Diese Maschine findet Anwendung in stabilen Ortsbrusten ohne Grundwassereintritt. Unter bestimmten Umständen können geringe Schicht- und Kluftwassereintritte tolerierbar sein.

#### **Ortsbrust mit mechanischer Stützung: nur bei Vollschnittabbau**

Bei dieser Variante ist das Schneiderad nahezu vollständig geschlossen. Sie wird bei nicht standfesten, bindigen Böden und in Bereichen mit Wechsellagerungen aus bindigen und nichtbindigen Böden eingesetzt.

#### **Ortsbrust mit mechanischer Teilstützung: nur bei Teilschnittabbau**

Diese Maschine kommt bei wenig bis nicht bindigen Kies-Sand-Böden zum Einsatz. Die Ortsbrust ist offen und die Maschine verfügt nur über einen Schildmantel und Abbauprodukte. Die Kontrolle von Setzungen ist hier nur begrenzt möglich.

#### **Ortsbrust mit Druckluft-Beaufschlagung:**

Diese Schildmaschinen können auch in wasserführenden Schichten eingesetzt werden. Druckluftschotts und Schleusen befinden sich in der Regel hinter der Abbaukammer und trennen so die Ortsbrust vom Tunnel. Die Verwendung dieser Maschinen kann jedoch aufgrund der Luftdurchlässigkeit des Bodens eingeschränkt sein.

#### **Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung:**

In Kies-Sand-Böden unter Wasser wird diese Schildmaschine verwendet. Die Arbeitskammer ist durch eine Druckwand abgeschlossen und mit Flüssigkeit gefüllt.

#### **Ortsbrust mit Erddruckstützung: nur bei Vollschnittabbau**

Bei dieser Maschine mit teilflächigem Abbau ist die Arbeitskammer durch eine Druckwand gegen den Tunnel abgeschlossen. Diese Variante findet oft bei Böden mit bindigen Anteilen Anwendung.

### Vergleich Erddruckstützung und Flüssigkeitsstützung

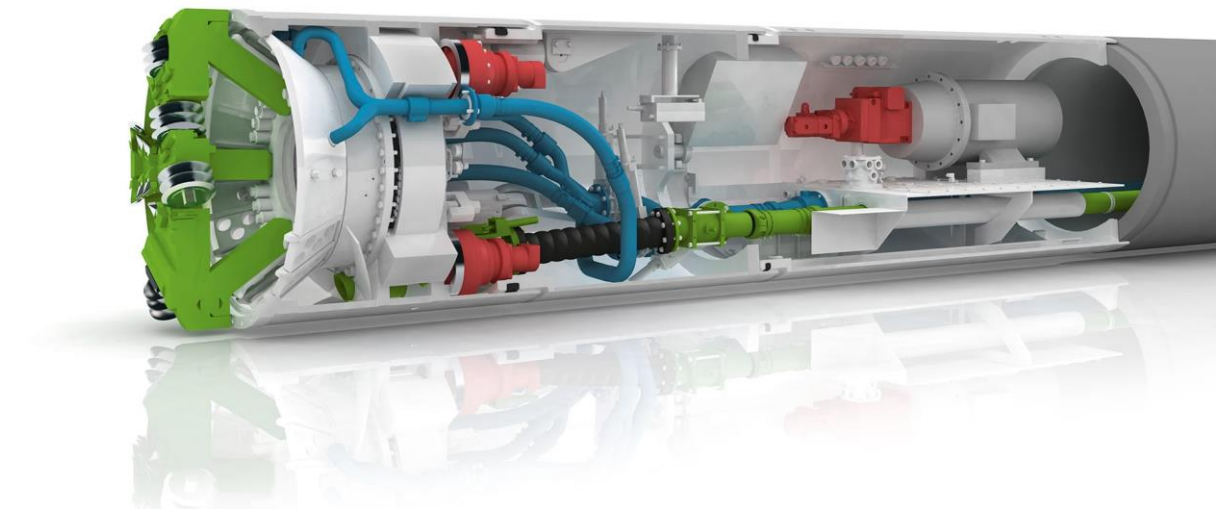


Abbildung 4: AVN-Maschine (Automatische Vortriebsmaschine Nass) [11]

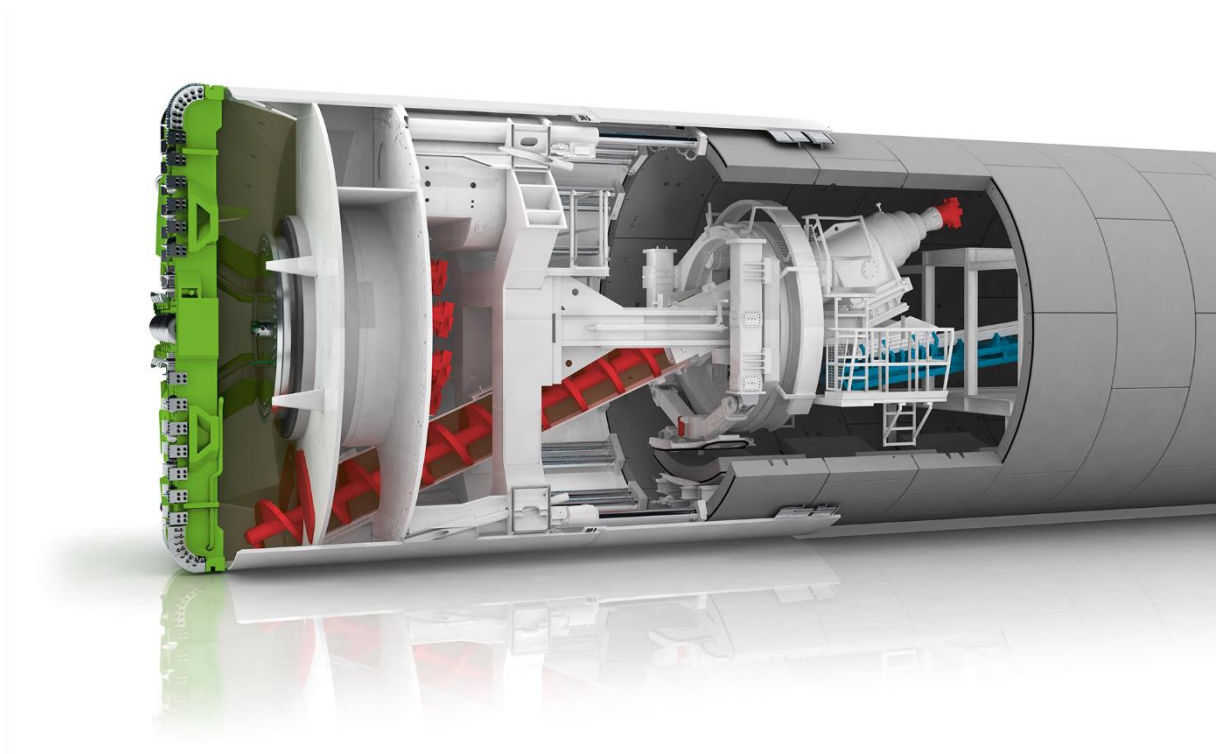


Abbildung 5: EPB-Schild (Earth Pressure Balance Shield) [11]

### 2.1.2.1 Schildmaschinen mit Vollschnittabbau

Eine Schildmaschine mit Vollschnittabbau verfügt über eine Schneide, die aus einem konisch angespitzten Schildmantel besteht. In diesem vollautomatisierten Abbauprozess wird der vorderste Abschnitt nur in Ausnahmefällen von den Minenarbeitern betreten. Um eine effiziente Vortriebsleistung zu gewährleisten, ist eine sorgfältige Abstimmung der Maschine auf die geologischen und hydrologischen Prognosen von entscheidender Bedeutung. Abweichungen von den vorhergesagten Bedingungen können zu Leistungsverlusten oder kostspieligen Umbaumaßnahmen führen. Zu den Hauptaufgaben einer Vollschnittmaschine zählen der Schutz der Arbeiter, die Vermeidung von Bodenbewegungen sowie die Minimierung von Lärm, Erschütterungen und Kontaminationen.

### 2.1.2.2 Schildmaschinen mit teilflächigem Abbau

Teilschnittmaschinen setzen sich aus einem Schneidschuh und einem Abbauarm zusammen. Der Abbau erfolgt anschließend mit Baggararmen oder Schrärmarmen, welche im Schild bereits vorhanden sind.

Teilschnittmaschinen bieten den Vorteil eines gebirgsschonenden und erschütterungsarmen Vortriebs. Sie zeichnen sich durch ihre Anpassungsfähigkeit an verschiedene Querschnitte und geologische Bedingungen aus. Darüber hinaus ermöglichen sie einen präzisen Ausbruch und sind handlich bei Transport und Montage. Allerdings haben Teilschnittmaschinen meist eine niedrigere Vortriebsleistung als der Sprengvortrieb und sind nur bei mittleren Gesteinsfestigkeiten wirtschaftlich. Ein weiterer Nachteil besteht in einem erhöhten Verschleiß der Meißel und der Entstehung von Staub während des Betriebs. [10]

### 2.1.3 Sonderformen

- Universalschilde
- Messerschild und Messervortrieb
- Multiface-Schild
- Gelenkschild
- Haubenschild
- Teleskopschild

#### **Universalschilde:**

In Regionen mit einer vielfältigen geologischen Beschaffenheit erweisen sich Schildmaschinen mit Universalschilden als äußerst vorteilhaft. Diese Schilde sind in der Lage, sich flexibel den jeweiligen geologischen Gegebenheiten anzupassen.

#### **Messerschilde und Messervortrieb:**

Das Schild verfügt über mehrere montierte Messer oder Stahlbohlen, die die Fähigkeit besitzen, sowohl kreisförmige als auch hufeisenförmige Querschnitte zu gestalten.

**Multiface-Schilde:**

Die Schneidräder dieser Vorrichtungen sind in einer überlappenden Anordnung hintereinander angebracht und haben die Fähigkeit, nahezu elliptische Querschnitte für Bereiche in Bahnhöfen zu erzeugen.

**Gelenkschilde:**

In Kurven mit äußerst geringem Radius kommen Gelenkschilde zum Einsatz. Die Gelenke können an allen Schilden angebracht werden und tragen maßgeblich zur Steigerung der Steuerbarkeit bei.

**Haubenschilde:**

Häufig werden diese Schilde in Verbindung mit Druckluftschilden eingesetzt. Der Schild wird dabei an der Tunnelvorderseite abgeschrägt, was die Möglichkeit zur Implementierung erweiterter Sicherungsmaßnahmen gegen Ausbläser eröffnet.

**Teleskopschild:**

Während des Vortriebs mit einem Teleskopschild besteht die Möglichkeit, die Tübbings gleichzeitig mit dem Abbau einzusetzen, was zu einer Steigerung der Vortriebsgeschwindigkeit führt. [10]

## 2.2 Stützmittel

Bei Untertagebauarbeiten in Gebirgen mit begrenzter Standfestigkeit sind Sicherungsmaßnahmen erforderlich, um die Tragfähigkeit des Gebirges zu gewährleisten. Diese Maßnahmen, wie Bewehrung und Randverstärkung, verbessern die Eigentragfähigkeit des Gesteins. In stabilem Gebirge kann teilweise auf Sicherungen verzichtet werden, jedoch ist oft ein Kopfschutz verpflichtend herzustellen. Wenn die Standfestigkeit des Gebirges nicht ausreicht, werden Sicherungen unmittelbar nach dem Ausbruch eingebaut. Sollte die Stehzeit des Gebirges die erforderliche Zeit für den Einbau der Sicherungen unterschreiten, so sind vorausseilende Hilfsmaßnahmen wie beispielsweise Injektionen oder Rohrschirme notwendig. Die Tragwirkung des umliegenden Gebirges kann dadurch deutlich gestärkt werden. Frühzeitiger Einbau von flexiblen Randverstärkungen, z.B. durch Spritzbeton oder Anker, erhöht nicht nur die Tragfähigkeit, sondern reduziert außerdem Risiken wie Nachbrüche und Lockerungen. Die Einbauzeit der Sicherung betrifft nicht nur den First und die Ulmen, sondern auch den Ringschluss der Sicherung.

Die Stützmittel können wie folgt unterschieden werden:

- Tübbinge
- Spritzbeton
- Matten
- Anker
- Spieße
- Ausbaubögen

[10]

Tunnelbauwerke sind Unikate, es entstehen daher unterschiedliche Anforderungen an die Betonbauteile. Je nach Nutzungsart (Straßentunnel, Eisenbahntunnel, Wasserstollen, etc.), Bauverfahren (maschineller Vortrieb, konventioneller Vortrieb, offene Tunnelbauweise), Querschnittsformen und -größen, geologische Voraussetzungen sowie Gebirgs- und Wasserdrücke unterscheiden sich die Expositionen und daher auch die Anforderungen an die Tunnelauskleidung.

Betontechnologische Besonderheiten können daher beispielsweise für Tübbinge beim maschinellen Vortrieb, Tunnel in offener Bauweise sowie für Tunnelinnenschalen, Sohlgewölbe und Sohlplatten bei der konventionellen Bauweise deutlich unterschieden werden. Grundsätzlich müssen jedoch alle Betonbauteile eine ausreichende Festigkeit, Wasserundurchlässigkeit, Dauerhaftigkeit und Verarbeitbarkeit aufweisen. Selbst eine drainierte Innenschale sollte einen hohen Wassereindringwiderstand besitzen. Tunnelinnenschalen sind in der Regel bewehrt, nur unter günstigen Voraussetzungen kann auf eine Bewehrung verzichtet werden.

### 2.2.1 Tübbinge

Tübbinge sind vorgefertigte Elemente, die zur Herstellung der Innenschale von Schächten oder Tunneln verwendet werden. Sie bilden einen geschlossenen Kreisring und können aus Stahl, Gusseisen, Stahlbeton oder Stahlfaserbeton gefertigt werden. Moderne Tübbinge bestehen meist aus wasserdichtem Beton und sind an den Kontaktflächen mit Dichtungen ausgestattet. Sie können als ein- oder zweischalige Konstruktionen ausgeführt werden.

Beim Tunnelvortrieb werden die Tübbinge im Schutz des äußeren Stahlmantels der Vortriebsmaschine zu einem Tübbingring montiert und mittels Ringspaltmörtel kraftschlüssig verschlossen. Nach dem Verlassen des Stahlmantels trägt der Tübbingring die Lasten aus dem überlagernden Baugrund, Verkehrslasten und Wasserdruck primär über Ringnormalkräfte ab. Bei maschinellen Vortrieben in Lockerböden unterhalb des Grundwasserspiegels werden häufig einschalige, abgedichtete Tübbingausbauten mit Stahlbetonblocktübbingern verwendet. Bei maschinellen Vortrieben ohne sofortigen Grundwasserandrang, insbesondere im Fels, können sowohl einschalige als auch zweischalige Tübbingausbauten zum Einsatz kommen. Letztere bestehen aus temporären Tübbingern als Außenschale und einer nachträglich eingezogenen Ortbetoninnenschale. Zudem können konventionelle Sicherungssysteme, wie Spritzbetonsicherungen mit Systemverankerung und Ortbetoninnenschale, oder Kombinationen verschiedener Sicherungssysteme verwendet werden.

Die Tübbinge werden standardgemäß als Stahlbeton-Fertigteile hergestellt. Abhängig vom vorherrschenden Gebirge ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die betontechnologische Zusammensetzung. In einigen Fällen wirken die maßgebenden Kräfte während des Vortriebes, wenn sich die Vortriebsmaschine an die Tübbinge stützt und die hydraulischen Pressen den Ausbruch vorantreiben. Einen weiteren maßgebenden Belastungsfall können die Gewichtskräfte des Nachläufers bewirken. Diese Belastungen wirken zwar nur kurzzeitig, jedoch können sie ein Vielfaches von jenen Kräften sein, die

während der gesamten Betriebsdauer auftreten. Daher wird der Beton oft an die Belastungen der Bauphase angepasst. Bei zu hohen Betonfestigkeiten steigt jedoch die Gefahr von Abplatzungen während eines Brandgeschehens, daher werden die maximalen Druckfestigkeiten des Betons oft begrenzt. Weiters wird beim einschaligen Tübbingausbau keine zusätzliche Abdichtung eingebaut, wodurch die Tübbinge einen hohen Wassereindringwiderstand aufweisen müssen. An den Portalen ist zusätzlich auf einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand zu achten.

Bei speziellen Anforderungen können dem Beton Fasern zugefügt werden. Mittels Polypropylenfasern kann der Brandschutz deutlich erhöht werden, während Stahlfasern zur Duktilitätssteigerung unter Druck und Zug, einer erhöhten Schlagfestigkeit sowie einem verbesserten Ermüdungsverhalten dienen. Die Rissbreite kann nur gemeinsam mit der konventionellen Bewehrung gesteuert werden, jedoch bewirken Stahlfasern gute Eigenschaften gegen kleinflächige Belastungen, wie sie beispielsweise beim Vorpressen der TVM auftreten. Einen weiteren Vorteil bietet das duktile Rissverhalten des Stahlfaserbetons, wodurch auch die Abplatzneigung reduziert wird.

Die Verwendung von Stahlbetontübbingausbauten bietet zahlreiche Vorteile. Einerseits ist der Ausbau sofort statisch tragfähig, sodass er kurz nach dem Verlassen des Schildschwanzes Lasten aufnehmen kann. Andererseits ist die Tunnelröhre bei einem einschaligen Tübbingausbau sofort in vollem Umfang nutzbar und muss in der Regel nicht für spätere Arbeiten gesperrt werden, was bedeutet, dass keine zusätzlichen Schalarbeiten innerhalb des Tunnels erforderlich sind und der Sohlenaufbau direkt in seiner endgültigen Form hergestellt werden kann. Weiters ist der Tübbingring, sofern mit Dichtprofilen ausgestattet, unmittelbar nach dem Ringschluss wasserdicht. Darüber hinaus ist der Einsatz in allen Bodenarten möglich und insbesondere bei anstehendem Grundwasser vorteilhaft. Die Qualität des Ausbaus ist durch die Herstellung der Tübbings im Fertigteilwerk gut kontrollierbar und unterliegt keinen wesentlichen Schwankungen, was auch bedeutet, dass beim Einbau keine zusätzlichen Staubbelastungen entstehen. Der Einbau mittels Erektoren ist einfach, mit etwa 20 bis 40 Minuten pro Ring relativ schnell und sicher, da keine Arbeiten im ungesicherten Bereich erforderlich sind. Die Arbeiter sind während des gesamten Prozesses durch den Schildmantel oder den Tübbingring gegen Einwirkungen aus dem Gebirge geschützt. Schließlich wird der Tübbingring nach dem Verlassen des Schildschwanzes durch die Verpressung des Ringspaltes vorgespannt, was zusätzlich zur Stabilität beiträgt.

Die Anwendungsgrenzen des Tübbingausbaus ergeben sich aus geometrischen und baubetrieblichen Bedingungen. Die Geometrie ist auf Kreisquerschnitte beschränkt, obwohl spezielle Maschinen auch das Auffahren anderer Querschnitte ermöglichen. Der minimale Außendurchmesser für Tübbings beträgt etwa 2,80 Meter, darunter können Rohrfertigteile zum Einsatz kommen. Der maximale Außendurchmesser liegt bei etwa 16,00 Metern. Darüber hinaus beträgt die maximale Tübbingstärke etwa 70 Zentimeter, da höhere Stärken zu hohen Einzelgewichten führen, die sowohl den Transport als auch die Montage erschweren können.

**Ringformen:****Kassettentübbing:**

Dieses System wurde in den 1970er-Jahren entwickelt und stellt eine Weiterentwicklung der Gusseisentübbings dar. Die Innenseite ist kassettenartig vertieft, was die Herstellung aufwendig macht. Aufgrund ihrer Anfälligkeit für Schäden wurden sie weitgehend durch Blocktübbings ersetzt.

**Hexagonaltübbing:**

Auch als Wabentübbing bekannt, sind diese sechseckigen Tübbings ohne durchgehende Ringfuge konzipiert. Sie wurden in Österreich entwickelt, um einen kontinuierlichen Vortrieb zu gewährleisten und werden vor allem in Versorgungstunneln eingesetzt. Ihr Hauptvorteil ist der schnelle Ringbau, der eine hohe Vortriebsgeschwindigkeit ermöglicht. Nachteile sind die Schwierigkeiten bei der Montage und die fehlende Wasserdichtigkeit im Bauzustand.

**Trapeztübbing:**

Diese Systeme werden sowohl bei ein- als auch bei zweischaligen Ausbauten verwendet. Jeder zweite Stein kann als Schlussstein genutzt werden, was die Bauweise vereinfacht. Allerdings sind die schrägen Längsfugen und die aufwendige Formgebung nachteilig, weshalb sie sich in der Praxis nicht durchgesetzt haben.

**Schweizer Stapeltübbing:**

Diese werden als temporäre Außenschale bei zweischaligen Ausbausystemen eingesetzt, wenn keine Dichtheitsanforderungen bestehen. Der Ring besteht aus spezifisch geformten Steinen und ermöglicht einen schnellen Ringbau.

**Querschläge:**

Querschläge in Tübbingtunneln werden nach der Fertigstellung der Tübbingauskleidung in den Hauptrohren mit einem kleineren Durchmesser vorgetrieben. Wenn für die Hauptrohre eine durchgehende Auskleidung mit Stahlbetontübbingen vorgesehen ist, müssen dafür einzelne Ringsegmente entfernt werden. Dies führt zur Öffnung mehrerer Ringe, wodurch deren Stabilität beeinträchtigt wird. Tübbinge in Querschlagöffnungen werden nur unter günstigen geologischen Bedingungen als Stahlbeton-Fertigteiltübbinge eingesetzt, andernfalls kommen spezielle Stahltübbinge zum Einsatz. [12]

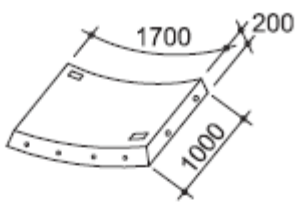
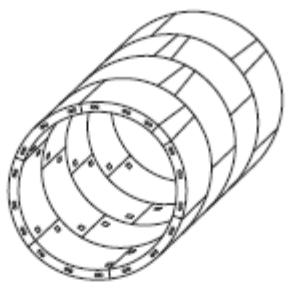
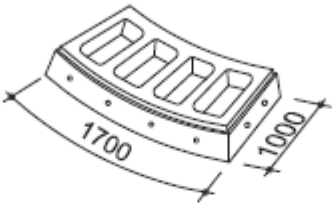
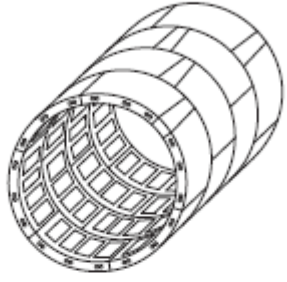
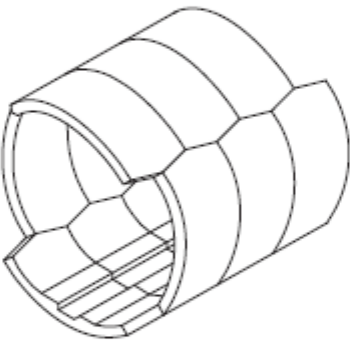
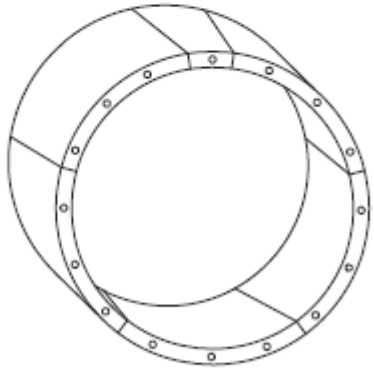
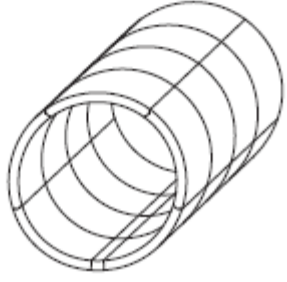
|                         | Einzeltübbing                                                                       | Tübbingschale                                                                         |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Blocktübbing            |    |    |
| Kassettentübbing        |    |    |
| Hexagonaltübbing        |  |                                                                                       |
| Trapezförmiger Tübbing  |  |   |
| Schweizer Stapeltübbing |  |  |

Abbildung 6: Ringformen [12]

### 2.2.2 Spritzbeton

Spritzbeton hat sich im Tunnelbau zu einem der wichtigsten Baustoffe entwickelt. Speziell für die Erstsicherung bei Ausbrüchen ist der Spritzbeton wesentlich. Gemeinsam mit Ankern, Stahlbögen und Bewehrungsmatten bildet der Spritzbeton die Basis der „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise“.

Zu den Vorteilen des Spritzbetons gehören die große Flächenausdehnung, stufenloser Wechsel verschiedener Auftragsstärken, keine geometrische Gebundenheit, gute Haftungseigenschaften sowie die Eigenschaft des Selbstverdichtens.

Früher wurde Spritzbeton primär für den Schutz der Mineure angebracht, daher war eine gute Frühfestigkeit erforderlich. Die Endfestigkeit sowie die Dauerhaftigkeit des Betons hatten in der Vergangenheit nur einen geringen Stellenwert und wurden deshalb oft vernachlässigt. Mithilfe von Normenzementen und Beschleunigern als Zusatzmittel wurde eine ausreichende Frühfestigkeit auch erreicht. Jedoch war die Dosierung der Zusatzmittel nicht immer gleichbleibend, deshalb entstand öfter eine inhomogene Betondeckschicht, welche auch nach der Fertigstellung des Projektes verschiedene Eigenschaften aufwies. So wurden durch das Bergwasser teilweise Auslaugungserscheinungen oder andere Beschädigungen verursacht und durch die alkalihaltigen Beschleuniger wurde ein erhöhtes Verunreinigungspotential freigesetzt. Heutzutage ergeben sich die Anforderungen an den Spritzbeton aus der Festigkeit, Festigkeitsentwicklung, Schwinden und Kriechen, E-Modul, Dichtigkeit, Umweltverträglichkeit und weiteren projektspezifisch relevanten Anforderungen.

Die Besonderheit des Spritzbetons ist grundsätzlich das Verfahren der Aufbringung. Der Baustoff selbst wird als Normalbeton laut gemäßer Normung (DIN 1045 / DIN EN 206 bzw. ÖNORM B 4200) angesehen. Neben dem Zement als Bindemittel werden dem Spritzbeton für die Aufbringung Fließmittel und Beschleuniger beigelegt.

Im Tunnelvortrieb wird üblicherweise bei der Anwendung von Spritzbeton, unabhängig von der konkreten Spritzmethode, auf Erstarrungsbeschleuniger (BE) zurückgegriffen. Zusätzlich dazu gibt es Erhärtungsbeschleuniger, welche die Frühfestigkeit von Beton beschleunigen können. Diese können mit oder ohne Beeinflussung der Erstarrungszeit eingesetzt werden. Beim Trockenspritzverfahren werden die Beschleuniger in Pulverform mit dem Trockengemisch vermengt. Beim Nassspritzverfahren werden flüssige BE-Mittel verwendet. Die Wirkstoffe der Beschleuniger können beispielsweise Chloride, Silikate, Karbonate oder Aluminate sein.

Fließmittel sind für das Nassspritzverfahren besonders wichtig. Sie bestehen aus polymeren Molekülen mit einer negativen Ladungsdichte am Polymer, wobei sich die einzelnen Bausteine der Makromoleküle sehr stark unterscheiden können. Beispiele für die Rohstoffe der Fließmittel sind Ligninsulfonate, Naphthalinsulfonate, Melaminsulfonate, Polyacrylate und etwaige Polycarboxylatverbindungen. Diese Rohstoffe gehören zu den polymeren Dispergiermitteln und sind allesamt wasserlösliche und organische Polymerelektrolyte.

Das Aufbringen des Spritzbetons kann in die beiden Varianten „Trockenspritzverfahren“ und „Nassspritzverfahren“ unterschieden werden. Beim Trockenmischverfahren wird ein Trockengemisch, bestehend aus Trockenbeton oder Trockenmörtel, mittels Druckluft durch die Förderleitung zur Spritzdüse zugeführt. Die Förderung des Trockengemisches geschieht stets als Dünnstromförderung. An der Spritzdüse wird anschließend das Zugabewasser sowie gegebenenfalls flüssige Zusätze beigemischt. Beim Nassspritzverfahren wird das Nassgemisch entweder mittels Druckluft als Dünnstromförderung oder mit einer Betonpumpe als Dichtstromförderung zur Spritzdüse geliefert. Die notwendige Treibluft für die Materialbeschleunigung wird bei der Dichtstromförderung direkt an der Spritzdüse zugegeben. Heutzutage ist jedoch beim Nassspritzverfahren nur mehr die Dichtstromförderung von Bedeutung, die Dünnstromförderung findet kaum mehr Anwendung. Bei den Betonpumpen handelt es sich in der Regel entweder um klassische Kolbenpumpen oder um Pumpen mit Schneckenförderung. Der Vorteil der Schneckenförderung ist das absolut kontinuierliche und pulsationsfreie Förderverhalten, dies kann jedoch bei Verwenden von Doppelkolbenpumpen auch annähernd gut erreicht werden.

Vergleich von Trockenspritz- und Nassspritzverfahren:

Ein Unterschied ist die Homogenität des Frischbetons. Der Nassspritzbeton ist im Vergleich zum Trockenspritzbeton viel homogener und besser benetzt. Das Rückprallverhalten beim Trockenspritzverfahren ist veränderlich, da es sehr stark vom Vernetzungsgrad abhängig ist. Der Rückprallverlust beim Nassspritzverfahren liegt deutlich unter dem Verlust des Trockenspritzverfahrens, bei Verwenden von hydratationsgesteuerten Spritzmaterialien kann dieser sogar noch weiter gesenkt werden. Ein weiterer großer Unterschied liegt bei der Staubentwicklung während des Spritzens. Beim Trockenspritzverfahren kann die Staubentwicklung mittels erdfeuchter Zuschläge anstatt trockener Zuschläge deutlich verbessert werden. Jedoch verursacht das Nassspritzverfahren im Vergleich zum Trockenspritzverfahren einen deutlich niedrigeren Staubgehalt. Außerdem kann durch die Verwendung von nicht ätzenden und alkalifreien Beschleunigern die Arbeitshygiene sowie die Arbeitssicherheit wirksam verbessert werden. [13]

### 2.2.3 Bewehrungsmatten

Die Tragfähigkeit einer Spritzbetonschale kann durch den Einsatz von ein- oder zweilagiger Bewehrung gesteigert werden. Häufig werden Bewehrungsmatten verwendet, was jedoch zu einem höheren Rückprall führen kann, da die Bewehrungsstäbe die Flugbahn der Betonpartikel behindern und somit die Verdichtung des Betons hinter den Netzen verringern können. Dabei können Spritzschatten an Bögen und Gitterträgern entstehen. Bei der Arbeitsweise mit Bewehrung wird nach dem Hohlraumausbruch zumeist eine Versiegelungsschicht aufgetragen, gefolgt vom Einbau der Bewehrungslage und der Anker, bevor die Spritzbetonschale in mehreren Arbeitsschritten aufgebracht wird.

Stahlfaserspritzbeton kann daher im Tunnelbau eine wirtschaftliche Alternative zur herkömmlichen Mattenbewehrung bieten. Dies gilt insbesondere, wenn die statischen

Anforderungen durch den Einsatz von Stahlfasern und Spritzbeton erfüllt werden können. Obwohl das Stahlfasergemisch teurer ist als Normalbeton, können wirtschaftliche Vorteile durch den geringeren Rückprall und den reduzierten Arbeitsaufwand entstehen, da Stahlfaserspritzbeton in einem einzigen Arbeitsgang aufgetragen werden kann. [10]

### 2.2.4 Anker

Anker sind eine der häufigsten verwendeten Stützmittel im Tunnelbau. Sie werden in ein Bohrloch eingebaut und nehmen darin Zug- und Schubkräfte auf. Eine weitere Anwendung der Anker findet sich bei der Verbindung von Konstruktionsteilen mit dem Gebirge. Nägel, Bolzen und Dübel weisen große Ähnlichkeiten mit dem Anker auf. Sie unterscheiden sich jedoch darin, dass unter einem Nagel ein Stift verstanden wird, welcher zwei Elemente miteinander verbindet und der Bolzen vermehrt auf Scherung belastet wird. Ein Dübel dagegen wird als Verbindungsmittel zur Sicherung der Lage von Bauteilen verwendet. Es ist jedoch sehr schwer, diese Begriffe klar voneinander abzugrenzen und zu unterscheiden.

Je nach Verwendungszweck können unterschiedliche Ankersysteme verwendet werden. Die verschiedenen Zwecke umfassen beispielsweise:

- Die Erhaltung der Verbandsfestigkeit des Gebirges und das Aufbauen eines Ausbauwiderstandes
- Die Sicherung gegen Steinfälle und Nachbrüche
- Das vorübergehende Übertragen von Kräften anderer Stützmaßnahmen
- Das Aufhängen von externen Lasten

Dabei können die Anker als Einzelanker, Mehrfachanker oder Systemanker wirken. Die Einzelanker werden zur lokalen Stabilisierung von Blöcken oder Trennflächen verwendet, bei der Mehrfachankerung dagegen können Stabilisierungen über eine größere Fläche hinweg vorgenommen werden. Diese beiden Wirkungsmechanismen werden vorzugsweise als sofort tragende und vorgespannte Ankersysteme bei günstigen Gebirgsverhältnissen eingesetzt. Bei ungünstigen Verhältnissen werden mehrere Anker in einem bestimmten Raster systematisch angeordnet und eingesetzt. Dies bewirkt im Gebirge eine globale Änderung des Spannungszustandes und zu einer günstigen Beeinflussung im Nachbruchbereich. Zumeist sind die hierbei verbauten Ankersysteme nicht vorgespannt und schlaff eingebaut.

Die Längen variieren je nach Hohlraumgröße und der vorliegenden Geologie. Kurzanker haben beispielsweise einen kleinen Wirkungsbereich, welcher auf lokale und hohlraumnahe Bereiche beschränkt ist. Der Wirkungsbereich der Langanker dagegen reicht normalerweise mehrere Meter in das Gebirge und überbrückt dabei den Hohlraum.

Anker können entweder nur kurzzeitig eingebaut werden (lt. ÖNORM EN 1537 Lebensdauer < 2 Jahre), solange bis ein anderes Bauteil die tragende Wirkung übernimmt, oder sie können als Daueranker konzipiert sein und die Kräfte während der gesamten Nutzungsdauer aufnehmen. Die Werkstoffe und der Korrosionsschutz von Dauerankern verlangen weitaus höhere Anforderungen als Kurzzeitanker.

Weiters können Anker aufgrund ihrer Einbaustelle und der Art des Gebirges unterschieden werden. Je nach Einbaustelle werden First-, Sohlen- und Stoßanker unterschieden. Außerdem können Anker entweder radial zum Ausbruch oder direkt an der Ortsbrust eingebaut werden. Abhängig von den Geologischen Verhältnissen werden Felsanker in Festgestein und Erd- und Bodenanker bei Lockermassen eingesetzt. Diese weisen oft große Unterschiede auf, welche die Anforderungen und die Verfahrenstechnik betreffen.

Anker können entweder aktiv, verspannt oder passiv eingebaut werden. Aktive Anker werden vorgespannt und werden zur Unterbindung von Entspannungsbewegungen des Gebirges verwendet. Verspannte Anker werden zumeist mit Ankerplatten an das Gebirge angepresst. Die Lasten dieser Anker sind meistens nicht definiert und im Vergleich etwas geringer. Der passive Anker wird schlaff eingebaut und wird erst bei Verschiebungen gespannt. Der Anker fängt erst nach einer vollen Verspannung an zu wirken. Diese Ankertypen werden verwendet, wenn es zu Gebirgsentspannungen kommen soll.

Außerdem können starre und nachgiebige Anker unterschieden werden. Die Bruchlast der starren Anker wird bereits bei kleinen Verschiebungen erreicht, nachgiebige Anker dagegen können größere Verschiebungen ohne sofortiges Auftreten der Bruchlast ertragen.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art des Verbundes. Dabei können Vollverbundanker und Anker mit Teilstrecke ohne Verbund unterschieden werden. Vollverbundanker können entweder über einen Großteil oder über die gesamte Länge mit dem Gebirge verbunden werden. Sie können sowohl vorgespannt als auch schlaff eingebaut werden. Zwischen Ankerkopf und Verbundelement kann eine Teilstrecke frei sein, welche sich bei Zugbeanspruchung ungehindert ausdehnen kann. Dabei wird zwischen inneren und äußeren Verbund unterschieden.

Die Art des Verbundes kann entweder mechanisch oder chemisch/physikalisch sein. Mechanische Verbunde wirken direkt tragend, durch die Reibungskräfte werden Anker und Gebirge miteinander gekoppelt. Vollverbundanker wirken durch die Reibung des Verbundes zwischen Ankerbohrloch und Ankerschaft. Teilverbundanker werden durch eine Punktbelastung festgehalten. Bei Spreizankern wird dabei der Ankerstab über ein Spreizelement mit der Bohrlochwand verspannt. Diese dienen aufgrund der nur punktuellen Krafteinleitung, der Schwankungsempfindlichkeit, des Bohrlochdurchmessers und des mangelnden Korrosionsschutzes zumeist nur als temporäre Sicherungen. Für chemisch/physikalische Verbundmittel werden Mörtel und Kunstharz verwendet. Ein Ankermörtel bietet im Vergleich zu einem Zementmörtel eine bessere Frühfestigkeit sowie eine erleichterte Einbringung im Überkopfbereich. Kunstharzverbunde sind im Steinkohlebergbau sowie im asiatischen Tunnelbau weit verbreitet. Das Kunstharz wird dabei meistens in Patronenform als Zweikomponentenmittel in das vorab hergestellte Ankerbohrloch eingeschoben. Anschließend wird der Ankerstab mit einer Drehbewegung eingeführt. Die beiden Komponenten des Kunstharzes sind ein Polyesterharz und ein Härter. Bei Wasserzutritt können außerdem wasserresistente Kunstharze eingesetzt werden.

Grundsätzlich kann das Verbundmaterial in Patronenform oder in flüssiger Form vorhanden sein und entweder während oder nach dem Bohrvorgang eingebracht werden. Patronen bestehen aus Ein- oder Mehrkomponenten-Verbundmaterial und gelten als saubere und verfahrenstechnische einfache Lösung, jedoch besitzen sie höhere Anforderungen an den Einbau. Für die flüssige Form können Zementmörtel oder Kunstharze eingesetzt werden. Das Einbringen ist im Vergleich zur Patronenform zwar etwas aufwendiger, jedoch sind sie etwas kostengünstiger, haben eine verkürzte Einbringzeit und können auch bei ungleichen Bohrlochdurchmessern eingesetzt werden.

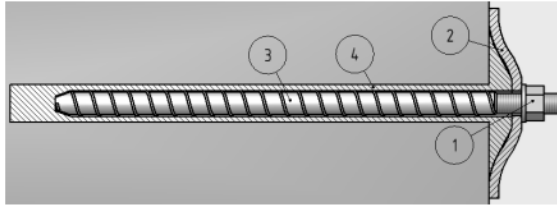
Weitere Unterscheidungsmerkmale sind Form und Material des Ankerschaftes. Vollstäbe, Hohlstäbe oder Seile gehören zu den verschiedenen Formen des Schaftes. Vollstäbe werden mit glatten oder mit profilierten Oberflächen versehen. Hohlstäbe weisen im Vergleich zu Vollstäben bei einer gleichen Querschnittsfläche ein größeres Trägheitsmoment auf und werden deshalb speziell bei Selbstbohrankersystemen eingesetzt. Seile werden als Einzelseil oder Bündelanker eingebaut und besitzen eine hohe Zugfestigkeit und große Bruchverschiebungsbeträge. Die Materialien des Ankerschaftes können aus Stahl, glasfaserverstärkten Kunststoff oder Holz bestehen, derzeit wird jedoch der Stahl am häufigsten verwendet. Der Stahl kann abhängig von den Anforderungen speziell angepasst werden, generell verfügt er jedoch über eine gute Verformbarkeit, ein definiertes Last-Verformungsverhalten und ist zudem noch vergleichsweise günstig. Anker aus glasfaserverstärkten Kunststoff werden verwendet, wenn ein nachträgliches Entfernen des Ankers notwendig ist. Die Formen dafür können Vollstab-, Hohlstab-, oder Bündelanker sein. Die Vorteile der glasfaserverstärkten Kunststoffanker ergeben sich aus dem leichten Gewicht, der mechanischen Zerspanbarkeit, der Korrosionsbeständigkeit und der hohen Zugfestigkeit bei gleichzeitig geringer Schubfestigkeit. Holzanker werden heutzutage nicht mehr verwendet. Früher wurden sie aufgrund des günstigen Preises und des leichten Gewichtes vor allem im Steinkohlebergbau oft genutzt, jedoch wurden sie im modernen Bergbau von den glasfaserverstärkten Kunststoffankern abgelöst.

Für die Dauerhaftigkeit des Ankers ist ein guter Korrosionsschutz unabdingbar. Es wird dabei zwischen inneren und äußeren Korrosionsschutz differenziert. Die Werkstoffeigenschaften, wie beispielsweise die Stahlgüte oder das Verzinken des Stahls, bestimmen den inneren Korrosionsschutz, der äußere Korrosionsschutz wird durch konstruktive Maßnahmen wie beispielsweise eine Ummantelung erreicht.

Die Bohrlöcher selbst können zwischen standfest und nicht standfest unterschieden werden. In standfesten Bohrlöchern können eine Vielzahl von Ankertypen platziert werden und sind daher auch recht kostengünstig. Nicht standfeste Bohrlöcher werden oft mittels Selbstbohrankern hergestellt, da hierbei das Bohren des Loches und der Ankereinbau in einem Arbeitsschritt erfolgen.

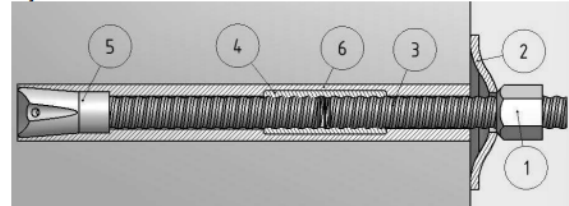
In den folgenden Abbildungen sind die am häufigsten verwendeten Ankersysteme mitsamt einer Klassifikationsmatrix bezüglich der Haupteigenschaften der Ankersysteme dargestellt.

SN-Mörtelanker / Klebeanker



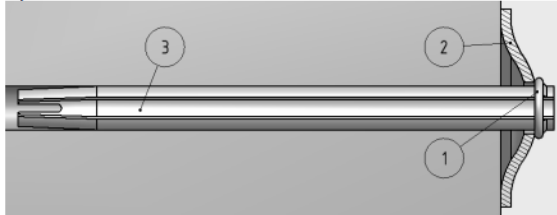
- (1) Anker Mutter; (2) Kalottenankerplatte;  
 (3) Ankerstab mit aufgerolltem Gewinde (angespitzt);  
 (4) Ankermörtel (SN-Anker) oder Kunstharz (Klebeanker)

Injektionsbohranker



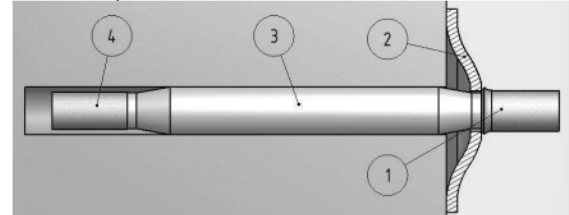
- (1) Anker Mutter; (2) Kalottenankerplatte; (3) Ankerstab  
 (Hohlstab mit aufgerolltem Gewinde); (4) Ankermuffe;  
 (5) Einwegbohrkrone; (6) Ankermörtel

Split-Set-Anker



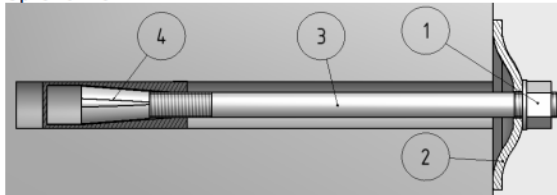
- (1) Ankerkopf (aufgeschweißt);  
 (2) Kalottenankerplatte;  
 (3) Geschlitztes Ankerrohr

Reibrohrexpanensionsanker



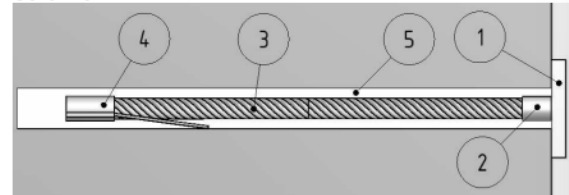
- (1) Setzhülse (aufgeschweißt);  
 (2) Kalottenankerplatte; (3) Ω-förmiges Ankerrohr;  
 (4) Endhülse (aufgeschweißt)

Spreizanker



- (1) Anker Mutter; (2) Kalottenankerplatte; (3) Ankerstab mit  
 beidseitig aufgerolltem Gewinde; (4) Spreizkopf

Seilanker



- (1) Ankerplatte ; (2) Spreizkeil; (3) Ankerlitze;  
 (4) Rückhalteelement; (5) Ankermörtel

Abbildung 7: Ankersysteme [14]

|                              | Haupteigenschaften des Ankersystems |           |         |             |                      |            |                               |          |                                   |      |             |     |                      |                            |                             |                     |         | Gebirgseigenschaften    |                            |            |            |       |            |                      |                        |                     |                |                      |                      |                          |                |   |
|------------------------------|-------------------------------------|-----------|---------|-------------|----------------------|------------|-------------------------------|----------|-----------------------------------|------|-------------|-----|----------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|---------|-------------------------|----------------------------|------------|------------|-------|------------|----------------------|------------------------|---------------------|----------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------|---|
|                              | Vor-<br>spannung                    |           | Verbund |             | Art des<br>Verbundes |            | Form des<br>Anker-<br>schafes |          | Material des<br>Anker-<br>schafes |      | Ankerschaft |     | Verbund-<br>material |                            |                             | Nachgiebig-<br>keit |         | Bohrloch-<br>stabilität |                            | Festigkeit |            |       |            |                      |                        |                     |                |                      |                      |                          |                |   |
|                              | Vorgespannt                         | Verspannt | Schlaff | Vollverbund | Freispieleranker     | Mechanisch | Chemisch/physikalisch         | Vollstab | Hohlstab (Rohr)                   | Seil | Stahl       | GfK | Holz                 | Einbringen mit Bohrvorgang | Einbringen nach Bohrvorgang | Patroniert          | Flüssig | Mit dem Bohrvorgang     | Entkoppelt vom Bohrvorgang | Verfüllen  | Verpressen | Starr | Nachgiebig | Standfestes Bohrloch | Nachbrüchiges Bohrloch | Instabiles Bohrloch | Festes Gebirge | Mittelfestes Gebirge | Wenig festes Gebirge | Stark zersetztes Gebirge | Lockermaterial |   |
| SN-Mörtelanker               |                                     | x         | x       | x           | (x)                  |            | x                             | x        |                                   |      | x           | (x) |                      |                            | x                           | (x)                 | x       |                         | x                          | x          |            | x     |            | x                    | (x)                    |                     | x              | x                    |                      |                          |                |   |
| Injektionsbohranker          | (x)                                 | x         | x       | x           | (x)                  |            | x                             |          | x                                 |      | x           | x   |                      | x                          | (x)                         |                     | x       | (x)                     | x                          | x          | (x)        | x     |            | x                    | x                      | x                   | (x)            | x                    | x                    | x                        | x              | x |
| Klebeanker                   | x                                   | x         | x       | x           | (x)                  |            | x                             | x        | (x)                               |      | x           | x   |                      | x                          | x                           | x                   | (x)     | x                       | x                          | x          |            | x     | (x)        | x                    | (x)                    |                     | (x)            | x                    | x                    | x                        |                |   |
| Split-Set-Anker              |                                     |           | x       | x           |                      | x          |                               |          | x                                 |      | x           |     |                      | (x)                        | x                           |                     |         |                         |                            |            |            | (x)   | x          | x                    | (x)                    | (x)                 | x              | x                    | (x)                  |                          |                |   |
| Reibrohr-<br>expansionsanker |                                     | (x)       | x       | x           |                      | x          |                               |          | x                                 |      | x           |     |                      |                            | x                           |                     |         |                         |                            |            |            | x     | (x)        | x                    | (x)                    |                     | x              | x                    | (x)                  |                          |                |   |
| Spreizanker                  | x                                   | (x)       |         | (x)         | x                    | x          |                               | x        |                                   |      | x           | (x) | (x)                  |                            | x                           |                     |         |                         |                            |            |            | x     | (x)        | x                    |                        |                     | x              | x                    |                      |                          |                |   |
| Seilanker                    | (x)                                 | x         | x       | x           | (x)                  | (x)        | x                             |          |                                   | x    | x           | (x) |                      | (x)                        | x                           |                     | x       |                         | x                          | x          |            | x     | x          | x                    | (x)                    |                     | x              | x                    | (x)                  |                          |                |   |

Abbildung 8: Ankersysteme - Klassifikationsmatrix [14]

### 2.2.5 Spieße

Die Spieße werden als vorausseilende Sicherheitsmaßnahmen bei gebrächen Gebirge verbaut, bei welchen das Einbringen von Verzugsblechen nicht mehr möglich ist. Sie werden in Richtung der Tunnelachse am Gewölbeumfang eingebaut und bewehren dort das zerklüfte Gebirge. Dadurch ergibt sich ein Tragring, welcher dem Gebirge die benötigte Standsicherheit schafft. Die Spieße sind zumeist gewöhnliche Injektionsbohranker, welche nach dem Bohren kraftschlüssig mit dem Gebirge verbunden werden. Die Risse und Klüfte des Gebirges werden dadurch injiziert und verklebt, was zu einem erhöhten Verbund zwischen dem Fels und der Bewehrung der Spieße führt. In Lockergestein und in stark verklüften oder gebrächen Gebirge, wo die Bohrlöcher nicht standfest gebohrt werden können, dort werden selbstbohrenden Injektionsanker verwendet. Diese Anker dienen beim Bohren als Bohrgestänge mit verllorener Bohrkronen, beim Injizieren als Injektionsrohr und beim Ankern als Ankerstab. Spieße können somit ohne spezielle Vorrichtung, sondern lediglich mit einem klassischen Bohrwagen mit Ankersetzeinrichtung relativ schnell eingebaut werden. Sie können jedoch nicht bei auslauffähigen Böden, welche eine geringe Kohäsion aufweisen, verbaut werden. [10]

### 2.2.6 Ausbaubögen

Ausbaubögen werden sowohl zur unmittelbaren Stützung des Gebirges als auch zum Schutz der Mineure eingebaut. Speziell in nachbrüchigen, nicht standfesten und druckhaften Gebirge sind sie unabdingbar. Abhängig von der vorherrschenden Geologie können ein- oder zweistegige Vollwandprofile, Gitterträger oder Sternprofile verwendet werden. Wichtig ist eine gute Einspritzbarkeit mit geringen Spritzschatten und Rückprall sowie der daraus folgende gute Verbund zwischen den Ausbaubögen und der Betonschale. Je nach Gebirge können die Ausbaubögen als vorläufige oder auch als endgültige Sicherung dienen. Die Ausbaubögen können mittels Hebebühne, Kran, Raupenlader, Bagger, speziellen Versetzvorrichtungen im Nachläufer einer TBM oder von Hand eingebaut werden. Die Vorteile ergeben sich aus:

- Vorfertigung
- sofortige Tragfähigkeit bei Gebirgskontakt
- hohe Duktilität
- flexible Erhöhung des Ausbauwiderstandes (auch nachträglich möglich)
- bei Bedarf frei deformierbar ohne Auftreten von Beulen oder Knicken
- Vermessungshilfe

Nachteilig ist das schwere Gewicht der Profile und die daraus resultierende schlechte Handhabbarkeit, die geringe Flexibilität des Ausbruchquerschnittes, die Anpassungen mit Spritzbeton bei Überprofil sowie die langen Bestell- und Lieferzeiten. [10]

## 2.3 Ringspaltverfüllung

Der Raum zwischen Ausbruch und Außendurchmesser der Tübbinge wird als Ringspalt bezeichnet. Die tatsächliche Dicke ist abhängig vom Steuerspalt, der Blechdicke des Schildschwanzes und der Schildschwanzabdichtung. In den meisten Fällen liegt die Dicke jedoch zwischen 8 cm und 20 cm. Die tatsächliche Breite des Spaltes variiert jedoch je nach Exzentrizität der Tübbingringe, bei Kurvenfahrt oder bei einer Schneidradverkipfung.

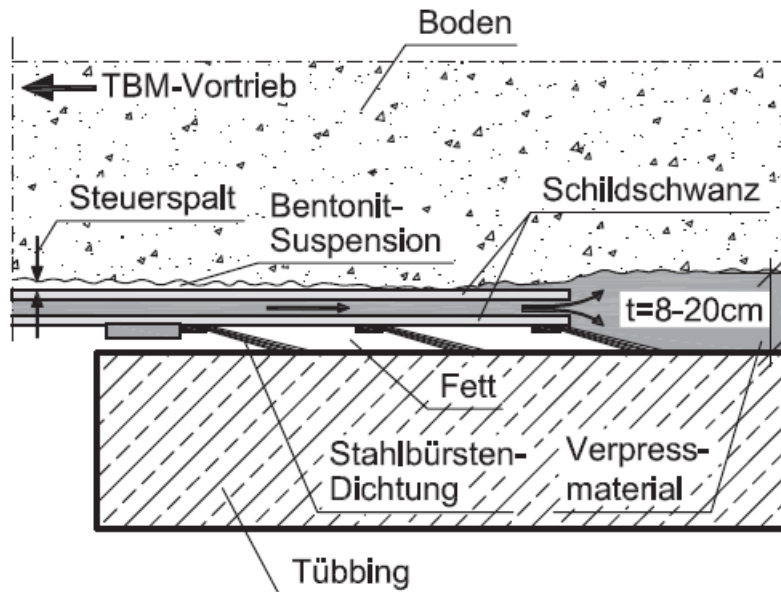


Abbildung 9: Ringspaltverfüllung [12]

Der Ringspalt wird mit einem geeigneten Ringspaltverfüllmaterial vollständig verpresst und es wird dabei ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Gebirge und Tunnelröhre gesichert. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten zum Verfüllen des Hohlraumes: kontinuierlich und nachträglich.

- **Kontinuierlich:**  
Bei Lockerböden wird der Ringspalt in der Regel direkt bei der Entstehung während des Vortriebes mittels Verpressleitungen verfüllt. Als Verfüllmaterial werden zumeist spezielle zementfreie bzw. zementarme Mörtel oder Mehrkomponentenmaterialien verwendet, welche sehr schnell erhärten.
- **Nachträglich:**  
Standfeste Felsböden können auch nachträglich mit einem Rückschlagventil verfüllt werden, welches in den Tübbing eingebaut wurde. Das verfüllte Material ist entweder ein injizierter Perlkies, ein Mörtel oder eine Kombination beider Varianten. Das Einblasen des Kiesel weist nur bedingt geeignete Bettungseigenschaften auf, weshalb diese Variante vorwiegend nur bei zweischaligen Tübbingausbau verwendet wird.

Die Aufgaben der Ringspaltverpressung sind:

- Verspannung der Auflockerungszone und dadurch die Vermeidung von Auflockerungen des anstehenden Bodens
- Vollständige elastische Bettung des Tübbingrings und der gesamten Tübbingelenkkette
- Vermeidung des Aufschwimmens des Tübbingrings
- Aufnahme der Lasten aus dem Nachläufer
- Zusätzliche Schutzschicht gegen aggressive Böden und Grundwasser

Die Bettungseigenschaften des Verfüllmaterials haben somit starken Einfluss auf die Qualität des Tübbingaufbaus. Beispielsweise können zu geringe Steifigkeiten des Verfüllmaterials im frischen Zustand zum Aufschwimmen der Tübbinge und zu großen Ringverformungen führen. Außerdem können die hohen Lasten des Nachläufers Folgeschäden verursachen.

Ringspaltmaterial:

- Ringspaltmörtel
- Einkomponenten-Ringspaltmörtel
- Zweikomponenten-Ringspaltmörtel
- Perlkies

Ringspaltmörtel:

Der Ringspaltmörtel wird zwar nur abschnittsweise in kleineren Mengen verarbeitet, jedoch aus logistischen Gründen in größeren Mengen zugeliefert. Dies setzt voraus, dass der Mörtel über mehrere Stunden hinweg eine gute Verarbeitbarkeit gewährleisten muss. Die Anforderungen dazu umfassen eine gute Pumpbarkeit und Fließfähigkeit bis zum Ende des Verpressens sowie eine rasche Steifigkeit und Scherfestigkeit unmittelbar nach dem Verpressen. Somit kann die Stabilisierung der Tübbinge gesichert werden. Die Druckfestigkeit der verpressten Ringspaltmörtel ist lediglich von untergeordneter Bedeutung, befindet sich jedoch zumeist zwischen 1 N/mm<sup>2</sup> und 3 N/mm<sup>2</sup>. Die konkreten Anforderungen sind in der folgenden Abbildung beschrieben.

|                                  |                                                                                                   |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Verarbeitbarkeit/<br>Ausbreitmaß | Fließmaß (t = 0 h): 15 cm ± 5 cm                                                                  |
|                                  | Ausbreitmaß (t = 0 h): 20 cm ± 5 cm                                                               |
|                                  | Ausbreitmaß (t = 8 h): 15 cm ± 5 cm                                                               |
|                                  | Ausbreitmaßversuche nach DIN 18 555, T2, 3.2.1.1 und 3.2.1.2; ASTM C124)                          |
| Druckfestigkeit                  | Druckfestigkeit (24 h) = normalerweise 0,5 N/mm <sup>2</sup>                                      |
| Steifemodul                      | Ähnlich dem eines für Tübbingausbauten gut geeigneten Baugrundes z. B. 5 bis 10 MN/m <sup>2</sup> |

Abbildung 10: Anforderungen zementhaltiger Ringspaltmörtel [12]

Einkomponenten-Ringspaltmörtel:

Die Steifigkeit und die Scherfestigkeit wird beim Einkomponenten-Ringspaltmörtel durch das Auspressen des Überschusswassers ins Gebirge erreicht. Aktive Ringspaltmörtel mit hohem Zementgehalt müssen aufgrund des ausgeprägten Ansteifverhaltens mit verzögernden Zusätzen gelagert werden. Bei diesen Mörteln erfolgt die Versteifung primär durch die Hydratation.

Inerte und Semi-inerte Mörtel weisen bei zunehmenden Anteilen von Zusatzstoffen eine geringere Entwässerungsfähigkeit auf. Dadurch wird das Wasserrückhaltevermögen erhöht und die Entwässerungsfähigkeit reduziert. Dies hat zur Folge, dass diese Mörtel speziell bei großen Ringspaltstärken ungleichmäßig entwässern. An der Druckseite wird der Mörtel relativ schnell konsolidiert und die Entwässerungsvorgänge der dahinterliegenden Schichten werden verhindert.

Eine typische Rezeptur eines zementarmen Ringspaltmörtels kann in der folgenden Abbildung entnommen werden:

|                                | Zement | Sand<br>0–1<br>[mm] | Sand<br>0–2<br>[mm] | Kies<br>2–8<br>[mm] | Bentonitsuspension<br>(Konzentration 6 %) | Flugasche | Wasser |
|--------------------------------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------------|-----------|--------|
|                                | [kg]   | [kg]                | [kg]                | [kg]                | [kg]                                      | [kg]      | [kg]   |
| Zementarmer<br>Ringspaltmörtel | 60     | 169                 | 674                 | 454                 | 166                                       | 328       | 164    |

Abbildung 11: Rezeptur zementarmer Ringspaltmörtel [12]

#### Zweikomponenten-Ringspaltmörtel:

Bei wasserundurchlässigen Böden werden vermehrt Zweikomponenten-Ringspaltmörtel eingesetzt. Dabei wird die Versteifung des Mörtels durch chemische Prozesse erreicht, indem Beschleuniger kurz vor dem Verpressen beigemischt werden. Durch das Mischverhältnis der Komponenten können die Eigenschaften des Mörtels je nach Bedarf angepasst werden.

In der folgenden Abbildung ist beispielhaft eine Rezeptur eines Zweikomponenten-Ringspaltmörtels dargestellt.

|                      | Komponente A |          |        |              | Komponente B  |        |
|----------------------|--------------|----------|--------|--------------|---------------|--------|
|                      | Wasser       | Bentonit | Zement | Stabilisator | Beschleuniger | Wasser |
|                      | [kg]         | [kg]     | [kg]   | [kg]         | [kg]          | [kg]   |
| 2-K-Verpressmaterial | 742          | 46       | 482    | 4            | 89            | 7      |

Abbildung 12: Rezeptur Zweikomponenten-Ringspaltmörtel [12]

#### Perlkies:

In standfestem Gebirge, bei welchem nur eine steife Verfüllung des Ringspaltes ohne Versteifung des Mörtels notwendig ist, wird primär Perlkies verwendet. Dabei werden zumeist Rundkörner mit 8 mm – 12 mm Durchmesser in den Ringspalt eingeblasen. Mit diesem Vorgang werden ausreichende Druck- und Schubkräfte erreicht, ohne dass eine zusätzliche Verdichtung notwendig ist. Der Blasversatz mit Perlkies kann ebenfalls als Drainage eingesetzt werden. Sollte die Drainage jedoch unerwünscht sein, dann muss eine zusätzliche Verpressung mit Zement erfolgen. [12]



## 3 ÖNORM B 2203-2

### 3.1 Geschichte

Die Geschichte des Tunnelbaus in Österreich ist stark von den Alpen geprägt. Über viele Jahrzehnte hinweg basierte das österreichische Vertragsmodell für Tunnelbauarbeiten auf der "Neuen Österreichischen Tunnelbauweise" (NÖT) und war vor allem auf den konventionellen Vortrieb ausgerichtet. Erst etwa ab den 1970er Jahren begann eine neue Entwicklung im Tunnelbau. Kleinere Tunnelquerschnitte wurden vermehrt mithilfe von Tunnelbohrmaschinen erschaffen, während größere Tunnel weiterhin im traditionellen zyklischen Vortrieb hergestellt wurden. Die Verwendung von Schildmaschinen war anfangs nur punktuell im Wiener Raum und später in Tirol zu beobachten, jedoch noch vergleichsweise selten. Die Vorherrschaft des konventionellen Vortriebs spiegelte sich auch in der ersten Ausgabe der ÖNORM B 2203 aus dem Jahr 1975 wider, die hauptsächlich auf diese Methode einging. Erst bei der Überarbeitung im Jahr 1983 wurden die ersten Vorschriften für Tunnelbohrmaschinen in die Norm aufgenommen. Die Norm wurde im Jahr 1998 in zwei Teile aufgeteilt, wobei ÖNORM B 2203-1 weiterhin den konventionellen Vortrieb abdeckte, während ÖNORM B 2203-2 den maschinellen Vortrieb sowohl mit Tunnelbohrmaschinen als auch mit Schildmaschinen behandelte. In der aktuellen Ausgabe von 2023 wurden im Wesentlichen inhaltliche Anpassungen vorgenommen, während die zweigeteilte Struktur der Norm beibehalten wurde. Dies spiegelt die fortschreitende Entwicklung und Anpassung an moderne Tunnelbaumethoden wider, wodurch der Tunnelbau in Österreich auf die vielfältigen Anforderungen, insbesondere in den Alpen, besser vorbereitet ist. [15]

### 3.2 Grundprinzipien eines Tunnelbauvertrages

Im Vergleich zu anderen Gewerken gibt es im Tunnelbau wesentliche Abweichungen in drei großen Bereichen. Dies betrifft den bau- und abrechnungstechnischen, den vertragsrechtlichen und den vertragsrechtlich-volkswirtschaftlichen Bereich.

#### **Bau- und Abrechnungstechnisch**

Der Erfolgsfaktor eines Projektes ist größtenteils von der Vortriebsleistung abhängig, dies umfasst den Ausbruch und die Sicherung des Gebirges. Weitere entscheidende Faktoren sind die Auskleidung, die Abdichtung und die Entwässerung.

Ausbruch und Sicherung:

Für den Tunnelbau hat sich die Klassifizierung des Gebirges bewährt, welche die Charakterisierung der Ausbrucharbeiten festlegt.

Dieses System soll sicherstellen, dass die Abrechnung der Leistungen ohne Konflikte verläuft. Es sollte jedoch nicht für die Kalkulation oder Abrechnung der Kosten verwendet werden, da diese stark von der Leistung beim Vortrieb abhängen. Entscheidend für die Vortriebsleistung ist die Vortriebsklasse, die den Querschnitt und die Abschlagslänge vorgibt, sowie die Art und Menge der benötigten Stützmittel. Stützmittel können Materialien wie Spritzbeton, Anker, Tübbings usw. sein, und ein zusätzlicher Verbrauch muss ebenfalls geregelt sein. Ein weiterer finanzieller Aspekt ist der Mehrausbruch, der zwischen Übermaß, arbeitstechnisch bedingtem Mehrausbruch und geologisch bedingtem Mehrausbruch differenziert und entsprechend vergütet wird. Erschwernisse und außergewöhnliche Ereignisse können ebenfalls erheblichen Einfluss auf die Kosten des Tunnelbaus haben.

#### **Vertragsrechtlich**

Ein Tunnelbauvertrag sollte eine gerechte Verteilung der Risiken gewährleisten und Flexibilität bieten, um sich an veränderte Bedingungen anzupassen. Darüber hinaus sollten Mechanismen zur Vermeidung, Lösung und Schlichtung von Konflikten im Vertrag verankert sein.

#### **Vertragsrechtlich – Volkswirtschaftlich**

Auch auf volkswirtschaftlicher Ebene ist eine ausgewogene Risikoverteilung von Bedeutung. Ein fairer Wettbewerb zwischen den Anbietern, die Vergleichbarkeit von Angeboten und die Begrenzung von Spekulationen sind weitere wichtige Aspekte, die im Sinne der Volkswirtschaftlichkeit berücksichtigt werden müssen. [15]

### **3.3 Der österreichische Tunnelbauvertrag**

#### **Bau- und Abrechnungstechnisch**

In Österreich erfolgt die Einteilung der Vortriebsklassen anhand einer sorgfältigen Analyse der Gebirgseigenschaften und des Verhaltens des Gebirges beim Ausbruch, insbesondere in Bezug auf die Penetration. Ebenso fließen die Art und Menge der erforderlichen Stützmittel in die Einteilung ein. Diese beiden Aspekte werden als erste und zweite Ordnungszahlen betrachtet und in einer Matrix dargestellt. Für jedes Feld dieser Matrix muss der Auftragnehmer (AN) einen Einheitspreis für den Ausbruch sowie eine minimale Vortriebsgeschwindigkeit angeben. Das Risiko, innerhalb dieser festgelegten Grenzen zu arbeiten, liegt in der Verantwortung des Unternehmens. Bei einer Überschreitung der Grenzwerte erfolgt die Einstufung in die nächsthöhere Klasse, was eine entsprechend abweichende Vergütung mit sich bringt.

Erschwernisse und nicht arbeitstechnisch bedingte Mehrausbrüche werden in den Bauabrechnungen durch zeitgebundene Kosten berücksichtigt. Im alpinen Gelände gestalten sich Erkundungsbohrungen aufgrund der schwierigen Bedingungen aufwändiger. Dies führt dazu, dass der Kenntnisstand der Geologie geringer ist, und somit außergewöhnliche Ereignisse häufiger auftreten. Daher ist die Anpassungsfähigkeit an die jeweiligen Projektbedingungen von großer Bedeutung, wobei klare Grenzen projektbezogen festgelegt werden müssen. Eine alternative Ausschreibungsvariante für den kontinuierlichen Vortrieb ist der sogenannte Lohnstundenausgleich (LAST). Anstatt des Einheitspreises für den Ausbruch, bestehend aus

Lohn- und Stoffkosten, werden hierbei die Lohnkosten der Vortriebsmannschaft nach Zeiteinheit und die Stoffkosten nach Mengeneinheit ausgeschrieben. Diese Variante erleichtert die Anwendung einer Regieabrechnung, insbesondere bei außergewöhnlichen Verhältnissen oder bei Stillständen. Der Bauablauf muss durch detaillierte Ablaufpläne und Bauzeitmodelle präzise beschrieben sein.

#### **Vertraglich**

Da die Anpassungsfähigkeit in Österreich einen großen Stellenwert besitzt, sind beispielsweise die zeitgebundenen Kosten in den Bauführungs- und Gerätekosten und in den Baustellengemeinkosten in einzelne Positionen unterteilt. Im Matrixmodell sind die Stunden der Vortriebsmannschaft oft im Ausbruchpreis enthalten, während die Stützmittelpreise keine Lohnstunden umfassen. Im Falle des Lohnstundenausgleichs ordnet der Auftragnehmer die Einheitspreise für die Stützmittel den Lohnanteilen zu. Die Risikoverteilung in Österreich ist sehr ausgewogen, der Unternehmer profitiert beispielsweise von der Klassifizierung des Ausbruchs nach Abschlaglänge und der Vorgabe des Überprofils durch den Planer. Gleichzeitig trägt er jedoch das volle Risiko für verfahrenstechnisch bedingten Mehrverbrauch an Spritzbeton. Die Implementierung von unteren und oberen Grenzwerten bei Wassererschwernissen stellt sicher, dass auch neutrale Regelungen existieren.

#### **Vertraglich – Volkswirtschaftlich**

Um einen fairen Wettbewerb zu gewährleisten, wird in Österreich die Positionsgliederung vorgegeben, die Detailkalkulation für maßgebliche Positionen mit dem Angebot abgegeben, die Detailkalkulation vor Vertragsschluss offen übergeben und die Bauzeit an die wichtigsten Leistungsansätze gekoppelt. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, eine faire Risikoverteilung zu ermöglichen und spekulative Preisgestaltungen seitens der Auftragnehmer zu beschränken. [15]

### **3.4 Neuerungen der ÖNORM B 2203-2**

Ab Mitte 2016 bis zur finalen Einführung im März 2023 wurde die ÖNORM 2203-2 einer umfassenden Überarbeitung unterzogen. Das Hauptziel dieser Überarbeitung bestand darin, eine neue Klassifizierungsmethodik mit ausgewogener Risikoverteilung zu entwickeln und sowohl die Kalkulierbarkeit als auch die Abrechnung von Tunnelbauarbeiten zu verbessern.

Eine der bedeutenden Neuerungen in dieser Aktualisierung ist die Einführung und klare Unterscheidung der Begriffe "Regelvortrieb", "Sondervortrieb" und "Ereignisbewältigung". Die Kriterien für die Einordnung als "Regelvortrieb" sind wie folgt beschrieben: [16]

- a) Es wird eine dem Bohrkopf-/Schneidradprofil entsprechende Ausbruchgeometrie an Ortsbrust und Laibung mit keinen oder untergeordneten Ausbrüchen, welche auf die Bohrgeschwindigkeit keinen Einfluss haben, festgestellt.
- b) Der mittlere Drehmomentenfaktor eines Hubes liegt in der projektspezifisch festzulegenden und fortzuschreibenden Bandbreite.
- c) Der mittlere Drehmomentenfaktor eines Hubes liegt außerhalb der in der projektspezifisch festzulegenden und fortzuschreibenden Bandbreite; und dies ist durch baubetriebliche Faktoren begründet.

d) Die Schildreibung ist so gering, dass keine Leistungseinbußen in der Bohrgeschwindigkeit vorliegen.

e) Die Meißel oder andere für den Vortrieb benötigten Bohrkopf-/Schneidradteile erleiden keine Gewaltschäden.

f) Es sind ausschließlich Regelausbau und Regelförderbetrieb erforderlich.

Für jeden Hub hat eine einvernehmliche Beurteilung durch den AN und den AG zu erfolgen.

[17]

Nur wenn sämtliche vorgeschriebenen Kriterien erfüllt sind, wird eine Tunnelbauarbeit als "Regelvortrieb" klassifiziert. Im Falle einer Abweichung von diesen Kriterien erfolgt die Vergütung nach den Kategorien "Sondervortrieb" oder "Ereignisbewältigung".

Beim "Sondervortrieb" wird die Vergütung anhand der tatsächlichen Positionen und des Aufwands für die spezifischen Arbeiten durchgeführt. Die Zeiten für Sondervortriebe werden anhand einer Referenzstrecke von 100 bis 300 Metern ermittelt. Sollte keine passende Referenzstrecke zur Verfügung stehen, erfolgt die Abrechnung nach dem Prinzip der "Ereignisbewältigung".

Treten außergewöhnliche Ereignisse auf, die besondere Maßnahmen erfordern, erfolgt die Vergütung gemäß der "Ereignisbewältigung". Dabei werden die zeitgebundenen Baustellengemeinkosten und Gerätekosten des Vortriebs sowie die Lohnkosten der Vortriebsmannschaften gemäß den spezifischen Positionen weiter vergütet.

Darüber hinaus wurden in der Überarbeitung der ÖNORM B 2203-2 auch die Regelungen für Wassererschwernisse und Klebrigkeit angepasst. In beiden Fällen stehen nun jeweils zwei Varianten zur Verfügung. Im bereits bestehenden Modell für Wassererschwernisse wurde eine untere und obere Grenzwassermenge eingeführt. Bei Überschreitung des oberen Grenzwertes erfolgt die Vergütung nach dem Prinzip des "Sondervortriebs". Im zweiten Modell gibt es keine feste Grenzwassermenge, stattdessen werden im Rahmen des "Regelvortriebs" Leistungen für die Wasserhaltung definiert. Diese Leistungen umfassen:

- sämtliche Aufwendungen für die Bewältigung des baubetrieblichen Brauchwassers
- Vorhalten von Pumpen für Bergwässer im betriebsbereiten Zustand
- Vorhalten der Infrastruktur zur jederzeitigen Sammlung von Bergwässern in Pumpensümpfen etc.
- Vorhalten der Infrastruktur zur jederzeitigen Ableitung von Bergwässern aus dem Vortriebsbereich bis zur Gewässerschutzanlage

Bei zusätzlichen Aufwendungen wird die Zeitdauer eines Hubes ermittelt, bei einer Überschreitung von zusätzlichen 35 Minuten pro Hub wird laut Sondervortrieb vergütet.

In der vorherigen Ausgabe der ÖNORM von 2005 wurden die Erschwernisse aufgrund von Klebrigkeit zwar erwähnt, jedoch fehlten konkrete Vorschriften oder Regelungen dazu. Die neue Ausgabe der Norm bringt hier eine deutliche Verbesserung, indem sie festlegt, dass eine projektspezifische Klassifizierung der Verklebungsneigung durchzuführen ist. In diesem Rahmen werden klare Grenzwerte für die Verklebungsneigung im Rahmen des

"Regelvortriebs" festgelegt. Im Falle von Erschwernissen aufgrund von Klebrigkeit erfolgt die Vergütung durch spezifische Positionen und zusätzliche Vortriebszeiten. Die zweite Option verzichtet auf festgelegte Grenzwerte und konzentriert sich stattdessen auf die Definition von Leistungen zur Minimierung der negativen Auswirkungen, die durch Verklebung entstehen können. Dennoch können zusätzliche Leistungen erforderlich sein, in solchen Fällen erfolgt die Vergütung nach dem Prinzip des "Sondervortriebs" bei einem zusätzlichen zeitlichen Mehraufwand von 35 Minuten pro Hub. Diese aktualisierten Regelungen bieten eine präzisere und besser anpassbare Herangehensweise an die Herausforderungen, die durch die Klebrigkeit des Gesteins entstehen können. Sie ermöglichen eine gezieltere Vergütung und Maßnahmen zur Minimierung von Verzögerungen und Schwierigkeiten im Tunnelbau.

Die neue Norm ermöglicht auch in Bezug auf die Planung der Tübbings eine Flexibilität mit zwei Varianten. Einerseits erfolgt die Ausschreibung auf Grundlage der Detailplanung, die seitens des Auftraggebers erstellt wird. Andererseits besteht die Option, dass die Planung der Tübbings auf Initiative des Auftragnehmers durchgeführt wird.

Eine wichtige Innovation in der ÖNORM B 2203-2 ist die Möglichkeit, Betriebsdaten von Tunnelvortriebsmaschinen für die Abrechnung heranzuziehen. Hierbei werden die realen Betriebsdaten der Maschine erfasst und anhand von Referenzparametern können Gesteins- und Gebirgsparameter berechnet werden. Dies ermöglicht eine faire und präzise Vergütung, die auf den tatsächlichen Bedingungen und Leistungen basiert. [16]

Der mittlere Drehmomentenfaktor wird dabei als ein Kriterium des Regelvortriebs eingesetzt. Der Drehmomentenfaktor ist das Verhältnis zwischen dem realen Drehmoment, welches von der TVM aufgezeichnet wird, und dem theoretischen Drehmoment. Das theoretische Drehmoment berechnet sich gemäß 4.3.3.1.1. „Ermittlung des Drehmomentenfaktors“ der ÖNORM B 2203-2:2023-03 aus der Tangentialkraft, der Meißelanzahl, des Bohrkopfdurchmessers der VTM sowie aus dem Drehmoment bei einem ins Leere drehenden Bohrkopf. [17]

### 3.5 Gebirgsklassifizierung

Die Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb der ÖGG ist in drei Phasen unterteilt. Die erste Phase umfasst die Planung und enthält darin die Charakterisierung des Gebirges. In der zweiten Phase wird die Planung der TVM für die Bauausführung beschrieben und die dritte Phase beinhaltet die Bauausführung.

Gebirgscharakterisierung gemäß „Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb“ der ÖGG:

Im ersten Schritt werden auf Basis der Erkundungsdaten die geotechnisch relevanten Eigenschaften der Gebirgsarten bestimmt. Gebirge mit gleichartigen Eigenschaften werden dabei zu einer Gebirgsart zusammengefasst, die exakte Unterteilung erfolgt dabei projektspezifisch. Mögliche relevante Eigenschaften im Festgestein:

- mechanische Eigenschaften
- Trennflächencharakteristika und -eigenschaften

- Gesteinsarten
- Gesteins- und Gebirgszustand
- hydraulische Eigenschaften
- Hohlräume im Gebirge
- Abrasivität
- Verklebungspotential
- Schwell- und Quellfähigkeit
- Veränderlichkeit

Mögliche relevante Eigenschaften im Lockergestein:

- mechanische Eigenschaften
- Parameter des Korngemisches
- Parameter der Bodenkomponenten
- Parameter der Matrix
- Lagerungsdichte
- Konsistenz
- Grundwasser
- hydraulische Eigenschaften
- Verklebungspotential
- Abrasivität
- Quellfähigkeit
- Veränderlichkeit
- Steine und Blöcke
- Verhärtungen

Im zweiten Schritt werden die Gebirgsverhalten bestimmt und diese anschließend den übergeordneten Kategorien der Gebirgsverhaltenstypen zugeordnet.

Das Gebirgsverhalten wird dabei maßgeblich von der Gebirgsart, dem Primärspannungszustand, dem Querschnittdurchmesser, der Lage der Hohlräume, der räumlichen Orientierung der Trennflächen, den Grenzen zwischen unterschiedlichen Gebirgsarten und den Bergwasserverhältnissen beeinflusst.

Die Kategorien der GVT umfassen:

- Standfestes Gebirge
- Gefügebedingte Ausbrüche
- Hohlraumnahe Überbeanspruchung
- Tiefreichende Überbeanspruchung
- Bergschlag
- Schichtknicken
- Firstniederbruch durch Scherversagen
- Rolliges Gebirge

- Fließendes Gebirge
- Quellendes Gebirge bzw. Schwellendes Gebirge
- Gebirge mit kleinräumig wechselnden Verformungseigenschaften

Wenn das Gebirge mit diesen übergeordneten Kategorien nicht ausreichend unterteilt wird, dann können weitere Unterkategorien eingeführt werden. Die Charakteristika dieser Unterkategorien müssen jedoch projektspezifisch erstellt und beschrieben werden.

Aufgrund dieser Gebirgscharakterisierung erfolgt die Wahl der Vortriebsart und des Vortriebsverfahrens sowie anschließend die Unterteilung der Vortriebsklassen und der tunnelbautechnischen Maßnahmen. [18]

### 3.6 Vortriebsklassen

In der ÖNORM werden die Vortriebsklassen durch eine Klassifizierungsmatrix festgelegt. Die Matrizen sind jeweils durch eine erste Ordnungszahl und einer zweiten Ordnungszahl definiert. Für die Vortriebsmaschinen „offene TBM“ (TMB-O) und „TBM mit Aufweitungsbohrkopf“ (TBM-A), „TBM mit Einfachschild“ (TBM-S) und „TBM mit Doppelschild“ (TBM-DS) sowie für Schildmaschinen (SM) werden jeweils eigene Matrizen angewandt. Die folgende Tabelle zeigt, wovon die Ordnungszahlen der Matrizen jeweils abhängig sind.

|                 | TBM-O / TBM-A                            | TBM-S / TBM-DS                                                                                                                            | SM                                                                                    |
|-----------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Ordnungszahl | Penetration                              | Penetration                                                                                                                               | Penetration                                                                           |
| 2. Ordnungszahl | Art, Menge und Einbauort der Stützmittel | „Leistungsbestimmende Merkmale“<br>- Single-Mode oder Double-Mode<br>- Tübbing (gedichtet / ungedichtet, Breite)<br>- Ringspaltverfüllung | „Leistungsbestimmende Merkmale“<br>- Betriebsmodus / Stützdruck<br>- Tübbing (Breite) |

Tabelle 1: Vortriebsklassifizierung ÖNORM B 2203-2

#### 3.6.1 Erste Ordnungszahl

Bereits in der Ausschreibung müssen für die erste Ordnungszahl die Werte einer „Referenzmaschine“ angegeben werden, welche die Parameter des Bohrsystems der Penetrationsermittlung beschreiben. Die Werte der Referenzmaschine umfassen:

- Schneidringdurchmesser [mm]
- Schneidringbreite [mm]
- Schneidringabstand [mm]
- Meißelandruckkraft [kN / Meißel]

### 3.6.2 Zweite Ordnungszahl

#### 3.6.2.1 TBM-O und TBM-A

Die zweite Ordnungszahl für den Vortrieb mittels TBM-O bzw. TBM-A hängt von der Art und der Menge der eingebauten Stützmittel ab. Hierbei wird die Stützmittelzahl angewendet, welche von der Art, Menge und des Einbauortes der Stützmittel pro Meter bezogen auf die Bewertungsfläche bestimmt wird.

| ERSTE<br>ORDNUNGSZAHL | Penetration<br>bis | ZWEITE ORDNUNGSZAHL                |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|--------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                       |                    | 0,5                                | 1,5                 | 2,5                 | 4                   | 6                   | 8                   | 11                   | 15                    | 19                    | 24                    | 30                    | 36                    |
|                       |                    | GELTUNGSBEREICH                    |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
|                       |                    | 0<br>bis<br>1,00                   | 1,01<br>bis<br>2,00 | 2,01<br>bis<br>3,00 | 3,01<br>bis<br>5,00 | 5,01<br>bis<br>7,00 | 7,01<br>bis<br>9,00 | 9,01<br>bis<br>13,00 | 13,01<br>bis<br>17,00 | 17,01<br>bis<br>21,00 | 21,01<br>bis<br>27,00 | 27,01<br>bis<br>33,00 | 33,01<br>bis<br>39,00 |
| 1                     | > 11,5 mm          |                                    |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
| 2                     | 11,5 mm            |                                    |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
| 3                     | 9,00 mm            |                                    |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
| 4                     | 7,00 mm            |                                    |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
| 5                     | 5,50 mm            |                                    |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
| 6                     | 4,20 mm            |                                    |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
| 7                     | 3,20 mm            |                                    |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
| 8                     | 2,60 mm            |                                    |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |
| S                     | 2,00 mm            | siehe Regelungen zu Sondervortrieb |                     |                     |                     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |

Abbildung 13: Vortriebsklassenmatrix TBM-O und TBM-A [17]

#### 3.6.2.2 TBM-S und TBM-DS

Die zweite Ordnungszahl der TBM-S und TBM-DS wird durch „leistungsbestimmende Merkmale“ festgelegt. Beispiele für leistungsbestimmende Merkmale können die Verwendung eines Single-Mode oder eines Double-Modes, gedichtete oder ungedichtete Tübbinge, Tübbingbreite sowie die Ringspaltverfüllung sein. Sollte kein leistungsbestimmendes Merkmal vorherrschen, dann kann die zweite Ordnungszahl entfallen.

| ERSTE<br>ORDNUNGSZAHL | Penetration bis | ZWEITE ORDNUNGSZAHL                |             |
|-----------------------|-----------------|------------------------------------|-------------|
|                       |                 | leistungsbestimmende Merkmale      |             |
|                       |                 | Single-Mode                        | Double-Mode |
| 1                     | > 11,5 mm       | 1/1                                | 1/2         |
| 2                     | 11,5 mm         | 2/1                                | 2/2         |
| 3                     | 9,00 mm         | 3/1                                | 3/2         |
| 4                     | 7,00 mm         | 4/1                                | 4/2         |
| 5                     | 5,50 mm         | 5/1                                | 5/2         |
| 6                     | 4,20 mm         | 6/1                                | 6/2         |
| 7                     | 3,20 mm         | 7/1                                | 7/2         |
| 8                     | 2,60 mm         | 8/1                                | 8/2         |
| S                     | 2,00 mm         | siehe Regelungen zu Sondervortrieb |             |

Abbildung 14: Vortriebsklassenmatrix TBM-S und TBM-DS [17]

### 3.6.2.3 SM

Auch bei der Schildmaschine wird die zweite Ordnungszahl von „leistungsbestimmenden Merkmalen“ bestimmt. Bei einer Schildmaschine können diese Merkmale beispielsweise der Betriebsmodus, der Stützdruck oder die Art der Tübbinges sein. Bei mehreren leistungsbestimmenden Merkmalen wird dem kostenbestimmenderen Merkmal Vorzug gegeben beziehungsweise ist es möglich, ein weiteres Merkmal in Kombination zu setzen. Sollte kein leistungsbestimmendes Merkmal vorliegen, so darf die zweite Ordnungszahl auch bei der Schildmaschine entfallen.

| ERSTE<br>ORDNUNGSZAHL | Penetration bis | ZWEITE ORDNUNGSZAHL                |                 |
|-----------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|                       |                 | leistungsbestimmende Merkmale      |                 |
|                       |                 | Betriebsmodus 1                    | Betriebsmodus 2 |
| 1                     | > 11,5 mm       | 1/1                                | 1/2             |
| 2                     | 11,5 mm         | 2/1                                | 2/2             |
| 3                     | 9,00 mm         | 3/1                                | 3/2             |
| 4                     | 7,00 mm         | 4/1                                | 4/2             |
| 5                     | 5,50 mm         | 5/1                                | 5/2             |
| 6                     | 4,20 mm         | 6/1                                | 6/2             |
| 7                     | 3,20 mm         | 7/1                                | 7/2             |
| 8                     | 2,60 mm         | 8/1                                | 8/2             |
| S                     | 2,00 mm         | siehe Regelungen zu Sondervortrieb |                 |

Abbildung 15: Vortriebsklassenmatrix SM [17]

Außerhalb der Bandbreite der Matrix wird gemäß den Regelungen zu Sondervortrieb vorgegangen.

Für den Vortrieb werden außerdem Ausbaufestlegungen bestimmt, in welchen die bestimmenden Maßnahmen einvernehmlich zwischen AG und AN vereinbart wurden. Der AG ist hierbei primär für die Standsicherheit des Ausbruches und der AN für die Sicherheit aller Arbeitnehmer verantwortlich. Bei Meinungsverschiedenheiten über die Ausbaufestlegung wird diese vom AG unter Beiziehung des TSV festgelegt. Bei Gefahr in Verzug muss jedoch der AN den Ausbau festlegen und umsetzen.

### 3.6.3 Positionen des Ausbruchs

Für die Positionen des Ausbruchs sind zwei verschiedene Modelle vorgesehen. Bei Modell A wird jeder Vortriebsklasse eine Position für Lohn und Sonstiges in Meter zugeteilt. In Modell B werden die Positionen für die Lohnkosten der Vortriebsmannschaft je Zeiteinheit und je Vortriebsabschnitt eingeteilt. Die Menge (VE) wird anschließend aus der angebotenen Vortriebsgeschwindigkeit und der ausgeschriebenen Vortriebsklassenverteilung berechnet. Die zeitgebundenen Kosten werden analog ermittelt. Für sonstige nicht-zeitgebundene Anteile werden für jede Vortriebsklasse eigene Positionen in Meter zugewiesen. [17]



## 4 Internationale Vertragsmodelle

### 4.1 Schweiz

#### 4.1.1 Die Tunnelnorm der Schweiz

Die Schweizer Normen im Bereich des Untertagebaus sind das Ergebnis der Arbeit des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA). Sie wurden in enger Zusammenarbeit mit allen relevanten Akteuren entwickelt, darunter Bauherren, Unternehmer, Planer und Fachspezialisierte. Ein besonderes Merkmal dieser Normen ist ihre Fokussierung auf das Wesentliche, was dazu führt, dass sie in der Regel kurz und prägnant formuliert sind. Dies trägt erheblich zur Verständlichkeit und Praxistauglichkeit bei.

Die Anfänge der Schweizer Untertagebaunormen gehen bis ins Jahr 1966 zurück. Zu dieser Zeit gab es noch keine internationalen Normen, die als Vorbild hätten dienen können. Dennoch konnte die Schweiz aufgrund ihrer Erfahrung im Tunnelbau, insbesondere durch den Eisenbahn- und Kraftwerksbau, auf eine solide Grundlage zurückgreifen. Außerdem hat der Bau des Gotthard-Straßentunnels, welcher im Jahr 1970 begonnen wurde, zur Entstehung einer nationalen Norm angeregt. 1975 wurden die Normen SIA 198 "Untertagebau" und SIA 199 "Erfassen des Gebirges im Untertagebau" veröffentlicht. Diese Normen, zusammen mit der SIA 118 "Allgemeine Bedingungen für Bauarbeiten", regelten die Ausschreibung, Ausführung und Abrechnung von Untertagebauprojekten. Die SIA 199 befasst sich dabei insbesondere mit der Klassifizierung und Charakterisierung des vorhandenen Gebirges.

Ein wegweisender Grundsatz wurde bereits 1975 verabschiedet, der bis heute Gültigkeit hat. Er besagt, dass die Entschädigung für Ausbrucharbeiten auf Grundlage einer Klassifizierung erfolgen sollte, die Art, Zeitpunkt und den Umfang der Sicherungsmaßnahmen berücksichtigt. Damals wurde erkannt, dass Klassifizierungen aufgrund des Gebirgsverhaltens oder bestimmter Indexwerte unzuverlässige Ansätze sind. Ebenso wurden bereits 1975 die international gebräuchlichen Definitionen der Vortriebsbereiche L1, L2 und L3 für die Entschädigung des Unternehmens festgelegt. Dieser Grundsatz wurde später auch von anderen Ländern, wie zum Beispiel Österreich, übernommen.

Die Überarbeitung der SIA 198 im Jahr 1993 führte bereits alle relevanten Baumethoden für Fels- und Lockergestein ein, wobei der geschlossene Schildvortrieb ausgenommen war. Zudem wurde die "Projektidee" eingeführt, die den Bauherren verpflichtet, seine Projekt- und Nutzungsziele festzulegen. Die Tragwerksnormen der Schweiz, die seit 1989 in Kraft sind, umfassen Risikoszenarien, Grenzzustände, Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit und dienten als Vorbild für die europäischen Eurocodes. Seit 1998 sind sie auch im Bereich des Untertagebaus anwendbar.

Im Jahr 2004 wurden organisatorische und technische Aspekte voneinander getrennt. Die organisatorischen Aspekte wurden in die neue Norm SIA 118/198 "Allgemeine Bedingungen für Untertagebau" aufgenommen, die als Ergänzung zur SIA 118 fungiert. Die Version der SIA 198 von 2004 enthält somit nur noch Anforderungen an Baustoffe, wichtige Vorschriften zur Ausführung sowie technische Aspekte, in welchen wiederum die Bereiche Vortriebsverfahren und Bauhilfsmaßnahmen erweitert wurden. Die "Projektidee" wurde in dieser Version wieder entfernt, da die erforderlichen Informationen bereits durch die im Swisscode vorgeschriebenen Nutzungsvereinbarungen und die Projektbasis abgedeckt sind. Des Weiteren wurde 2004 die Norm SIA 197 eingeführt, die zusammen mit SIA 197/1 und SIA 197/2 die Grundsätze für die Projektierung von Untertagebauten festlegt.

Heute sind für Tunnelbauprojekte in der Schweiz die Regelwerke SIA 197, SIA 197/1 und SIA 197/2 für die Projektierung, SIA 198 für die Ausführung, SIA 199 für die Gebirgsbeschreibung und die SIA 118/198 für die vertraglichen Bedingungen maßgeblich. Diese Normen stellen einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit und Qualität im Untertagebau dar. [19]

#### **4.1.2 SIA 197 – Projektierung Tunnel - Grundlagen**

Zwei wesentliche Aspekte in Bezug auf die SIA 197 sind die Nutzungsvereinbarung und die Projektbasis. Die Nutzungsvereinbarung wird in enger Zusammenarbeit zwischen dem Bauherrn und dem Projektingenieur schrittweise entwickelt und umfasst jene bauwerksbezogenen Anforderungen, die in den Verantwortungsbereich des Bauherrn fallen. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Aspekte wie die geplante Nutzungsdauer, die vorhergesehene Nutzung des Bauwerks, sowie Anforderungen bezüglich Ausrüstung, Abdichtung, Sicherheit und Umweltauflagen.

Im Gegensatz dazu enthält die Projektbasis die Anforderungen, die in den Verantwortungsbereich des Projektingenieurs fallen. Dies beinhaltet unter anderem tragwerkspezifische Festlegungen, die sowohl bei der Projektierung als auch bei der Ausführung, der Nutzung und der langfristigen Instandhaltung des Projekts relevant sind.

Je nach Projektphase werden die dazugehörigen Teilphasen, projektbezogenen Ziele und Leistungen im Bereich des Gebirges und des Baugrundes festgelegt. [19]

| Phasen          | Teilphasen                                       | Ziele<br>(projektbezogen)             | Gebirge, Baugrund                                                                                                                                |
|-----------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Projektierung   | Strategische Planung                             | Definition des Leitbildes             |                                                                                                                                                  |
|                 | Vorstudie                                        | Nachweis der Machbarkeit              | Geologische, hydrogeologische und geotechnische Berichte auf Grund vorhandener Dokumente erstellen.<br>Erkundungen vorschlagen.                  |
|                 | Vorprojekt, Generelles Projekt <sup>11</sup>     | Optimale bauliche Lösung              | Geologische, hydrogeologische und geotechnische Berichte auf Grund aktueller Ergebnisse revidieren.<br>Ergänzende Erkundungen vorschlagen.       |
|                 | Auflageprojekt, Ausführungsprojekt <sup>11</sup> | Bewilligtes Projekt                   | Geologische, hydrogeologische und geotechnische Berichte auf Grund aktueller Ergebnisse revidieren.<br>Evtl. ergänzende Erkundungen vorschlagen. |
|                 | Bauprojekt, Detailprojekt <sup>11</sup>          | Baureifes Projekt                     | Zusammenfassende geologische, hydrogeologische und geotechnische Berichte erstellen.                                                             |
| Ausführung      | Ausschreibung                                    | Vergabereife Ausschreibungsunterlagen | –                                                                                                                                                |
|                 | Ausführungsprojekt                               | Ausführungsreifes Projekt             | Tatsächliche Verhältnisse erfassen und beurteilen.<br>Geologische, hydrogeologische und geotechnische Berichte gegebenenfalls aktualisieren.     |
| Bewirtschaftung | Nutzung und Betrieb                              | Sicherer Gebrauch                     |                                                                                                                                                  |
|                 | Erhaltung                                        | Verfügbarkeit über vorgesehene Dauer  |                                                                                                                                                  |

<sup>11</sup> Für Nationalstrassen

Abbildung 16: Planungsphasen und Ziele der SIA 197 [20]

Die SIA 197 widmet sich auch der Thematik des Gebirges. Sie beschreibt die Wichtigkeit der Gebirgsuntersuchung in einer frühen Projektphase sowie eine klare Trennung der Begriffe „Beschreibung“ und „Beurteilung“ eines Gebirges. In der "Beschreibung" werden ausführlich die geologischen, geotechnischen und hydrologischen Eigenschaften des Gebirges erfasst. Dies beinhaltet beispielsweise das Verhalten während des Abbaus und die anschließende Verwertung des gewonnenen Ausbruchmaterials. Die "Beurteilung" hingegen bildet die Grundlage für die Planung von Maßnahmen zur Kontrolle und Minimierung potenzieller Gefährdungen. Diese Beurteilung setzt eine sorgfältige und gründliche Beschreibung des Gebirges voraus, um effektive Schutzmaßnahmen und Risikomanagementstrategien entwickeln zu können.

Kapitel 4 legt den grundlegenden Fokus auf die Gewährleistung der Sicherheit von Personen, der Umwelt und von Sachwerten sowohl während des Baus als auch im laufenden Betrieb. Hierbei wird eine klare Unterscheidung zwischen Gefährdungen, die auf dem Verhalten des umgebenden Gebirges und der Bauausführung beruhen, Gefährdungen, die aus unzureichender Zuverlässigkeit der Infrastruktur während des Betriebs resultieren, sowie Gefährdungen durch Ereignisse wie Brände getroffen. Es werden verschiedene Maßnahmen in Betracht gezogen, die sowohl baulicher, betrieblicher als auch organisatorischer Natur sein können, welche die Grundlage für das jeweilige Projekt bilden. Kapitel 5 konzentriert sich auf den Umweltschutz und seine praktische Umsetzung, während Kapitel 6 die Grundsätze für die Nutzung, den Betrieb und die Erhaltung der Infrastruktur definiert.

Kapitel 7 und 8 widmen sich der Projektierung des Tragwerks für Untertagbauten. In festem Felsgestein bildet ausschließlich das Gebirge um den Hohlraum herum das Tragwerk. Falls das umgebende Gestein nicht stabil genug ist, müssen zusätzliche Elemente in das Tragwerk integriert werden. Diese Elemente können entweder vor dem Ausbruch, wie beispielsweise Rohrschirme und Brustanker, oder nach dem Ausbruch, in Form von Ausbruchsicherungen und Verkleidungen, eingesetzt werden. Es gibt auch tragwerksgestaltende Maßnahmen, die darauf abzielen, das Gebirge zu verbessern, zu versteifen, zu verfestigen oder abzudichten, wie beispielsweise Vereisung und Injektionen. Zudem kann die Geometrie des Ausbruchs das Verhalten des Tragwerks beeinflussen.

Die Projektierung umfasst den Entwurf, die Tragwerksanalyse und die Bemessung, die in der SIA 197 eigene Kapitel erhalten haben. Der Entwurf umfasst die projektbestimmende Grundidee hinsichtlich des Tragwerks, die Tragwerksanalyse beschreibt die rechnerische Erfassung des Tragwerksverhaltens anhand eines Tragwerksmodells und in der Bemessung erfolgt die Wahl der Abmessungen und der Baustoffe des Tragwerks. In Bezug auf die Grundsätze ist festgelegt, dass die angewandten Methoden auf anerkannter Ingenieurpraxis und gegebenenfalls auf experimentell bestätigter Theorie beruhen sollten. Die verwendeten Modelle zur Untersuchung unerwünschter Ereignisse müssen für diese spezifischen Situationen geeignet sein und können demnach vielfältig sein. Dabei ist es entscheidend, auf Erfahrungswerte aus vergleichbaren Bauwerken zurückzugreifen. Die Bemessungen sollten in der Regel auf Grundlage von Grenzzuständen erfolgen. In bestimmten Fällen können sie jedoch auch aufgrund von konstruktiven oder ausführungstechnischen Überlegungen erfolgen, sofern ausreichende Erfahrung vorliegt und dies eine Bemessung mit vergleichbarer Zuverlässigkeit ermöglicht. Nicht enthalten sind jedoch beispielsweise etwaige Festlegungen im Verantwortungsbereich des Projektengineurs.

#### **Entwurf:**

Der Entwurf bildet den entscheidenden Auftakt eines Projekts und wird in der schweizerischen Norm besonders hervorgehoben. In dieser Phase werden verschiedene Tragwerksvarianten sorgfältig untersucht und bewertet. Ein bedeutender Schwerpunkt des Entwurfs besteht darin, Gefahren in jeder Phase des Bauvorhabens zu identifizieren und die entsprechenden Schutzmaßnahmen zu erarbeiten. Die Nichterkennung von Gefahren birgt das größte Risiko.

Idealerweise werden mehrere Maßnahmenpakete im Rahmen des Prozesses "Erkennen, Beurteilen, Entschärfen von Gefahren" entwickelt. Diese Herangehensweise an das Erkennen von Gefahren ermöglicht es der schweizerischen Norm, eine einheitliche und verfahrensübergreifende Untersuchung durchzuführen, unabhängig vom Standort, Gesteinstyp oder Vortriebsmethode. Des Weiteren berücksichtigen die Untertagebaunormen keine Felsklassifikationen, die auf Indexwerten basieren, und sind somit für die Projektierung, Auswertung und Vergütung nicht relevant.

Das genaue Verhalten des Gebirges wird erst während der Ausführung des Projekts erkannt, weshalb technische Ansätze gewählt werden können, die innerhalb einer vorhergesagten Bandbreite funktionieren. Sollte eine solche technische Lösung nicht realisierbar sein, können der Entwurf, die Tragwerksanalyse und die Bemessung basierend auf den Erkenntnissen, welche während des Vortriebs gewonnenen werden, angepasst und verbessert werden. Dieses Konzept wird in der SIA 197 als "Beobachtungsmethode" bezeichnet und entsprechend geregelt. [19]

### **4.1.3 Risiko**

Die „International Tunneling Insurance Group“ hat in Zusammenarbeit mit der „International Tunnel and Underground Space Association“ (ITA) ein weltweit anerkanntes Werk zum Risikomanagement mit dem Titel "Code of Practise for Risk Management of Tunnel Works“ veröffentlicht. In diesem Dokument wird Risiko als die Unsicherheit in Bezug auf die Erfüllung der Projektanforderungen beschrieben. Es betont, dass Risiken sowohl negative Gefahren als auch positive Chancen darstellen können. Insbesondere im Tunnelbau tritt aufgrund der Unbekanntheit des Baugrunds die Gefahr häufiger auf und dies kann erhebliche Auswirkungen auf das Projekt haben. In der Schweiz werden Risikobewertungen meistens durch qualitative Systeme mit einfachen Klassifizierungsmatrizen durchgeführt. Tunnelprojekte sind oft von großer Bedeutung für die Infrastruktur und genießen daher ein breites öffentliches Interesse. In der Schweiz werden bedeutende Infrastrukturbauten politisch durch Volksentscheide beschlossen, was ihnen einen starken Rückhalt in der Bevölkerung verschafft. Dies reduziert institutionelle Risiken erheblich und ermöglicht langfristig stabile Finanzierungsmodelle wie beispielsweise den FinöV-Fonds oder Einnahmen aus Schwerverkehrsabgaben. Da Risiken auch für die Auftragnehmer von existenzieller Bedeutung sind, ist es von großer Wichtigkeit, dass die Risikoverteilung auf eine gründliche Erkundung des Baugrunds gestützt ist und anschließend fair zwischen den Parteien verteilt wird. Bei Meinungsverschiedenheiten steht ein Streitschlichtungsgremium zur Verfügung, um Konflikte zu lösen. [19]

### **4.1.4 Ausschreibung und Vertrag**

In der Schweiz wird in den meisten Fällen der Einheitspreisvertrag angewandt. Dieser Vertragstyp ermöglicht dank seinen detaillierten Leistungspositionen eine rasche Anpassung der Baumaßnahmen. Der Einsatz eines Globalvertrags oder Totalunternehmervertrags ist eher selten und erfolgt normalerweise nur dann, wenn der Baugrund ausreichend bekannt ist. Schon

in der ersten Ausgabe der SIA 198 im Jahr 1975 wurde festgelegt, dass eine ausgewogene Zuordnung der Risiken erfolgen muss. Keine der Vertragsparteien sollte das gesamte Risiko tragen oder übermäßig belastet werden. Jede Partei soll die Verantwortung für die Risiken tragen, die sie maßgeblich beeinflussen kann. Das bedeutet, dass der Bauherr als Grundbesitzer das Risiko für die Baugrundverhältnisse außerhalb der Bandbreite seiner Prognose übernimmt. Der Unternehmer wiederum wählt seine Vortriebsmethode auf der Grundlage dieses Wissens und trägt die Verantwortung für die Leistung gemäß den vertraglichen Vereinbarungen. Wenn keine spezifischen Vereinbarungen getroffen wurden und die SIA 118/197 Teil des Vertrags ist, wird die vorgegebene Risikozuordnung gemäß dieser Norm angewendet. Der Risikobereich des Bauherrn umfasst:

- Gasvorkommen
- unerwünschte Auswirkungen auf bestehende Bauwerke trotz sachgemäßer Ausführung
- größere geologisch bedingte Nachbrüche
- außerordentliche Wassereinbrüche
- Antreffen von Altlasten oder archäologischen Relikten

Der Risikobereich des Unternehmers umfasst:

- Änderungen der Beschaffenheit des Gebirges innerhalb der im Werkvertrag angegebenen Grenzen
- Erreichen der vertraglich festgelegten Grenzen

Die SIA 118 regelt zusätzlich Vergütungsansprüche bei außerordentlichen Umständen, welche die Fertigstellung des Bauwerks hindern oder übermäßig erschweren und die nicht vorhersehbar waren. Die Leistungen im Zusammenhang mit der Baustelleneinrichtung werden über die gesamte Bauzeit hinweg in vielen Positionen mit einer Globalen vergütet, wobei jedoch bestimmte Positionen wie der Energieverbrauch, auf Grundlage des tatsächlichen Verbrauchs abgerechnet werden. Änderungen in der Bauzeit werden durch das Bereithalten der Baustelleneinrichtung über einen bestimmten Zeitraum hinweg vergütet. Die Vergütung des Vortriebs hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab:

- Art des Bauwerks (Tunnel, Schacht, Kaverne)
- Vortriebsverfahren (TVM, Sprengvortrieb)
- Ausbruchsart (Vollausbruch, Teilausbruch)
- Sicherungsklasse (Art, Bereich und Menge der Sicherungsmittel)
- Abbaubarkeit des Gebirges (Bohr- und Abbauklasse)
- Stützung der Ortsbrust (Art und Menge der Stützmittel)
- Bauhilfsmaßnahmen (Art, Umfang und Einbauort)
- Weitere Erfordernisse (Vorauserkundungen, Messungen, Maßnahmen bei Wasseranfall, Gasvorkommen, hohe Temperaturen, etc.)

Die SIA 118/198 bietet standardisierte Lösungen für den Ausbruch und die Sicherung von Tunnelbauprojekten. Diese Lösungen umfassen ein Klassifizierungssystem für Sicherungsmaßnahmen, das je nach Vortriebsmethode variiert. Der Aufwand für Sicherungsklasse, Bohrklasse, Abbauklasse und Ausbruchsart hängt von der spezifischen

Vortriebsmethode ab. Die Sicherungsklassen sind in sechs Klassen unterteilt und gelten für den Sprengvortrieb, den Tunnelbohrmaschinenvortrieb und den maschinenunterstützten Vortrieb im Fels. Im Gegensatz dazu werden beim maschinenunterstützten Vortrieb im Lockergestein und beim Schildmaschinenvortrieb keine Sicherungsklassen unterschieden. Der TBM-Vortrieb wird anhand von Bohrklassen bewertet, während der maschinenunterstützte Vortrieb im Fels und der SM-Vortrieb in Abbauklassen unterteilt werden. Er werden dabei Tunnelabschnitte mit gleicher Abbaubarkeit unterteilt.

Der kritische Weg im Bauprogramm, bestehend aus den maßgebenden Mengen des LV und den Leistungsangaben, legt die Sollbauzeit fest. Änderungen in den maßgebenden Mengen wirken sich auf die maßgeblichen Fristen aus, die entsprechend angepasst werden müssen. Dieser Anpassungsvorgang wird in der SIA 118/198 über die Ermittlung der Abrechnungszeit beschrieben und führt dazu, dass sich die Fertigstellung des Bauwerks nach der Berechnung der Abrechnungszeit ändern kann. Die ermittelten Fristen bilden die Grundlage für die Vergütung der bauzeitabhängigen Kosten für die Baustelleneinrichtungen und anderer Dienstleistungen im Verlauf des Bauprojekts.

Während der Ausführungsphase treffen Bauherr und Unternehmer gemeinsame Entscheidungen zu verschiedenen Themen, wie beispielsweise der erforderlichen Ausbruchssicherung, Sondermaßnahmen und Projektänderungen. Die Verantwortung für die Arbeitssicherheit der Arbeitnehmer liegt beim jeweiligen Arbeitgeber, was bedeutet, dass der Unternehmer für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz verantwortlich ist. Er ist ebenso für Sofortmaßnahmen zur Schadensbeschränkung in Gefahrensituationen verantwortlich, worüber der Bauherr umgehend zu informieren ist. Das weitere Vorgehen wird dann in Zusammenarbeit zwischen dem Unternehmer und dem Bauherrn festgelegt. Es ist dem Unternehmer gestattet, Anträge zur Erweiterung des Ausbruchprofils oder die Änderung oder Beibehaltung der Ausbruchsart zu stellen. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Zustimmung des Bauherrn in diesem Zusammenhang keine Auswirkungen auf die Bestellungsart, die Vergütung und die vereinbarten Fristen hat und diese unverändert bleiben. [19]

#### **4.1.5 Umsetzung im Beispiel des Gotthard Basistunnels**

Der Gotthard Basistunnel, der längste Eisenbahntunnel der Welt, wurde im Jahr 2016 nach einer Planungsphase von 25 Jahren und einer Bauzeit von 17 Jahren erfolgreich fertiggestellt. Dieser Tunnel gilt heute als Pionierleistung des schweizerischen Tunnelbaus.

Die ursprünglichen Kosten waren mit 6,3 Milliarden CHF veranschlagt, erwartungsgemäß wurden die Gesamtkosten jedoch deutlich höher. Fast die Hälfte der zusätzlichen Ausgaben war auf gestiegene Anforderungen an die Sicherheitstechnik zurückzuführen, während die geologischen Herausforderungen nur etwa ein Sechstel der Mehrausgaben ausmachten.

Die Planung und Bauaufsicht obliegen dem Auftraggeber ATG und dessen Beratern, während die eigentliche Bauausführung an Auftragnehmer vergeben wurde. Sowohl die Baustelleneinrichtung als auch die Bauleistungen wurden gemäß den Standards des

Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) durchgeführt. Die Vergütung basierte auf Einheitspreisen und tatsächlich verbauten Mengen.

Ein bemerkenswerter Aspekt dieses Projekts war das Konfliktmanagement. Dieser Prozess wurde sorgfältig strukturiert und umfasste progressive Stufen, die von der Baustellenebene bis hin zur beratenden Schiedskommission reichten. Eine herausragende Leistung des Konfliktmanagements war, dass es in keinem Fall zu gerichtlichen Auseinandersetzungen kam. Selbst in den wenigen Fällen, in denen keine einvernehmliche Lösung gefunden wurde, konnte die Schiedskommission auf höchster Ebene eine Lösung erzielen. [21]

#### 4.1.6 Ausbruchpositionen

Die größten Einflussfaktoren für den Aufwand des Vortriebes sind die Art des Bauwerks, das Vortriebsverfahren, die Ausbruchart, Art, Einbauort und Menge der Sicherungsmittel (Sicherungsklasse), die Abbaubarkeit des Baugrunds (Bohr- und Abbauklasse), Art und Menge der Bruststützung sowie Art, Umfang und Einbauort der Bauhilfsmaßnahmen.

Daher werden in der Schweiz die folgenden **Vortriebsverfahren für Tunnelvortriebsmaschinen** voneinander unterschieden:

- TBM Tunnelvortrieb im Fels
- MUF Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels mithilfe von Teilquerschnittmaschinen, Baggern, Rippergeräten, Fräsen usw.
- MUL Maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein mithilfe von Teilschnittmaschinen, Baggern, Rippergeräten usw.
  - Vortrieb mit systematischen Bauhilfsmaßnahmen
  - Vortrieb ohne oder mit nur sporadischen Bauhilfsmaßnahmen
  - Vortrieb ohne oder mit mitlaufender Stützvorrichtung (Messerschild)
- SM Schildmaschinenvortrieb im Lockergestein
  - Schild mit teilflächigem Abbau mittels fest montierten Abbaugeräten, ohne oder mit mechanischer Bruststützung oder Druckluftstützung (offener Schild)
  - Schild mit vollflächigem Abbau und Stützung (Schneidrad, mechanische Bruststützung, Druckluft, Flüssigkeits- oder Erddruckstützung)

Die dazugehörigen **Ausbruchsarten** werden unterschieden zwischen:

A- Vollausbuch

B- Kalottenausbruch und nachträglicher Ausbruch von Strosse und Sohle

C- unterteilter Kalottenausbruch und nachträglicher Ausbruch von Strosse und Sohle

D- Parameterstollen und nachträglicher Ausbruch von Kalotte, Kern und Sohle

E- Weitere, vom Bauherrn objektspezifisch definierte Teilausbruchverfahren

Vertikale und geneigte Schächte werden unterschieden in:

- Vollausbuch

- Bauvorgang mit Pilotschacht und nachträglicher Ausweitung (beide Ausbruchphasen gelten als Vollausbruch)

Kavernen werden zumeist in Teilquerschnitten ausgebrochen.

Der tatsächliche Aufwand ist jedoch dabei von der „Bohrklasse“ bzw. „Abbauklasse“ und der „Sicherungsstufe“ abhängig. Diese Begriffe werden folgendermaßen beschrieben:

**Bohrklasse: TBM**

Klassierung des Baugrunds nach dem zu betreibenden Aufwand, um eine bestimmte Tunnelstrecke aufzufahren.

Die Bohrklassen werden projektspezifisch aufgrund der maßgebenden Gesteinskennwerten festgelegt. Die Kennwerte des Gebirges sind für die Penetration und den Verschleiß der Bohrwerkzeuge zu charakterisieren. Die Bestimmung vor Ort kann beispielsweise durch regelmäßige Penetrationsversuche bestimmt werden.

**Abbauklasse: MUF, SM**

Klassierung des Baugrundes nach dem erforderlichen Aufwand für den Abbau einer bestimmten Strecke mit mechanischen Mitteln.

Die Anzahl der Abbauklassen ist von den unterschiedlichen geologischen Formationen und den Gesteinskennwerten abhängig und wird deshalb projektspezifisch unterschieden. Die Bestimmung vor Ort sowie die dazu erforderlichen Versuche werden vorab festgelegt.

**Sicherungsstufe:**

Klassierung der Ausbruchsicherung nach Art, Menge und Einbauort der Maßnahmen.

- SK 1: Die Ausbruchsicherung verursacht eine unbedeutende Behinderung des Ausbruchs und hat somit geringen Einfluss auf die Vortriebsleistung.
- SK 2: Die Ausbruchsicherung verursacht eine leichte Behinderung des Ausbruchs und hat somit leichten Einfluss auf die Vortriebsleistung.
- SK 3: Die Ausbruchsicherung verursacht eine erhebliche Behinderung des Ausbruchs und hat somit erheblichen Einfluss auf die Vortriebsleistung.
- SK 4: Die Ausbruchsicherung verursacht eine starke Behinderung des Ausbruchs und hat somit starken Einfluss auf die Vortriebsleistung.
- SK 5: Die Ausbruchsicherung verursacht eine sehr starke Behinderung des Ausbruchs und hat somit sehr starken Einfluss auf die Vortriebsleistung.
- SK T: Die Behinderung des Tübbingeinbaus auf die Ausbrucharbeiten und somit der Einfluss auf Vortriebsleistung hängt vom Maschinen- und Tübbingkonzept ab.

Beim maschinenunterstützten Vortrieb im Lockergestein werden zumeist keine Sicherungsstufen unterschieden, da die Ausbruchsicherung nur sehr wenig variiert. Der Aufwand dabei hängt maßgeblich von der Ausbruchsart, der Neigung der Brust, der Art und Menge der Bruststützung und den systematischen Bauhilfsmaßnahmen ab. [22]

|                                      | Fels                |                       |                           | Lockergestein |                           |  |
|--------------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|---------------|---------------------------|--|
| Vortriebs-<br>verfahren              | SPV                 | TBM                   | MUF                       | MUL           | SM                        |  |
| Ausbruchart                          | A, B, C, D, E       | A                     | A, B, C, D, E             | A, B, C, D, E | A                         |  |
| Sicherungs-<br>klasse SK             | 1, 2, 3, 4, 5       | 1, 2, 3, 4, 5, T      | 1, 2, 3, 4, 5             | –             | T                         |  |
| Abbaubarkeit                         | –                   | Bohrklasse<br>X, Y, Z | Abbaubauklasse<br>X, Y, Z | –             | Abbaubauklasse<br>X, Y, Z |  |
| Brustneigung <sup>1)</sup>           | –                   | –                     | –                         | I, n          |                           |  |
| Bruststützung <sup>2)</sup>          | in SK enthalten     | –                     | in SK enthalten           | a, b, c       | a, b, c                   |  |
| Bauhilfsmass-<br>nahme <sup>3)</sup> | nicht<br>massgebend | nicht<br>massgebend   | nicht<br>massgebend       | Massnahme     | evtl.                     |  |

Abbildung 17: Gliederung der Ausbruchpositionen [22]

## 4.2 Deutschland

Die deutschen Standards werden vom „Deutschen Institut für Normung e. V.“, kurz DIN erstellt. Die wesentliche Norm für Untertagebauarbeiten ist die DIN 18312:2019-09 „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Untertagebauarbeiten“. Die erste Version dieser Norm stammte aus dem Jahre 1984 und umfasste 13 Seiten. Weitere Ausgaben kamen in den Jahren 1988, 1992, 1998, 2000, 2002, 2010, 2012, 2015, 2016 und schließlich die aktuell gültige Fassung aus dem Jahr 2019. Die wichtigste Norm zusätzlich zur DIN 18312 ist die „DIN 18299, VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen — Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) — Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art“. Die DIN 18312 verweist jedoch auf andere Normen, beispielsweise die DIN 1960 und DIN 1961 für Vergabe und Ausführungen von Bauleistungen sowie diversen geologischen und geotechnischen Regelwerken. Die aktuelle Fassung besteht aus 21 Seiten und beinhaltet Hinweise für das Aufstellen der Leistungsbeschreibung, Geltungsbereich, Stoffe und Bauteile, Ausführung, Nebenleistungen und besondere Leistungen sowie die Abrechnung.

In der DIN 18312 werden die Regelungen für konventionellen Vortrieb und für den mechanischen Vortrieb gemeinsam beschrieben. Der Geltungsbereich dieser Norm umfasst den Ausbruch und Abbau von Boden und Fels in geschlossener Bauweise sowie bei der Deckelbauweise. Sie regelt somit die Errichtung von Stollen, Tunnel, Kavernen, Schächten und ähnlichen Strukturen, die nicht primär für die Gewinnung von Bodenschätzen vorgesehen sind. Das Lösen, Laden und Fördern von Boden und Fels, die Sicherung des Hohlraumes unter Tage, das Fassen, Aufbereiten und Ableiten des Wassers bis zur zugewiesenen Einleitstelle sowie Sicherungsarbeiten zur endgültigen Auskleidung sind Teil des Geltungsbereiches. Außerdem gelten die Abschnitte 1 – 5 der ATV DIN 18299 „Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art“, wobei diese Norm bei Widersprüchen Nachrang hat. Explizit ausgeschlossen sind die Konstruktion von Brunnenarbeiten und Rohrvortriebsarbeiten, welche jeweils in den Normen

ATV DIN 18302 „Arbeiten zum Ausbau von Bohrungen“ und ATV DIN 18302 „Arbeiten zum Ausbau von Bohrungen“ beschrieben sind.

#### **4.2.1 DIN 18312**

Abschnitt 0 „Hinweise für das Aufstellen der Leistungsbeschreibung“ der DIN 18312 beschreibt ergänzend zur ATV DIN 18299 „Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art“ spezielle Angaben zur Baustelle, Ausführung, Abweichungen zur ATV, Nebenleistungen und besondere Leistungen sowie die Abrechnungseinheiten. Laut dieser Norm müssen bereits bei der Ausschreibung u.a. die gesamten Querschnitte aller Hohlräume (0.2.1), die Vortriebsklassen (0.2.12) sowie Vortriebs- und Ausbruchsart (0.2.14 – 0.2.16) bestimmt sein. Außerdem werden Boden und Fels bereits in der Ausschreibung beschrieben. Für das Benennen und Beschreiben wird auf andere gültige Normen verwiesen. Anschließend wird der Baugrund in Homogenbereiche eingeteilt. Die einzelnen Homogenbereiche können mehrere Boden- oder Felsschichten ausweisen, haben jedoch ähnliche Eigenschaften für den Abbau. Die Eigenschaften und Kennwerte werden inklusive der ermittelten Bandbreite folgendermaßen festgelegt:

Kennwerte für Boden:

- Ortsübliche Bezeichnung
- Korngrößenverteilung mit Körnungsbändern
- Massenanteil Steine, Blöcke und große Blöcke
- Feuchtdichte
- Undrainierte Scherfestigkeit
- Wassergehalt
- Plastizitätszahl
- Konsistenzzahl
- Bezogene Lagerungsdichte
- Abrasivität
- Bodengruppe

Ergänzende Kennwerte für Schildmaschinenvortrieb:

- Organischer Anteil
- Mineralogische Zusammensetzung der Steine und Blöcke
- Kohäsion
- Sensitivität

Kennwerte für Fels:

- Ortsübliche Bezeichnung
- Benennung von Fels
- Feuchtdichte
- Verwitterung und Veränderungen, Veränderlichkeit
- Einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins

- Trennflächenrichtung, Trennflächenabstand, Gesteinskörperform
- Öffnungsweite und Kluftfüllung von Trennflächen
- Abrasivität

Künstliche Böden, umweltrelevante Inhaltsstoffe und sonstige Stoffe müssen für die Einteilung der Homogenbereiche speziell berücksichtigt werden. [23]

Die Einteilung des Baugrunds für Untertagebauarbeiten in Deutschland wurde seit 2015 eingeführt und erfolgt nach den Vorgaben des geotechnischen Berichts gemäß DIN 4020. Insbesondere bei maschinellen Vortrieben im Lockergestein werden die homogenen Bereiche gemäß DIN 18312 und den aktuellen Empfehlungen des "Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen e.V." (DAUB) klassifiziert. Die Zuordnung zu einer bestimmten Vortriebsklasse erfolgt für jeden homogenen Bereich, der im geotechnischen Bericht definiert ist. Die Abrechnungseinheiten für den Ausbruch werden im Leistungsverzeichnis entweder als Raummaß ( $m^3$ ) oder als Längenmaß (m) für die vorherrschende Vortriebsklasse angegeben. Dabei müssen mögliche Veränderungen der Bodeneigenschaften und -zustände, die Existenz einer "gemischten Ortsbrust" mit unterschiedlichen geologischen Schichten sowie verschiedene umwelttechnische Aspekte berücksichtigt werden. [24]

#### 4.2.2 Ausführung

Der AG bestimmt mittels den Vortriebsklassen das Bauverfahren. Innerhalb dieser Vortriebsklassen entscheidet der AN selbst, welche Baugeräte er benützt und wie er den Bauablauf gestaltet. Bei Antreffen von Hindernissen, Hohlräumen und Gefahren ist dem AG sofort Bescheid zugeben. Handelt es sich beim Hindernis um ein Kampfmittel, so sind die Arbeiten unverzüglich einzustellen. Bei Gefahr von Verbrüchen, Ausfließen von Boden, Verlust von Stützflüssigkeit, Sohlhebungen, Wassereinbrüchen, Schäden an baulichen Anlagen, etc. müssen sofort Gegenmaßnahmen zur Schadensminimierung getroffen werden.

In der DIN 18312 sind die Vortriebsklassen für den konventionellen Vortrieb und mechanischen Vortrieb beschrieben. Für den mechanischen Vortrieb werden die Vortriebe mit Tunnelbohrmaschinen, Schildmaschinen im Vollschnittabbau und Schildmaschinen im Teilschnittabbau unterschieden.

TBM-Vortrieb:

Ausbruch mittels Bohrkopf bei gleichzeitiger Förderung

- Vortriebsklasse TBM1 – Vortrieb ohne Sicherung
- Vortriebsklasse TBM 2 – Ausbruch mit einer Sicherung, deren Einbau das Lösen nicht behindert
- Vortriebsklasse TBM 3 – Ausbruch mit einer Sicherung, deren Einbau das Lösen behindert
- Vortriebsklasse TBM 4 – Ausbruch mit einer Sicherung, für deren Einbau das Lösen unterbrochen werden muss

SM-Vortrieb im Vollschnittabbau:

Ausbruch mittels Schneidrad bei gleichzeitiger Förderung. Der Einbau der Sicherung erfolgt innerhalb der Schildmaschine. Die Stützung der Ortsbrust hat entsprechend dem vorgegebenen Verfahren zu erfolgen.

- Vortriebsklasse VS1 – Ausbruch ohne Stützung der Ortsbrust
- Vortriebsklasse VS 2 – Ausbruch mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust
- Vortriebsklasse VS 3 – Ausbruch mit erddruckgestützter Ortsbrust

SM-Vortrieb im Teilschnittabbau:

Ausbruch mittels Bagger, Fräse, Bohrkopf, Düsenstrahl oder in Kombination dieser Verfahren in Teilquerschnitten. Die Sicherung der Leibung hat innerhalb der Schildmaschine und die Sicherung der Ortsbrust entsprechend der vorgegebenen tunnelbautechnischen Planung zu erfolgen.

- Vortriebsklasse TS 1 – Ausbruch ohne Sicherung der Ortsbrust
- Vortriebsklasse TS 2 – Ausbruch mit einer Sicherung der Ortsbrust

Der Vortrieb umfasst dabei Ausbruchs- und Sicherungsarbeiten. Teil des Ausbruches sind das Lösen und die Aufteilung des Ausbruchquerschnittes in Bezug auf die Homogenbereiche. Zu den Sicherungen gehören die Art, Abfolge des Einbaus, Lage, Anzahl und Dimension der Sicherungsmittel. Die Wahl der Sicherungsmittel liegt im Entscheidungsbereich des Auftragnehmers, sofern die Art und Umfang der Sicherung den Vorgaben der jeweiligen Vortriebsklassen entsprechen. Das Fördern, wobei das Förderverfahren und die Förderwege vom AN bestimmt werden, das Fassen und Ableiten von Wasser sowie das Verfüllen von Hohlräumen sind ebenfalls noch Bestandteil der Ausführung. Mehrausbrüche werden zwischen vermeidbar und nicht vermeidbar unterschieden. Mehrausbrüche zwischen den Ausbruchstoleranzen und vermeidbare Mehrausbrüche werden kraftschlüssig verfüllt und für die Abrechnung unberücksichtigt. Hohlräume, die entweder angetroffen wurden oder durch einen nicht vermeidbaren Mehrausbruch entstanden sind, werden soweit notwendig verfüllt und gemäß dem Abschnitt 4.2.1 „Besondere Leistungen“ vergütet. [23]

### 4.2.3 Abrechnung

Die Abrechnung erfolgt auf Grundlage der DIN 18299 mit speziellen Ergänzungen. In der DIN 18299 wird die Abrechnung folgendermaßen definiert:

„Die Leistung ist aus Zeichnungen oder Modellen zu ermitteln, soweit die ausgeführte Leistung diesen Zeichnungen oder Modellen entspricht. Sind solche Zeichnungen oder Modelle nicht vorhanden, ist die Leistung aufzumessen.“ [25]

Die Ergänzungen enthalten Maß- und Mengenermittlungen, wobei für die Ermittlung der Wasser- und Ausbruchsmengen Näherungsverfahren zulässig sind. Betonsicherungen, Maschendraht, Betonstahlmatten sowie Verzugs- und Getriebedielen werden nach Flächenmaß, Tübbing nach Längenmaß und die Verfüllung von Hohlräumen nach Aufmaß gerechnet. Stahlbauteile hingegen werden nach der errechneten Masse vergütet, wobei Überlappungen, Sicken, Rippen oder Aufbiegungen nicht gerechnet werden. [23]

#### 4.2.4 Risikoordnung

In der DIN 18312 werden keine Risikoordnungen beschrieben. Anhand der DIN 1960 „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil A: Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen“ ist jedoch eine eindeutige und möglichst präzise Leistungsbeschreibung vom AG zu erstellen und diese dem AN zu übermitteln. Etwaige Mängel und Fehler fallen in den Risikobereich des Auftraggebers. Das Baugrundrisiko obliegt ebenfalls dem AG, da er den Baugrund dem AN lediglich zur Verfügung stellt. Bei erheblichen Änderungen des tatsächlichen Gebirges hat der AN Anspruch auf eine angemessene Vergütung. Das Kalkulationsrisiko hingegen trägt zur Gänze der Auftragnehmer. [26]

Laut DIN 1961 „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil B: Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen“ fallen kleine Mengenänderungen grundsätzlich in den Risikobereich des Auftragnehmers. Die Einheitspreise werden erst ab einer Abweichung von 10 % der tatsächlichen Mengen gegenüber der ausgeschriebenen Mengen neu berechnet. Ab dieser Grenze übernimmt der AG das Risiko. Außerdem obliegen Ausführungsbehinderungen durch verspätete Vorunternehmerleistungen, außergewöhnliche Witterungsverhältnisse, fehlende Genehmigungen sowie das Verlangen geänderter bzw. zusätzlicher Leistungen in der Risikosphäre des AG. [27]

#### 4.2.5 Tunnelentwurf

Im Bereich des Tunnelentwurfs dagegen existiert in Deutschland keine einheitliche technische Norm. Stattdessen werden die Entwurfsrichtlinien maßgeblich von kundenspezifischen technischen Regelwerken beeinflusst, die von den Straßen- und Eisenbahnbehörden festgelegt werden. Diese individuellen Regeln greifen in der Regel auf Teile des Eurocodes zurück, um die konkreten Anforderungen zu definieren und sicherzustellen. [28]

### 4.3 Italien – Südtirol

#### 4.3.1 Italien

In Italien erfolgt der Entwurf von Tunnelbauwerken gemäß allgemeinen Kriterien und unter Verwendung des Teilsicherheitskonzepts der EN 1997 "Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik". Obwohl Tunnel in der EN 1997 nicht ausdrücklich genannt sind, fallen sie dennoch in die geotechnische Kategorie 3. Für den Entwurf von Betonstrukturen wird die EN 1992 herangezogen. Der italienische technische Baustandard "DM 17/01/18" legt für alle Bauwerke, einschließlich geotechnischer und unterirdischer Strukturen, die allgemeinen Regeln und Leistungen der Eurocodes fest. Dennoch gibt es einige Aspekte des Tunnelentwurfs, die nicht von nationalen Standards abgedeckt sind, hierbei müssen internationale Leitlinien und Empfehlungen als Referenz herangezogen werden. Die "Società Italiana Gallerie (SIG)" hat Richtlinien veröffentlicht, die als "Italian Guidelines for Design,

Tendering and Construction on Underground Works" bekannt sind und sowohl für den Tunnelentwurf als auch für die Bauausführung dienen. [28]

Die nationalen Standards in Italien werden von der „Ente Nazionale Italiano di Unificazione“ (UNI) entwickelt und veröffentlicht. Die UNI ist ein privater, nicht profit-orientierter Verband, welcher seit 1921 gegründet wurde und bisher über 48.000 Standards publizierte.

UNI veröffentlichte beispielsweise die Normen UNI EN 16191 „Tunnel machinery – Safety requirements“, UNI 11095 „Light and lighting – Road tunnel lighting“, UNI EN 16228-1 „Drilling and foundation equipment – Safety – Part 1: “Common requirements“, UNI EN 16228-2 „Drilling and foundation equipment – Safety – Part 2: Mobile drill rigs for civil and geotechnical engineering, quarrying and mining“ und diverse Standards für die geotechnische Erkundung und Untersuchung, jedoch gibt es keine Ausführungsnorm für Tunnelbauwerke. [29]

### **4.3.2 Autonome Provinz Bozen - Südtirol**

#### **4.3.2.1 Allgemeine Technische Vertragsbestimmungen 2019 (ATV 2019)**

Für die Autonome Provinz Bozen – Südtirol gibt es eine Allgemeine Technische Vertragsbestimmung (ATV) für öffentliche Bauarbeiten, welche als Grundregelung für die Durchführung und die Abrechnung der Arbeiten gilt. Die ATV enthält die Abschnitte Hinweise für die Erstellung des Projektes, Anwendungsbereich, Stoffe und Bauteile, Ausführung, Nebenleistungen und besondere Leistungen sowie Abrechnung. Der Geltungsbereich der ATV „Untertagebauarbeiten mit kontinuierlichem Vortrieb“ umfasst das Herstellen unterirdischer Hohlräume wie beispielsweise Stollen, Tunnel, u. Ä. in Boden und Fels in bergmännischer Bauweise mit Tunnelvortriebsmaschinen, jedoch unabhängig vom Verwendungszweck. Der Vortrieb umfasst die zwei Arbeitsschritte *Ausbruch*, bestehend aus Lösen, Aufladen, Abtransportieren innerhalb einer festgelegten Distanz, Abladen und befahrbare Ausplanieren des Ausbruchmaterials, sowie *Sicherung* des Hohlraumes. Explizit ausgenommen sind Verbauarbeiten außerhalb der unterirdischen Hohlräume, Leistungen im Zusammenhang mit dem Anschlagen des Untertagebaues (ausgenommen der Sicherung mit Spritzbeton und Anker), Brunnenbauarbeiten, Rohrvortriebsarbeiten, Untertagebauarbeiten im zyklischen Vortrieb und das Herstellen von Schächten im Raise-Boring Verfahren. Sofern keine dedizierten Regelungen in der ATV für „Untertagebauarbeiten mit kontinuierlichem Vortrieb“ vorhanden sind, gilt die ATV für Untertagebauarbeiten ebenfalls nicht für Erdarbeiten, Wasserhaltungsarbeiten, Einpressarbeiten, Spritzbetonarbeiten sowie Beton- und Stahlbetonarbeiten. Ergänzt wird diese ATV durch die ATV „Allgemeinen Regelungen für Bauarbeiten jeder Art“ mit den Abschnitten 1 – 5. Im Fall von Widersprüchen zwischen den beiden Allgemeinen Technischen Vertragsbedingungen gelten die Regelungen der ATV „Untertagebauarbeiten mit kontinuierlichem Vortrieb“. Da international noch keine einheitlichen Definitionen und Klassifizierungen von Tunnelvortriebsmaschinen vorhanden sind, gelten für die ATV die Begriffe nach ÖNORM B 2203-2, Abschnitt 3.

| Begriffe nach<br>ÖNORM B 2203-2        | Italienische Begriffe                | Internationale Begriffe      |
|----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| TVM (Tunnelvortriebsmaschinen)         | Frese                                | TM (Tunneling Machines)      |
| TBM (Tunnelbohrmaschinen)              | TBM (frese a piena sezione)          | TBM (Tunnel Boring Machines) |
| TBM-O (offene TBM)                     | TBM aperte                           | Unshielded TBM               |
| TBM-A (TBM mit<br>Aufweitungsbohrkopf) | TBM con possibilità di<br>sovrascavo | TBM with overboring          |
| SM (Schildmaschinen)                   | Frese scudate                        | Shielded Machines            |
| TBM-S (TBM mit Einfachschild)          | TBM monoscudate                      | SS-TBM (Single Shielded TBM) |
| TBM-DS (TBM mit Doppelschild)          | TBM doppioscudate                    | DS-TBM(Double Shielded TBM)  |

Abbildung 18: Begriffe für Tunnelvortriebsmaschinen – Vergleich [30]

In den Hinweisen für die Erstellung des Projektes werden die Form und Fläche des Hohlraumquerschnitts sowie der Nominale Bohrdurchmesser verlangt, soweit sie nicht dem Auftragnehmer überlassen bleiben. In der Ausschreibung müssen die Eigenschaften von Boden und Fels und deren Löseverhalten sowie die hydrogeologischen Verhältnisse beschrieben sein und darauf aufbauend werden die jeweiligen Vortriebsklassen mit Art und Umfang der Sicherung festgelegt. Bei der Ausschreibung werden vom AG der Maschinentyp und maschinentechnische Mindestanforderungen vorgegeben, hierbei sind jedoch auf die Mindestanforderungen der RVS 9.251 zu beachten. Für den Einbauort der Stützmittel beziehungsweise Tübbinge und Sohlausbau wird in der hierbei auf die Mindestanforderungen der ÖNORM B 2203-2, Anhang A verwiesen.

Grundsätzlich können die Regelungen auch anders gestaltet werden, diese müssen aber in der Leistungsbeschreibung eindeutig und im Einzelnen gekennzeichnet sein. Mögliche Abweichungen können sein:

- wenn der Bauablauf oder die Art und der Einsatz der Baugeräte dem Auftragnehmer vorgegeben werden sollen
- wenn loses Gestein belassen werden soll
- wenn die Wahl der Förderwege und –verfahren dem Auftragnehmer nicht überlassen bleiben soll
- wenn die üblichen Näherungsverfahren bei der Mengenermittlung nicht zulässig sein sollen
- wenn bei Abrechnung nach Masse die Ermittlung durch Wiegen festgelegt werden soll
- wenn die Ermittlung der Ausbruchmengen nicht getrennt nach Vortriebsklassen, sondern unter Aufgliederung oder Zusammenfassung von Vortriebsklassen erfolgen soll
- wenn Hohlräume, z. B. vorhandener Probestollen, nicht übermessen werden sollen
- wenn die Verfüllung von Hohlräumen nicht durch Aufmaß ermittelt werden soll, sondern z. B. nach Materialverbrauch.

#### 4.3.2.2 Gebirgsbeschreibung

Die Klassifikation der Gebirgsarten ist nicht streng vorgeschrieben, es muss sich lediglich um ein allgemein anerkanntes System handeln. Das Gebirge wird dabei als Teil des Untergrundes definiert, bestehend aus Fest- und Lockergestein inklusive der Anisotropien, Trennflächen und Hohlräume mit Füllungen. Beispiele für allgemein anerkannte Klassifikationssysteme sind:

- ÖGG – Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb
- Bieniawski (RMR-Rock Mass Rating)
- Barton (Q-System)
- ISRM [ISRM - International Society for Rock Mechanics] Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring

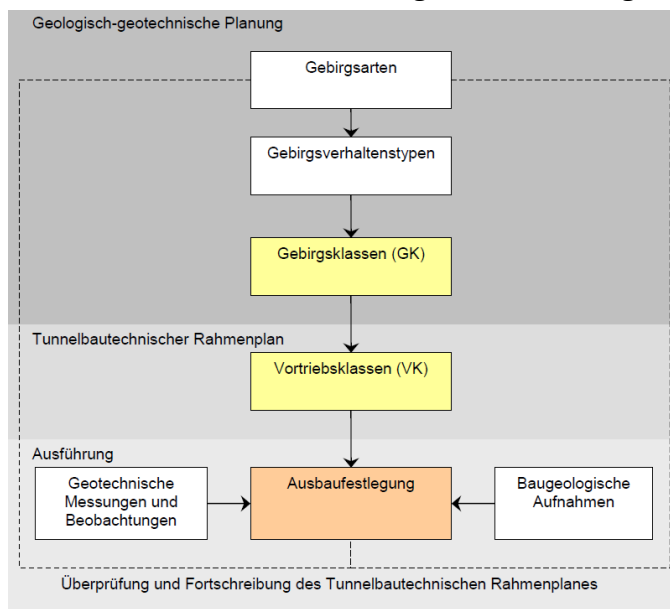


Abbildung 19: Ablauf bis zur Ausbaufestlegung [30]

Zu Beginn werden in der ATV auf Basis der geomechanischen Parameter die Gebirgsarten bestimmt. Diese ergeben unter Berücksichtigung von Primärspannungen, Bergwasserverhältnisse, Trennflächen sowie Form und Lage des Bauwerkes die jeweiligen Gebirgsverhaltenstypen (GVT). Für die Gebirgsverhaltenstypen sind das Verhalten des Gebirges bezüglich Ausbruch, zeitliche und räumliche Verformung und Versagensform ausschlaggebend. Aufgrund dessen werden anschließend die Gebirgsklassen eingeteilt.

Die Gebirgsklassen sind folgendermaßen eingeteilt:

- Klasse A - Standfestes bis gebräches Gebirge
- Klasse B - Gebräches Gebirge
- Klasse C - Druckhaftes Gebirge
- Klasse D - Kurzfristig standfestes Fest- und Lockergestein
- Klasse E - Fließendes Fest- und Lockergestein
- Klasse F - Mixed-Face-Bedingungen (heterogene Brust)

### 4.3.2.3 Vortriebsklassen

Für jede Gebirgsklasse werden die bautechnischen Maßnahmen festgelegt und die Vortriebsklassen für das Projekt definiert. Die erforderlichen Sicherungs- und Stützmaßnahmen jeder Vortriebsklasse mitsamt allen notwendigen Angaben und Festlegungen werden im Sicherungs- und Stützplänen festgehalten. Die Vortriebsklassen werden für den TBM-Vortrieb und den SM-Vortrieb getrennt festgelegt.

Kontinuierlicher Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen:

- Vortriebsklasse VF1  
Behinderung des Vortriebes: keine  
Stützmaßnahmen: nur vereinzelt Anker, nachlaufend
- Vortriebsklasse VF2  
Behinderung des Vortriebes: keine  
Stützmaßnahmen: vereinzelt Anker, Spritzbeton, Baustahlgitter, nachlaufend
- Vortriebsklasse VF3  
Behinderung des Vortriebes: keine, aber Pausen zwischen den Hübten  
Stützmaßnahmen: Anker, Spritzbeton, Baustahlgitter, gegenüber VF2 in erhöhtem Ausmaß aber noch nachlaufend
- Vortriebsklasse VF4  
Behinderung des Vortriebes: teilweise Behinderung des Vortriebes, Pausen auch während eines Hubes möglich  
Stützmaßnahmen: Anker häufiger und länger als bei VF3, Spritzbeton, Baustahlgitter, Ausbaubögen, schon im Maschinenbereich eingebracht
- Vortriebsklasse VF5  
Behinderung des Vortriebes: starke Behinderung durch oftmaligen Stillstand der TBM während eines Hubes  
Stützmaßnahmen: Anker häufiger und länger als bei VF4, Spritzbeton stärker als bei VF4, Baustahlgitter, Ausbaubögen im Maschinenbereich, auch unmittelbar hinter dem Bohrkopf, eingebracht
- Vortriebsklasse VF6  
Behinderung des Vortriebes: sehr starke Behinderung durch systematischen Stillstand der TBM und gegebenenfalls Rückziehen und Wiedervorfahren des Bohrkopfes während eines Hubes  
Stützmaßnahmen: Anker dicht gesetzt, Spritzbeton und Baustahlgitter, Ausbaubögen bereits im Bohrkopfbereich eingebaut

Kontinuierlicher Vortrieb mit Schildmaschinen:

- Vortriebsklasse VS1: Ausbruch ohne Stützung der Ortsbrust
- Vortriebsklasse VS2: Ausbruch mit teilgestützter Ortsbrust
- Vortriebsklasse VS3: Ausbruch mit vollgestützter Ortsbrust

In der Ausbaufestlegung sind Ausbruch und Stützung einvernehmlich festgelegt und sind somit die Grundlage der Abrechnung. Die Ausbaufestlegung ist abhängig von den tatsächlichen geologischen Verhältnisse, der Messungen und Beobachtungen sowie des Verhaltens des Gebirges.

#### **4.3.2.4 Ausführung**

Grundsätzlich gilt, dass der AN für die Wahl der eingesetzten Baugeräte innerhalb der Vortriebsklasse verantwortlich ist. Bei Antreffen von unvermuteten Hindernissen ist der AG sofort in Kenntnis zu setzen. Bei Gefahr von Verbrüchen, Ausfließen von Boden, Sohlhebungen, Wassereinbrüchen, Schäden an baulichen Anlagen, etc. sind sofort Gegenmaßnahmen zur Schadensminimierung umzusetzen und den AG unverzüglich mitzuteilen. Sofern der Schaden nicht vom AN verursacht wurde, werden die getroffenen Maßnahmen gemäß den besonderen Leistungen vergütet. Die Maßnahmen bei nicht vermeidbaren Mehrausbrüchen über der Ausbruchtoleranz sind ebenfalls als besondere Leistungen auszubezahlen. Art und Umfang der Sicherung sind durch die Festlegungen der einzelnen Vortriebsklassen festgelegt, die genau Wahl der Umsetzung bleibt dem AN überlassen, vermeidbare Mehrausbrüche müssen jedoch vermieden werden. Die Regelstützmaßnahmen der Ausbaufestlegungen werden einvernehmlich zwischen AG und AN vereinbart, bei Meinungsverschiedenheiten entscheidet letztendlich der AG, der AN kann seine Einwände jedoch innerhalb 24 Stunden schriftlich begründen. Eine weitere Vergütung der besonderen Leistungen stellen beispielsweise die Mehrleistungen bei der Überschreitung der Grenzwassermenge dar.

#### **4.3.2.5 Abrechnung**

Allgemein gilt, dass für die Mengenermittlung übliche Näherungsverfahren zulässig sind, für die Massenermittlung sind die errechneten Massen maßgebend. Übergreifungen von Bewehrungen, Zubehör von Tunnelausbaubögen, wie beispielsweise Schlösser, Abstandhalter, Schrauben, etc. werden dabei nicht berücksichtigt. Tübbinge werden getrennt nach Tübbingtypen und -arten entlang der Längsachse des Bauwerkes berechnet. Verfüllungen von angetroffenen Hohlräumen werden nach Aufmaß vergütet, wobei Öffnungen, Nischen und Aussparungen bis 0,25 m<sup>3</sup> Einzelgröße übermessen werden. Die Ausmaßfeststellung des Innenschalenbetons wird nach Raummaß berechnet. [30]

## **4.4 Norwegen**

### **4.4.1 Geschichte**

Die Anfänge des unterirdischen Bauwesens in Norwegen reichen etwa 300 Jahre zurück und hatten ihren Ursprung im Mineralienbergbau. Die Verträge waren damals sehr selten, unausgewogen und dienten den Behörden. Im Jahr 1854 wurde die erste Eisenbahnstrecke Norwegens eröffnet, welche sich über 64 Kilometer von Oslo nach Eidsvold erstreckte. Das

Projekt wurde privat initiiert, von Investoren finanziert und an einen ausländischen Bauunternehmer mittels eines sogenannten "schlüselfertigen" Vertrags vergeben. Diese Strecke beinhaltete zwei Tunnel, welche dabei als kleine Hindernisse galten.

Im Jahr 1890 beschloss das norwegische Parlament, dass staatliche Aufträge auf Ausschreibungen basieren sollten. Noch im selben Jahr präsentierte die norwegische Polytechnische Gesellschaft die ersten standardisierten Vertragsdokumente. Es dauerte jedoch bis 1923, bis der Norwegische Normungsverein gegründet wurde, der heute das alleinige Recht zur Herausgabe der norwegischen Standards (NS) hat.

Die Bereiche Straßenbau und Eisenbahnen waren historisch von staatlichen Organisationen dominiert, die ihre internen Ressourcen für Bau, Wartung und Betrieb einsetzten. Nationale Infrastrukturprojekte wurden oft ohne Ausschreibungen und Verträge nur mittels Budgetzuweisungen umgesetzt und nach den tatsächlichen Kosten vergütet. Ein Beispiel für eine Ausnahme von dieser Praxis ist der 5311 Meter lange Gravhalsen-Tunnel, der Teil der 500 Kilometer langen Bahnstrecke "Bergensbanen" zwischen Oslo und Bergen ist und 1909 eröffnet wurde. Obwohl die damaligen Vertragsbedingungen ungünstig waren, mit widrigen klimatischen Bedingungen, begrenzten geologischen Informationen und ohne Risikoteilung oder Preissteigerungsklauseln, akzeptierte ein Auftragnehmer einen Festpreisvertrag. Der AN musste dabei finanzielle Verluste hinnehmen, jedoch gewann er reichlich an wertvoller Erfahrungen.

Bis zum Jahr 1911 waren Projekte im Wasserbau in Norwegen weitgehend unreguliert. Danach begannen Gemeinden und private Unternehmen, Ausschreibungen für solche Projekte durchzuführen, während staatliche Projekte weiterhin mit den eigenen Ressourcen umgesetzt wurden.

Aktuell ist Norwegen nicht Teil der Europäischen Union, ist jedoch über Abkommen mit dem europäischen Wirtschaftsraum stark vernetzt. Viele Gesetze, Verträge, Ausschreibungsverfahren und Diskriminierungsbestimmungen entsprechen den Standards der EU. Die Grundsätze der Eurocodes werden ebenfalls in den norwegischen Normen übernommen. Bei Verträgen, an denen öffentliche Einrichtungen beteiligt sind, kommt das norwegische Gesetz über öffentliche Beschaffung zur Anwendung, ergänzt um zusätzliche Bestimmungen und Anhänge.

Im Wasserkraftsektor ist die norwegische Wasserwirtschafts- und Energiebehörde (NVE) für Vorschriften und Genehmigungen zuständig, während das norwegische Energieunternehmen Statkraft etwa 40% der installierten Kapazität in Norwegen besitzt und betreibt.

Die norwegische Straßenbauverwaltung ist für die Planung, den Bau und den Betrieb des Straßennetzes verantwortlich. Die meisten Bauarbeiten werden jedoch durch Ausschreibungen und Verträgen an öffentliche Unternehmen vergeben. Die Norwegische Nationale Eisenbahnverwaltung verwaltet das nationale Schienennetz auf der Grundlage von Ausschreibungen und Verträgen.

Der Großteil der unterirdischen Bauarbeiten umfasst Tunnelbauten für Autobahnen, Eisenbahnen, Wasserkraftprojekte und für die Mineralölindustrie. Seit 1971 veröffentlicht die

norwegische Gesellschaft für Tunnelbau (NFF) jährliche Statistiken über die aktuellen Marktanteile.

Aufgrund des politischen Systems sind staatliche Projekte von jährlichen Budgetzuweisungen abhängig, was zu zahlreichen kleineren und mittelgroßen Projekten führt. Die Erfahrungen der letzten Jahrzehnte deuten jedoch darauf hin, dass dieses etablierte System überdacht werden sollte. [31]

#### 4.4.2 Das norwegische Vertragsmodell

In Norwegen liegt in den meisten Fällen ein sehr hartes Gestein vor, welches lediglich in einem Bereich von 3 bis 10 Prozent mit Beton oder Spritzbeton verkleidet werden muss. Allerdings gibt es vereinzelt Tunnelprojekte, bei denen die geologischen Bedingungen äußerst anspruchsvoll sind. In solchen Fällen kann es erforderlich sein, bis zu 80 Prozent der Tunnelauskleidung vorzunehmen. Daher wurde in etwa den 1970er Jahren ein innovatives Vertragsmodell für den Tunnelbau in Norwegen eingeführt. Dieses Modell brachte eine Neugestaltung der Risikozuordnung mit sich. Mithilfe dieses neuen Systems konnten die Risiko- und Verantwortungsbereiche zwischen den Auftragnehmern und den Auftraggebern flexibler gestaltet werden. In Norwegen ist gegenwärtig das Einheitspreissystem mit variablen Mengen weit verbreitet, was es ermöglicht, auf die jeweiligen Bedingungen und Anforderungen der Tunnelbauprojekte besser einzugehen.

Die Risikoverteilung für die Dauer der Bauausführung basiert dabei auf dem Konzept der „zeitlichen Äquivalente“. Dies bedeutet, dass bei unerwarteten Veränderungen der geologischen Bedingungen die Arbeiten in zeitliche Einheiten umgewandelt werden können, wodurch sowohl die Bauzeit als auch die Kosten vertraglich geregelt sind.

Die Formel zur Berechnung der zeitlichen Äquivalente umfasst die folgenden Komponenten:

- Einheitliche Preise für alle möglichen Arten von Felsstützmaßnahmen, die eventuell erforderlich sind. Im Leistungsverzeichnis sind separate Positionen für jede dieser Maßnahmen vorgesehen.
- Zeitliche Parameter für zusätzliche Arbeiten, die sich negativ auf den Baufortschritt auswirken. Diese Parameter berücksichtigen die Dauer der jeweiligen Arbeiten. Es wird dabei unterschieden, ob diese Arbeiten zu einem frühen Zeitpunkt durchgeführt werden müssen, was den Baufortschritt erheblich beeinträchtigen würde, oder ob die Sicherungsmaßnahmen zu einem späteren Zeitpunkt ausgeführt werden können, wodurch die Vortriebsleistung nur geringfügig beeinflusst wird. Daher werden zwei verschiedene Zeitparameter festgelegt.
- Festlegungen zur Anpassung der vertraglichen Bauzeit an die tatsächlichen Bodenbedingungen.

Ein unabhängiger Berater spielt eine entscheidende Rolle bei der Vorhersage der geologischen Verhältnisse und bei der Bewertung der Umwandlungsparameter für zeitliche Äquivalente. Dieser Berater ist verantwortlich für die Erstellung von Referenz-Bodenbedingungen und die Festlegung der Zeitparameter. [32]

### 4.4.3 Risikoverteilung

In den Einheitspreisverträgen werden zwei wesentliche Risikofaktoren berücksichtigt, nämlich Bodenverhältnisse und Leistung.

**Bodenverhältnisse:** In Bezug auf die Bodenverhältnisse stellt der Bauherr den Baugrund zur Verfügung und trägt daher die Verantwortung für die Beschaffenheit des Bodens. Er ist für die Bodenerkundung verantwortlich und muss eine präzise Prognose erstellen. Sollten sich die geologischen Bedingungen anders herausstellen als vorhergesagt, liegt dieses Risiko im Verantwortungsbereich des Bauherrn.

**Leistung:** Der Auftragnehmer übernimmt die Verantwortung für eine effiziente Bauausführung innerhalb des prognostizierten Rahmens. Er wird entsprechend der Einheitspreise für die ausgeführten Arbeiten vergütet. Die Bauzeit kann auf Grundlage von "Standardkapazitäten" oder "zeitlichen Äquivalenten" für verschiedene Arbeitsaktivitäten angepasst werden.

Dieses System erfordert, dass zum Zeitpunkt der Ausschreibung die genauen geologischen Bedingungen bekannt sind, da der Preis auf der Grundlage dieser Prognosen kalkuliert wird. Tritt der Fall ein, dass die tatsächlichen Bodenverhältnisse schlechter sind als erwartet, trägt der Bauherr die Verantwortung für die zusätzlichen Kosten. Bei günstigeren Bodenverhältnissen kann er jedoch auch finanziell profitieren. Der Auftragnehmer muss lediglich sicherstellen, dass seine Arbeiten innerhalb der kalkulierten Zeitäquivalente abgeschlossen werden, um keine Strafen zahlen zu müssen. Gleichzeitig kann der AN jedoch auch Kosten einsparen, wenn er schneller und effizienter arbeitet als kalkuliert.

Die Zahlungen erfolgen entsprechend der tatsächlich durchgeführten Arbeiten und der Anpassung der Bauzeit. Dieses System stellt gewissermaßen eine Art Zeitbilanz dar. Es funktioniert effektiv, wenn sämtliche Leistungen mithilfe der vorgesehenen Zeitäquivalente abgedeckt sind. Allerdings kann es zu Herausforderungen führen, wenn unvorhersehbare geologische Störungen auftreten, die spezielle Arbeitsmaßnahmen erfordern.

Zu den charakteristischen Merkmalen eines Einheitspreisvertrages gehören ein umfassender geologischer/geotechnischer Bericht, ein detailliertes Mengenverzeichnis, die Möglichkeit von Mengenänderungen sowie die Festlegung von Standardkapazitäten bzw. Zeitäquivalenten.

Eine Zeitanpassung bei geänderten Mengen kann beispielsweise folgendermaßen aussehen:

Manuelles Abtragen: 1 h / m<sup>2</sup>

Bolzen bis zu 5 m Länge: 12 Bolzen / h

Spritzbeton: 6 m<sup>3</sup> / h

Ortsbeton-Auskleidung: 0,1 m / h

Erkundungsbohrungen und Vorabgründungen: 60 m / h [33]

#### 4.4.4 Nationaler Standard NS 3420

Die norwegische Norm NS 3420 stellt einen entscheidenden Standard im Bereich des Tunnelbaus in Norwegen dar. Sie dient nicht nur als Grundlage für die Umsetzung von Ausschreibungsunterlagen anhand des Einheitspreissystems, sondern kann auch für Kostenschätzungen, Berechnungen und Qualitätskontrollen während der Bauausführung herangezogen werden. Da die meisten Untertage-Bauverträge in Norwegen auf Basis von Einheitspreisverträgen ausgeschrieben werden, ist die NS 3420 von besonderer Bedeutung. Sie bildet das Gerüst für die mengenbezogenen Positionen in den Ausschreibungsunterlagen, die anschließend vom Auftragnehmer kalkuliert werden. Die Positionen sind im Hinblick auf ihren Umfang und Inhalt genau definiert, wobei die Anforderungen bezüglich Material, Ausführung, Toleranzen, Prüfung und Kontrolle für jede Position festgelegt sind. Die Struktur der NS 3420 ist hierarchisch aufgebaut, wobei die Anforderungen der höheren Ebenen auch für die untergeordneten Ebenen gelten. Der erste Teil, der die Allgemeinen Bedingungen regelt, ist für sämtliche technischen Teile der Norm gültig.

Die Norm NS 3420 besteht insgesamt aus 25 Teilen, wobei fünf davon den allgemeinen Teilen angehören. Die verbleibenden Teile sind spezifischen technischen Themen gewidmet. Im Kontext des Untertagebaus sind insbesondere die folgenden Teile von Relevanz:

- Teil 1: Allgemeine Bedingungen  
mit Anforderungen, die für alle Teile gelten
- Teil A: Vorbereitungen und allgemeine Bestimmungen  
Positionen für Versicherungen, Planung, Einrichtung, Betrieb und Wiederherstellung der Baustelleneinrichtung
- Teil F: Erdarbeiten – Teil 1  
Positionen für Sprengung, Abladen, Transport, Gebirgssicherung, etc.
- Teil G: Erdarbeiten – Teil 2  
Positionen für komplexe geotechnische Arbeiten wie z.B. TBM-Bohrungen, Anker, Verpressungen, Bohren von Mikrotunnel, etc.
- Teil L: Betonarbeiten  
Positionen für Ortsbeton und Spritzbeton

Die NS 3420 enthält standardisierte Anforderungen und hilft damit den Auftraggeber, seine Anforderungen auf ein akzeptables Qualitätsniveau festzulegen und dieses bei Bedarf zu erhöhen. Damit kann der Standard an die spezifischen Anforderungen jedes Projektes individuell angepasst werden.

Teil 1 – Allgemeine Bedingungen enthalten folgende relevante Inhalte:

- Die abgeschlossenen Elemente, Komponenten oder Arbeiten müssen ausgeführt, montiert, angeschlossen, getestet, kalibriert und einsatzbereit sein.
- Die Preise müssen Lieferung von Material, Zubehörmaterialien, Lohnkosten, Sozialleistungen, Werkzeuge, Maschinen, Gerüste, mobile Kräne, Aufzüge, Verwaltungskosten und Gewinn enthalten.

- Die vom Auftraggeber gewählten Materialien müssen an die Basis, die Montage, die angrenzenden Konstruktionen und die Anforderungen des fertigen Produktes angepasst werden. Die Materialien müssen zusätzlich langlebig sein sowie die erwarteten klimatischen Bedingungen, Beanspruchungen und den Verschleiß während der Verwendung standhalten.
- Die Materialien müssen unbeschädigt und fehlerfrei sein. Sie müssen so transportiert, gehandhabt und gelagert werden, dass das fertige Produkt nicht beeinträchtigt wird.
- Der Auftragnehmer muss über die erforderliche Kompetenz und Ausrüstung verfügen, um den Vertrag zu erfüllen.
- Die Produkte müssen die erforderliche Funktion bezüglich Verwendung, Umwelt und Wartung erfüllen.
- Technische Lösungen oder Ausführungsmethoden, die vom Auftragnehmer gewählt werden, müssen der erforderlichen Funktion oder Leistung entsprechen und sie müssen unter den erwarteten klimatischen Bedingungen, Beanspruchungen und dem Verschleiß während der Verwendung realisierbar und langlebig sein.
- Die Montage erfolgt gemäß den Beschreibungen der Hersteller/Lieferanten.

Dies ist eine Übersicht über einige der Positionen und wie sie spezifiziert sind. Die Liste ist bei weitem nicht vollständig.

Teil A – Vorbereitungen und allgemeine Bestimmungen können je nach den Anforderungen des Auftraggebers unterschiedlich gegliedert sein. Wenn der Auftraggeber keine speziellen Anforderungen hat und nicht aktiv in den Prozess der Vorbereitung und Festlegung von allgemeinen Bestimmungen eingreifen möchte, kann das Mengenverzeichnis aus Teil A auf lediglich 3-5 Positionen beschränkt sein. Darüber hinaus gibt es verschiedene Möglichkeiten, spezielle Anforderungen im Leistungsverzeichnis zu integrieren, ohne das grundlegende Prinzip der Vereinfachung durch eine reduzierte Positionszahl zu beeinträchtigen.

Teil F – Erdarbeiten umfasst Perimeterklassifizierungen für verschiedene Aspekte wie Sprengungen, Überbrüche und Gebirgssicherungen. Überbrüche aufgrund von unsachgemäßem Bohren oder fahrlässigen Sprengungen werden nicht erstattet. Falls ein Überbruch auf Ursachen zurückzuführen ist, die außerhalb des Einflussbereichs des Auftragnehmers liegen, erfolgt die Entschädigung gemäß den Vorgaben der Norm. Die Norm bietet außerdem eine Auswahl der gebräuchlichsten Ankerarten, darunter Spreizanker, Kunstharzanker, Zementmörtelanker und Kombinationsanker. Weitere Optionen umfassen selbstbohrende Anker, Rohrreibungsanker und Glasfaseranker. Die Installation dieser Anker umfasst Materialbeschaffung, Bohrarbeiten, Ausspülen, Ankerplatten, Unterlegscheiben, Muttern, Vorspannung, Nachspannung und Prüfung. Jeder Ankertyp muss einzeln kontrolliert werden, wobei zu Beginn mindestens 50 % der ersten 100 Anker geprüft werden. Wenn mehr als 5 % dieser Anker bei der Prüfung versagen, wird dieser Prozess wiederholt. Andernfalls müssen nur noch 25 von jeweils 1000 installierten Ankern geprüft werden. Die Zugkraft muss dabei mindestens 10 % über der vorgesehenen Belastung liegen.

---

Teil G – Erdarbeiten behandelt unter anderem das Verpressen von Materialien und erfolgt normalerweise auf Basis einer Cost-Plus Strategie mit einer Aufteilung zwischen Materialkosten und Zeitaufwand. Dieser Teil der Norm enthält auch Bestimmungen zur Regelung der Bauzeit im Zusammenhang mit der äquivalenten Zeitabrechnung. [31]

## 5 Alternative Vertragsmodelle

Obwohl eine Vielzahl von Vertragsmodellen existieren, beispielsweise ÖNORM-Verträge (Einzelvergaben, Teil-GU, GU), Cost plus Fee-Vertrag, GU plus-Vertrag, TU-Vertrag, Garantierter Maximalpreis-Vertrag, Allianzverträge, werden für den Untertagebau nur wenige Modelle verwendet. Aufgrund der Unbekanntheit des Baugrundes sind Einheitspreisverträge am weitesten verbreitet, jedoch kommen auch immer mehr alternative Vertragsmodelle zum Einsatz. In den folgenden Kapiteln werden der Allianzvertrag und das Emerald Book genauer beschrieben.

### 5.1 Allianzvertrag

Die grundlegende Idee des Allianzvertrags ist es, die Interessen der verschiedenen Projektbeteiligten auf ein gemeinsames Projektziel auszurichten und nach dem „best for projekt“ Prinzip vorzugehen. Die Merkmale eines Allianzvertrages sind ein projektabhängiges **Vergütungsmodell**, eine gemeinsame **Risikoübernahme**, eine gemeinsame **Organisationsstruktur** und eine außergerichtliche **Konfliktbehandlung**.

#### 5.1.1 Vergütungsmodell

Um das gemeinsame Projektziel zu erreichen, wird ein projektabhängiges Vergütungsmodell erstellt, welches aus drei wesentlichen Stufen besteht: **Baukosten**, **indirekte Kosten** und einer **Bonus-Malus-Regelung**.

Stufe 1: Baukosten: Bei den Baukosten werden nach dem Prinzip des Cost plus Fee-Vertrages die tatsächlich angefallenen Kosten vergütet.

Stufe 2: Indirekte Kosten: Die indirekten Kosten setzen sich aus den Geschäftsgemeinkosten und dem Gewinn zusammen, welche zumeist als Pauschalpreis ausbezahlt werden.

Stufe 3: Bonus-Malus-Regelung: Durch die Bonus-Malus-Regelung wird der Auftragnehmer zu einer effizienten und qualitativ hochwertigen Ausführung motiviert. Dabei werden die Bereiche „Kosten“, „Termin“, „Qualität“, „Arbeitssicherheit“ und „Kooperation“ bewertet. Bonus und Malus ergeben sich aus der Differenz der im Vorfeld errechneten Zielkosten und der tatsächlichen Kosten. Bei Unterschreitung der Zielkosten bekommt der AN einen vertraglich festgelegten Bonus und bei Überschreitung einen Malus, der jedoch mit dem Gewinn aus der zweiten Stufe begrenzt ist. Im „best case“ erhält der Auftragnehmer den Gewinn und einen Bonus, im „worst case“ wird der Gewinn als Malus abgezogen und das Projekt wird kostendeckend fertiggestellt.

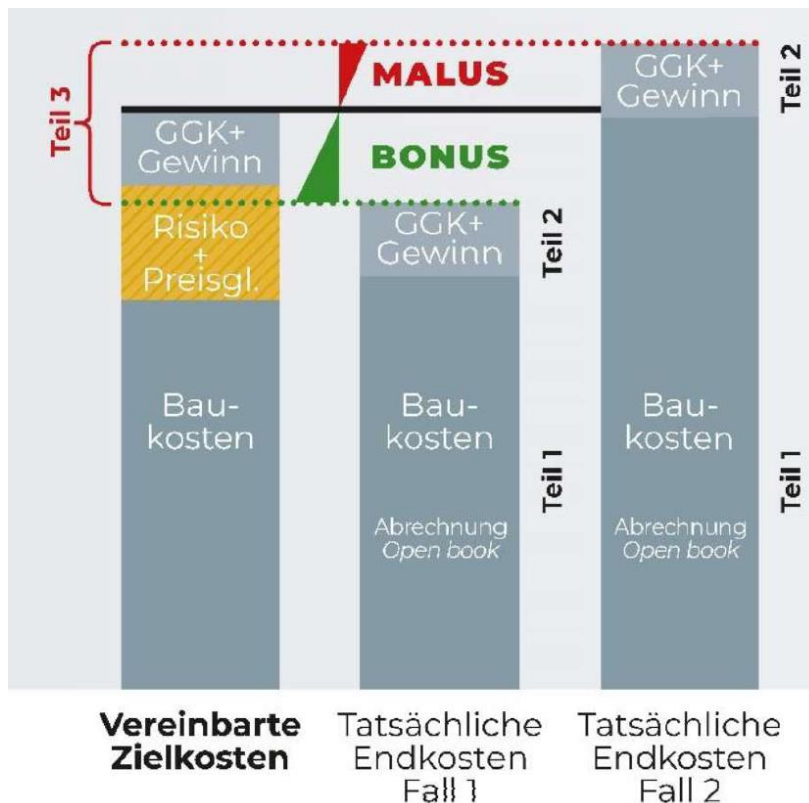


Abbildung 20: Bonus-Malus-System [34]

### 5.1.2 Risikoübernahme

Die Risikozuweisungen werden nicht wie üblich zweigeteilt und dem AN bzw. AG zugeordnet, sondern es wird eine zusätzliche gemeinsame Risikoebene eingeführt. Durch das gemeinsame Risiko muss bei Eintreten eines Schadenfalls daher kein Verantwortlicher gesucht werden, sondern es kann durch die Zusammenarbeit sofort gemeinsam an einem besseren Lösungsansatz gearbeitet werden.

### 5.1.3 Organisationsstruktur

Es wird eine eigene hierarchische Organisationsstruktur erstellt, welche ähnlich wie ein Unternehmen aufgebaut und von Auftragnehmer und Auftraggeber gemeinsam besetzt ist. Dabei ist der Allianzvorstand, bestehend aus Vertretern von AN und AG, die oberste Instanz der Struktur und für die Aufsicht, Führung und Steuerung der Allianz verantwortlich. Auf der nächsten Ebene leitet der Allianzmanager das Allianz-Managementteam, welches das Management des Projektes, die Abwicklung des Tagesgeschäfts und die Zielerreichung zuständig ist. Das übrige Projektteam ist dem Managementteam unterstellt.

### 5.1.4 Konfliktbehandlung

Konflikte werden gemäß einem vertraglich vereinbarten mehrstufigen System außergerichtlich behandelt. Die erste Stufe ist die Problemlösung direkt am Entstehungsort, gefolgt von den übergeordneten Instanzen und dem Allianzvorstand bis hin zum Schiedsgericht. Es geht jedoch

bei der Problemlösung nicht um eine Schuldzuweisung, sondern vielmehr darum, dass die vorhandenen Ressourcen rasch für die Beseitigung des Problems eingesetzt werden. [34]

### 5.1.5 Vorteile Auftraggeber:

Die Vorteile des Auftraggebers sind eine erhöhte Planungssicherheit, keine nachfolgenden Forderungen und Gerichtsverhandlungen sowie oftmals günstigere Herstellungskosten.

### 5.1.6 Vorteile Auftragnehmer:

Ein Vorteil des Auftragnehmers ist die Gewissheit, dass selbst im „worst case“ keine Mehrkosten bei der Beendigung des Projektes übrigbleiben. Eine weitere Stärke ist die partnerschaftliche Abwicklung und die Vorgangsweise der Problemlösung. Dies erhöht das Vertrauen und die Wertschätzung aller Mitarbeiter und sorgt für eine kosten- und zeitsparenden Herstellung mit einer hochwertigen Qualität.

In Australien werden bereits rund 1/3 aller Tief- und Infrastrukturprojekte mittels Allianzvertrag durchgeführt und haben sich dort stark bewährt. Das erste Pilotprojekt dieser Art im deutschsprachigen Raum war das Gemeinschaftskraftwerk Inn (GKI) in Prutz. Der Vortrieb des 22 km langen Triebwasserstollen wurde 2014 begonnen, 2016 aufgrund von Unstimmigkeiten gestoppt und der ursprüngliche Vertrag wurde aufgelöst. Im Anschluss wurde das Projekt mittels Allianzvertrag mit den Unternehmen Strabag, Jägerbau und Hinteregger fortgeführt. Dank dieses Vertragsmodells konnten ca. 6-9 % der Kosten eingespart werden. Nach der Beendigung des Projektes waren sowohl der Auftraggeber als auch die Auftragnehmer vom Allianzvertrag überzeugt. [35]

## 5.2 ITA/FIDIC Emerald Book

Die Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils (FIDIC) hat bereits einige internationale Standardwerke für das Vertragswesen im Baugewerbe veröffentlicht. Beispiele dafür sind:

- **Red Book - Conditions of Contract for Construction** for Building and Engineering Works Designed by the Employer
- **Yellow Book - Conditions of Contract for Plant and Design-Build** for Electrical and Mechanical Plant and for Building and Engineering Works Designed by the Contractor
- **Silver Book - Conditions of Contract for EPC/Turnkey Projects**
- **Green Book - Short Form of Contract**
- **Orange Book - Conditions of Contract for Design-Build and Turnkey**
- **Gold Book - Conditions of Contract for Design, Build and Operate Projects**

Die FIDIC hat eine umfangreiche Sammlung weltweit anerkannter Publikationen vorzuweisen. In zahlreichen von multilateralen Entwicklungsbanken finanzierten Projekten wurden die bewährten Standards des Red Books, des Yellow Books oder des Silver Books angewendet, allerdings waren diese Standards in Bezug auf Tunnelbauwerke sehr stark eingeschränkt. Dies

ist der Grund, weshalb die FIDIC seit 2011 gemeinsam mit der International Tunnelling and Underground Space Association (ITA) an einem eigenen Buch für den Untertagebau gearbeitet hat. 2019 wurde schließlich das ***Emerald Book - Conditions of Contract for Underground Works*** beim World Tunnel Congress in Neapel präsentiert und veröffentlicht.

Für die Risikoverteilung wurde jenes Prinzip verwendet, welches auch in Mitteleuropa am weitesten verbreitet ist:

### 5.2.1 Baugrundrisiko – Auftraggeber

Das Baugrundverhalten und wichtige Informationen für die Baugrundsicherung werden vom Bauherrn im „Geotechnical Baseline Report“ festgehalten. Außerdem ist der AG für die Ausschreibungsplanung zuständig.

### 5.2.2 Ausführungsrisiko – Auftragnehmer

Der Auftragnehmer legt im „Schedule of Baselines“ die Vortriebsgeschwindigkeit und die zu erwartende Vortriebsklasse vertraglich fest. Des Weiteren wird die gesamte Ausführungsplanung vom AN ausgearbeitet. Bei entsprechender vertraglicher Vereinbarung kann jedoch auch die komplette Planung an den AG übergeben werden.

### 5.2.3 Bill of Quantities – Für Ausbruch und Sicherung

Die meisten Leistungen werden als Pauschalpreis vergütet, lediglich für Ausbruch und Sicherung werden nach Einheitspreisen abgegolten. Die Einheitspreise werden im Leistungsverzeichnis vereinbart, der Detaillierungsgrad des Leistungsverzeichnisses wird vom Bauherrn festgelegt. [36]

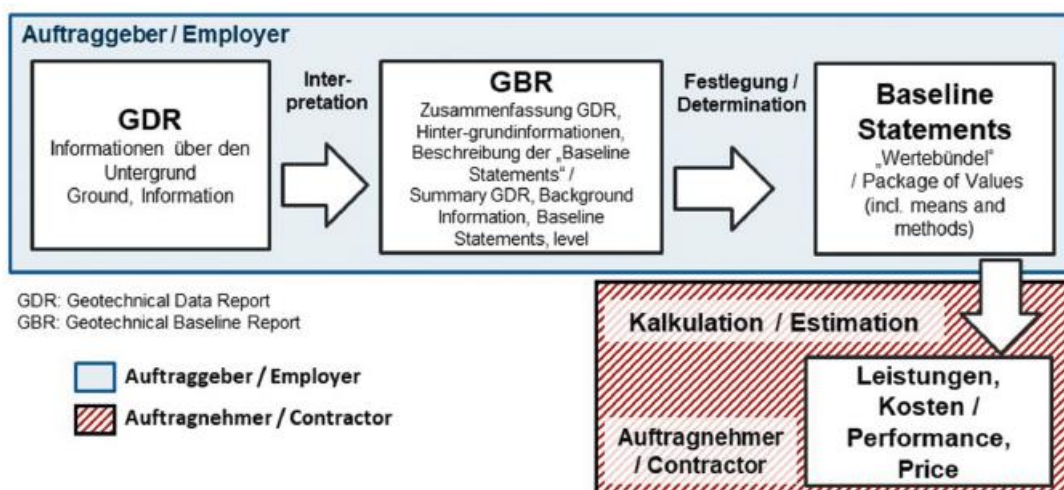


Abbildung 21: Aufgabenteilung AG / AN [36]

### **5.2.4 The Engineer – „Der Ingenieur“**

„Der Ingenieur“ nimmt eine entscheidende Position in den administrativen Aufgaben im Rahmen der Vertragsbedingungen des Emerald Books ein. Obwohl er direkt vom Auftraggeber eingestellt und diesem unterstellt ist, ist er verpflichtet, stets eine neutrale Position zu wahren und als Vermittler zwischen beiden Parteien zu agieren. Neben seiner beratenden Funktion trägt der Ingenieur auch die Verantwortung für die Überwachung des Baufortschritts und die Beurteilung der Qualität.

Im Emerald Book sind strenge Anforderungen festgelegt, sodass der Ingenieur dazu verpflichtet ist, innerhalb einer vereinbarten Frist die „physische Bedingungen unverzüglich zu inspizieren und zu untersuchen“. Währenddessen ist der AG dazu verpflichtet, die Arbeiten fortzusetzen und dabei angemessene und vernünftige Maßnahmen für die gegebenen Bedingungen zu ergreifen. Durch die Maßnahmen dürfen jedoch die Verpflichtungen des Ingenieurs nicht beeinträchtigt sein. [37]

## 6 Vergleich

Die Standards der einzelnen Länder wurden in den vorherigen Kapiteln im Detail beschrieben. Es folgt nun eine Zusammenfassung der Ähnlichkeiten und Unterschiede in Form eines Vergleiches.

### 6.1 Standards

Viele gemeinsame Aspekte sind international im Tunnelbau weit verbreitet und haben sich weltweit durchgesetzt. Beispiele dafür sind der Einheitspreisvertrag und eine faire Risikoverteilung. Viele Einzelheiten werden von den Ländern je nach Geographie, Kultur und Geschichte anders gehandhabt. Selbst im DACH-Raum, welcher vergleichsweise ähnliche geologische Bedingungen und kulturelle Ähnlichkeiten aufweist, gibt es einige Verschiedenheiten in der Konstruktion und Vergütung von Untertagebauarbeiten.

#### 6.1.1 DACH-Raum

Für den DACH-Raum werden die Länder Österreich, Schweiz, Deutschland und die autonome Provinz Südtirol verglichen.

Schweiz, Österreich und Südtirol sind von den Alpen geprägt und haben daher nahezu gleiche geologische Voraussetzungen. Die Alpen haben eine Vielzahl von Gesteinen, darunter Granit, Gneis, Schiefer, Phyllit, Kakirit. Daher werden oft inhomogene Gebirge vorgefunden, welche einigen Störzonen beinhalten.

Deutschland ist im Vergleich dazu flächenmäßig um ein Vielfaches größer und landschaftlich relativ flach geprägt. Daher werden in Deutschland auch eine Vielzahl von verschiedenen Tunnelvortriebsmaschinen eingesetzt.

In den Alpen werden nicht nur Tunnel für die Erschließung von Verkehrswegen, Straßen oder Eisenbahn gebaut, sondern auch viele Stollen für Wasserkraftwerke.

Die Landschaft Deutschlands eignet sich nur wenig für Speicherkraftwerke, daher werden die meisten Untertagebauwerke für Verkehrswege wie beispielsweise Straßen, Züge, und U-Bahn errichtet.

Die deutsche Norm DIN 18312 „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingung für Bauleistungen (ATV) – Untertagebauarbeiten“ und die „Allgemeine Technische Vertragsbestimmungen 2019“ der „Besonderen Vertragsbedingungen für öffentliche Bauarbeiten Teil 2“ der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol sind mit der ÖNORM B 2203 gleichzusetzen. Der Unterschied ist, dass die ÖNORM auch bauvertragliche Details regelt. Das schweizerische Gegenstück für Verträge ist

die SIA 118/198, welche Regeln bezüglich Abschluss, Inhalt und Abwicklung von Untertagebauverträgen beinhaltet. Im Unterschied zur ÖNORM beinhaltet die SIA auch die Ausführung jeglicher Leistungen im Untertagebau in einer Norm. Der nationale Standard NS 3420 bildet in Norwegen die Grundlage für die Ausschreibungsunterlagen basierend auf das Einheitspreissystem.

### 6.1.2 Norwegen als „Exot“

Die Geologie in Norwegen ist im Vergleich ganz anders. Das skandinavische Gebirge ist um ein Vielfaches härter und stabiler als die Alpen. Dadurch werden zwar tendenziell größere Abschlaglängen möglich und weniger Stützmittel benötigt, jedoch bedeutet dies auch für Tunnelbohrmaschinen einen enormen Verschleiß.

Norwegen hat eine große Dichte an Tunnelbauwerken. Im Gegensatz zu Zentraleuropa werden in Norwegen nicht nur Tunnel für das Eisenbahnnetz, Verkehrsstraßen und Wasserkraft gebaut, sondern auch für den Transport von fossilen Rohstoffen.

## 6.2 Aufbau der Normen

### 6.2.1 Österreich

Die österreichische Werksvertragsnorm ÖNORM B 2203-2 enthält gesamt 60 Seiten und hat folgende Kapiteileinteilung:

1. Anwendungsbereich
2. Normative Verweisung
3. Begriffe
4. Verfahrensbestimmung
5. Vertragsbestimmungen
  - Anhänge

### 6.2.2 Deutschland und Südtirol

Deutschland und Südtirol: Die Regelwerke von Deutschland und Italien sind beide jeweils Allgemeine Technische Vertragsbestimmungen mit demselben Aufbau:

| Deutschland – DIN 18312                                 | Südtirol – Allgemeine Technische Vertragsbedingungen (ATV) |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 0 Hinweise für das Aufstellen der Leistungsbeschreibung | 0 Hinweise für die Erstellung des Projektes                |
| 1 Geltungsbereich                                       | 1 Geltungsbereich                                          |
| 2 Stoffe, Bauteile                                      | 2 Stoffe, Bauteile; Boden und Fels                         |
| 3 Ausführung                                            | 3 Ausführung                                               |
| 4 Nebenleistungen, Besondere Leistungen                 | 4 Nebenleistungen, Besondere Leistungen                    |
| 5 Abrechnung                                            | 5 Abrechnung                                               |

Tabelle 2: Normenaufbau Deutschland und Südtirol

### 6.2.3 Schweiz

In der Schweiz gibt es mehrere Normen, die für den Untertagebau angewendet werden. Je nach Zweck, Projektphase und Funktion werden die folgenden Regelwerke herangezogen:

|                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| SIA 197, SIA 197/1, SIA 197/2 | → Projektierung            |
| SIA 198                       | → Ausführung               |
| SIA 199                       | → Gebirgsbeschreibung      |
| SIA 118/198                   | → vertragliche Bedingungen |

Die SIA 118/198 „Allgemeine Bedingungen für Untertagebau“ wird dabei in die folgenden Kapitel geteilt:

- 0 Geltungsbereich
- 1 Werkvertrag
- 2 Vergütungsregelungen
- 3 Bestelländerung, Fristanpassung
- 4 Bauausführung
- 5 Ausmaß und Zahlungsmodalitäten
- 6 Abnahme des Werks und Haftung für Mängel
- 7 Vorzeitige Beendigung des Werkvertrags
- 8 Vorauserkundung
- 9 Sprengvortrieb im Fels (SPV)
- 10 Tunnelbohrmaschinenvortrieb im Fels (TBM)
- 11 Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels (MUF)
- 12 Maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein (MUL)
- 13 Schildmaschinenvortrieb im Lockergestein (SM)
- 14 Ausbruchsicherung
- 15 Bauhilfsmaßnahmen
- 16 Abdichtung
- 17 Wasserhaltung
- 18 Entwässerung Verkleidung
- Anhang

Die SIA 198, die Ausführungsnorm für Untertagebauarbeiten der Schweiz, besteht lediglich aus den folgenden 9 Unterteilungen:

- 0 Geltungsbereich
- 1 Verständigung
- 2 Konstruktive Durchbildung und Werkstoffe
- 3 Ausführung
- 4 Ausführungskontrolle und Überwachung
- 5 Arbeitsschutz und Gesundheitsschutz
- 6 Materialbewirtschaftung
- 7 Abweichungen vom Soll-Maß

## 8 Erhaltung von Untertagebauwerken

- Anhang

### 6.2.4 Norwegen

Die NS 3420 dient zur Erstellung von Ausschreibungen und Mengenlisten in Zusammenhang mit der Ausführungs- und Abwicklungsphase von Bauvorhaben und enthält Anforderungen an Materialien und Ausführung. Die Teilnorm NS 3420-0 beinhaltet allgemeine Informationen über das hierarchische System der Norm und den allgemeinen Umgang. Die Kapitel sind folgendermaßen aufgebaut:

0 Einweisung

1 Gemeinsame Bestimmungen

2 Aufteilung, Inhalt und Stichwortliste

A Errichtung, Betrieb und Abwicklung von Bauwerken und Baustellen

B Verbundelemente und Systeme

BE Bauelemente

F Bodenarbeiten → Umfasst den Aushub von Fels und Lockergestein im Erdreich und in Tunneln, Schächten und Felskavernen mit den üblichen Nebenarbeiten.

Und die weiteren Kapitel: BM, BN, BQ, BR, BS, BW, CD, CH, CU, D, G, J, K, L, N, P, PN, Q, R, SB, SF, SH, SL, T, U, V, W, X, Y, YB, Z, ZK.

## 6.3 Beschreibung von Boden und Fels

### 6.3.1 Österreich

Die Gebirgscharakterisierung in Österreich erfolgt gemäß der Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb der ÖGG, wobei für die Charakterisierung folgende Merkmale ermittelt werden müssen: Gebirgsart, Gebirgsverhalten und Gebirgsverhaltenstyp. Die Wahl der Vortriebsart, des Vortriebsverfahrens, die Unterteilung der Vortriebsklassen und die Tunnelbautechnischen Maßnahmen werden basierend auf die Charakterisierung des Gebirges ausgearbeitet.

Für die Ausschreibung in Österreich sind die folgenden Prognosen bezüglich des Gebirges zu erarbeiten:

- Gebirgsart, Systemverhalten und Vortriebsklassen
- Regelvortriebe, Sondervortriebe und Ereignisbewältigung;
- Wasserführung im Gebirge (Art, Ort, Menge, Dauer, Drücke, Temperatur, Mechanismus);
- Wassereinfluss auf Gestein / Gebirge und Wassereinwirkung auf den geplanten Ausbau
- Gasaustritte
- Verwertbarkeit der Tunnelausbruchs

- geologische Belastungen des Gebirges
- Gebirgstemperatur

### 6.3.2 Deutschland

In Deutschland werden Boden und Fels vor dem Lösen in Homogenbereiche eingeteilt. Die anzugebenden Eigenschaften und Kennwerte mitsamt der ermittelten Bandbreite der Böden sind im Kapitel 4.2.1 beschrieben. Die Homogenbereiche sind begrenzte Bereiche, die aus einzelnen oder mehreren Boden- und Felsschichten bestehen, welche aber für Untertagebauarbeiten vergleichbare Eigenschaften aufweisen.

### 6.3.3 Südtirol

In der ATV der autonomen Provinz Bozen – Südtirol erfolgt die Klassifizierung der Gebirgsarten mittels einem anerkannten Klassifikationssystem. Solche Systeme können beispielsweise der ÖGG-Richtlinie, Bieniawski, Barton (Q-System) oder „ISRM – International Society for Rock Mechanics“ entnommen werden. Für die Gebirgsverhaltenstypen sind das Verhalten des Gebirges bezüglich Ausbruch, zeitliche und räumliche Verformung und Versagensform ausschlaggebend.

Das Gebirge wird anschließend in sechs verschiedene Gebirgsklassen eingeteilt:

- Klasse A - Standfestes bis gebräches Gebirge
- Klasse B - Gebräches Gebirge
- Klasse C – Druckhaftes Gebirge
- Klasse D – Kurzfristig standfestes Fest- und Lockergestein
- Klasse E – Fließendes Fest- und Lockergestein
- Klasse F – Mixed-Face-Bedingungen (heterogene Brust)

### 6.3.4 Schweiz

Da der Bauherr den Baugrund zur Verfügung stellt, muss er bei der Ausschreibung auch die benötigten Informationen dazu bekanntgeben. Der Umfang der Untersuchungen ergibt sich aus den technisch infrage kommenden Bauverfahren und aus den zu berücksichtigenden Randbedingungen, beispielsweise Grundwasser. Grundsätzlich werden gemäß der SIA 199 „Erfassen des Gebirges im Untertagebau“ die geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Verhältnisse sowie das Gasvorkommen beschrieben. Weiters wird in der SIA 199 die Beurteilung des Gebirges in Bezug auf das Gebirgsverhalten, Gefährdungsbilder, Ausbruchmaterial und Gasvorkommen beschrieben sowie eine Planung von Maßnahmen angeordnet. In der Ausschreibung müssen beispielsweise Gesteinsarten, Quarzgefährdungen, Vorkommen von asbesthaltigem Gestein, Gas und radioaktivem Gestein und die Baugrundtemperatur angeführt werden.

### 6.3.5 Norwegen

In Norwegen werden die grundlegenden geotechnischen Untersuchungen im Kapitel D „Untersuchungen, Registrierungen und Kontrolle“ der Standardnorm NS 3420 beschrieben. Die Positionsgrundlagen basieren jedoch auf dem Bericht Nr. 10 der Norwegischen Geotechnischen Vereinigung.

In Norwegen können eine Vielzahl von Klassifizierungssysteme in Anhängigkeit der persönlichen Präferenzen der Führungspersonen sowie der geographischen Region zur Anwendung kommen. Allerdings wird die Bodenklassifizierung in den meisten Fällen mit dem Q-System nach Barton (1974) durchgeführt. Dabei wird der Boden in sechs verschiedene Kategorien unterteilt:

- G - „außergewöhnlich schlecht“
- F - „extrem schlecht“
- E - „sehr schlecht“
- D - „schlecht“
- C - „mittelmäßig“
- B - „gut“
- A – „sehr gut“, „extrem gut“, „außergewöhnlich gut“

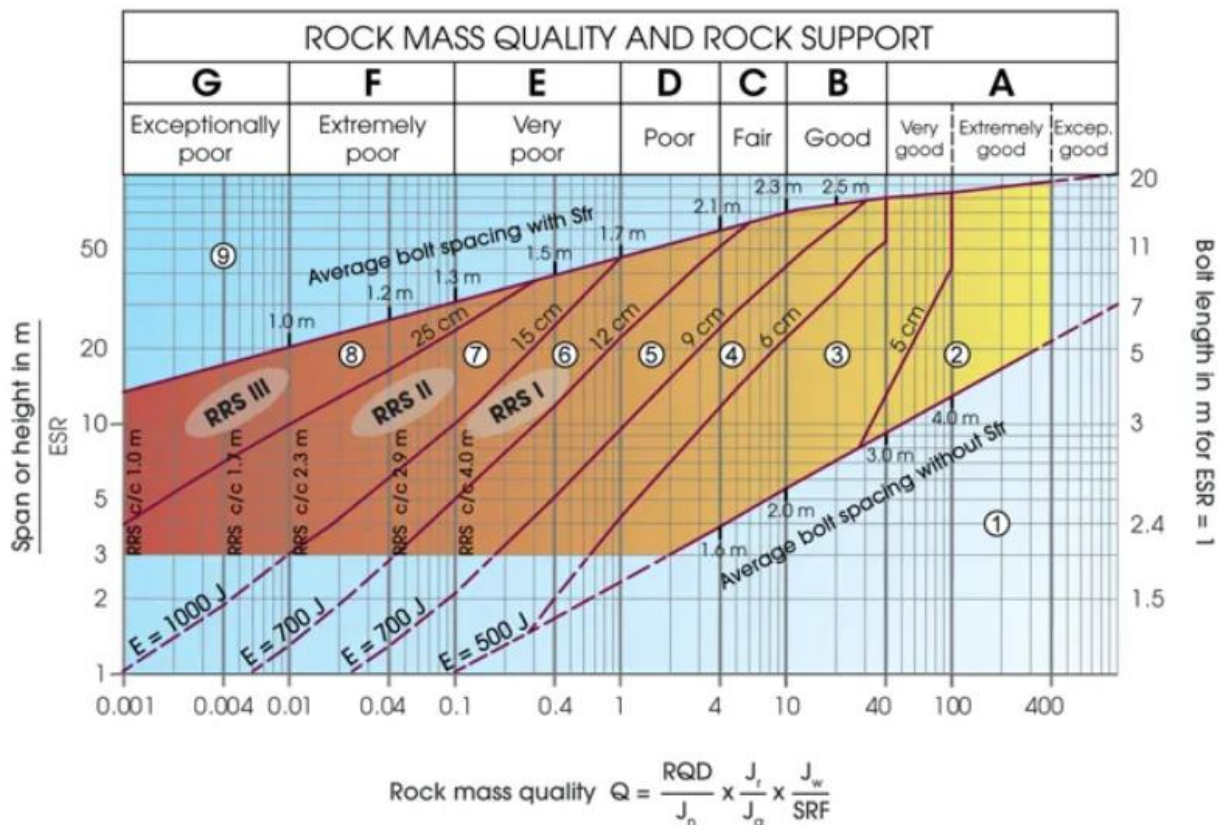


Abbildung 22: Einteilung Gesteinsmassenklasse und Gesteinsunterstützung [33]

Das Q-System kann für zwei verschiedene Hauptanwendungsfälle angewendet werden.

- Klassifizierung der Gesteinsmassenqualität (rock mass quality) in Bezug auf die Stabilität von unterirdischen Konstruktionen, entweder als Teil von Oberflächenstandortuntersuchungen und geologischer Kartierung oder als Teil der Kartierung der Bodenverhältnisse während des Vortriebs.
- Auswahl der Stützmaßnahmen für Ausbrüche auf der Grundlage einer Kombination aus der Q-Klassifizierung der lokalen Gesteinsqualität (rock quality) und dem Gesteinsstützungsdiagramm (rock support diagram) des Q-Systems. Dies liefert empfohlene Lösungsmöglichkeiten, welche aus einer bestehenden Datenbank aus bereits erfolgreich durchgeführten Lösungen für ähnliche Gesteinsbedingungen stammen. Die Empfehlungen decken sowohl sofortige, vorübergehende als auch dauerhafte Stützungen ab.

Diese Klassifizierung nach dem Q-System wird im geologischen Bericht festgehalten und dient in weiterer Folge dem Bauherrn als Grundlage für die Ausschreibung. Der geologische Bericht beinhaltet die untersuchten Bodendaten und zusätzlich eine Beschreibung der erwarteten Bodenverhältnisse als Prognose. Der Bericht sollte alle verfügbaren Information zur Gänze zur Verfügung stellen.

## 6.4 Risikoordnung

### 6.4.1 DACH-Raum

Das Baugrundrisiko obliegt in allen Ländern den Bauherrn. Bei Baugrundverhältnissen außerhalb der prognostizierten Spannweite ist der Bauherr verantwortlich, innerhalb dieser Spannweite muss der Unternehmer die vereinbarten Leistungen im vorgegebenen zeitlichen Rahmen fertigstellen.

In der Schweiz werden alle Risiken meistens mittels einfachen Klassifizierungsmatrizen bewertet und einer Akzeptanzlinie gegenübergestellt. Bei Überschreitung dieser Linie müssen Maßnahmen für ein vertretbares Restrisiko getroffen werden.

Das österreichische Modell sieht für die Abrechnung die Ausbruch-Klassifizierungsmatrix mit erster und zweiter Ordnungszahl vor. Bei schlechteren Gebirgsverhältnissen ändert sich der definierte Bereich und dadurch auch die Vergütung. Innerhalb der definierten Bereiche der Matrix ist der Unternehmer für die geregelten Leistungen verantwortlich.

Obwohl beide Normen eine faire Risikoverteilung sicherstellen, wird die Schweizer Untertagebaunorm als etwas unternehmerfreundlicher angesehen. Als Beispiel sei hier genannt, dass in der Schweiz der tatsächliche Verbrauch an Spritzbeton und Abbindebeschleuniger vergütet wird.

In Deutschland und in Südtirol ist der AN für den Bauablauf innerhalb der Vortriebsklasse zuständig, daher trägt dieser auch die Verantwortung für einen effizienten Vortrieb in der Bandbreite der Vortriebsklasse.

### 6.4.2 Norwegen

Ebenfalls in Norwegen liegt das Risiko des Baugrundes beim Auftraggeber. In der Regel werden keine Preisunterschiede für den Aushub je nach Qualität des Gesteines gemacht, jedoch gibt es separate Einheitspreise für spezielle Maßnahmen wie beispielsweise die Halbierung der Sprenglänge oder die Unterteilung des Ausbruchquerschnittes. Ebenfalls werden hier die tatsächlich verbauten Mengen ausbezahlt. Das Risiko des Auftragnehmers liegt bei der effizienten Durchführung seiner Arbeiten gemäß den technischen Spezifikationen. Die zeitliche Dauer der Arbeiten wird durch die zeitlichen Äquivalenten berechnet.

## 6.5 Vortriebsklassifizierungen

### 6.5.1 Österreich

In der ÖNORM werden die Vortriebsklassen durch eine Klassifizierungsmatrix festgelegt. Die Ordnungszahlen der Matrizen in Abhängigkeit der Vortriebsmaschinen (TMB-O und TBM-A, TBM-S und TBM-DS sowie SM) werden in der folgenden Abbildung zur besseren Übersicht zusammengefasst.

|                 | TBM-O / TBM-A                            | TBM-S / TBM-DS                  | SM                              |
|-----------------|------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1. Ordnungszahl | Penetration                              | Penetration                     | Penetration                     |
| 2. Ordnungszahl | Art, Menge und Einbauort der Stützmittel | „Leistungsbestimmende Merkmale“ | „Leistungsbestimmende Merkmale“ |

*Tabelle 3: Einteilung Vortriebsklassifizierung*

### 6.5.2 Deutschland

Die Vortriebsklassen in Deutschland werden in der DIN 18312 im Kapitel 3 – Ausführung beschrieben. Für den Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen werden folgende Vortriebsklassen angeführt:

- Vortriebsklasse TBM1 – Vortrieb ohne Sicherung
- Vortriebsklasse TBM 2 – Ausbruch mit einer Sicherung, deren Einbau das Lösen nicht behindert
- Vortriebsklasse TBM 3 – Ausbruch mit einer Sicherung, deren Einbau das Lösen behindert
- Vortriebsklasse TBM 4 – Ausbruch mit einer Sicherung, für deren Einbau das Lösen unterbrochen werden muss

Für den Vortrieb mit Schildmaschinen wird zwischen Vollschnittabbau (VS) und Teilschnittabbau (TS) unterschieden.

- Vortriebsklasse VS1 – Ausbruch ohne Stützung der Ortsbrust
- Vortriebsklasse VS 2 – Ausbruch mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust
- Vortriebsklasse VS 3 – Ausbruch mit erddruckgestützter Ortsbrust
- Vortriebsklasse TS 1 – Ausbruch ohne Sicherung der Ortsbrust

- Vortriebsklasse TS 2 – Ausbruch mit einer Sicherung der Ortsbrust

### 6.5.3 Südtirol

In der Südtiroler ATV wird die Vortriebsklasse zwischen kontinuierlichen Vortrieb mit TMB und mit SM unterschieden, dabei werden für den TBM-Vortrieb je nach Behinderung des Vortriebes und der benötigten Stützmaßnahmen die Vortriebsklassen VF1 – VF6 unterschieden. Die genaue Beschreibung befindet sich in Kapitel 4.3.3.

- Vortriebsklasse VF1
- Vortriebsklasse VF2
- Vortriebsklasse VF3
- Vortriebsklasse VF4
- Vortriebsklasse VF5
- Vortriebsklasse VF6

Für den SM-Vortrieb werden die Vortriebsklasse VS1 – VS3 unterschieden:

- Vortriebsklasse VS1: Ausbruch ohne Stützung der Ortsbrust
- Vortriebsklasse VS2: Ausbruch mit teilgestützter Ortsbrust
- Vortriebsklasse VS3: Ausbruch mit vollgestützter Ortsbrust

Außerdem wird in der ATV die Ausbaufestlegung beschrieben, in welcher der Ausbruch und die Stützung einvernehmlich festgelegt sind und somit die Grundlage für die Bauabrechnung bilden.

### 6.5.4 Schweiz

In der Schweizer Norm gibt es keine vordefinierten Vortriebsklassen. Der tatsächliche Aufwand für den Ausbruch ist von der „Bohrklasse“ bzw. „Abbauklasse“ und der „Sicherungsklasse“ abhängig. Die Bohrklasse ist die Klassierung des Gebirges nach dem zu betreibenden Aufwand, um eine bestimmte Tunnelstrecke aufzufahren. Bohrklassen werden standardgemäß mittels Bestimmung der Penetration in einem Testvorschub bestimmt oder wenn anders vereinbart beispielsweise aufgrund der geologischen Beschreibung. Abbauklassen sind die Klassierung des Baugrunds nach dem erforderlichen Aufwand für den Abbau einer bestimmten Strecke mit mechanischen Mitteln. Die Sicherungsklasse wird als die Klassierung der Ausbruchsicherung nach Art, Menge und Einbauort der Sicherungsmaßnahmen definiert. Dabei werden die Sicherungsklassen SK1 – SK5 sowie SKT unterschieden.

- SK1: Die Ausbruchsicherung verursacht eine unbedeutende Behinderung des Vortriebs
- SK2: Die Ausbruchsicherung verursacht eine leichte Behinderung des Vortriebs
- SK3: Die Ausbruchsicherung verursacht eine erhebliche Behinderung des Vortriebs
- SK4: Die Ausbruchsicherung verursacht eine starke Behinderung des Vortriebs (sofortige Sicherung nach jedem Abschlag)

- SK5: Die Ausbruchsicherung verursacht eine sehr starke Behinderung und bedingt allenfalls eine sofortige Stützung der Brust oder Bauhilfsmaßnahmen
- SKT: Die Ausbruchsicherung erfolgt mit Tübbingen, eingebaut im Schildmantel. (TBM oder SM)

Weiters gibt es den Sicherungstyp, dieser bestimmt vorbestimmte Maßnahmen für die Ausbruchssicherung, als Vorschlag für die Ausführung, für verschiedene Baugrundverhältnisse und Bemessungssituationen.

### 6.5.5 Norwegen

In Norwegen werden einerseits die Projekte selbst in geotechnische Kategorien und Untersuchungsklassen eingeteilt. Vortriebsklassen und die dazugehörigen Sicherungsmaßnahmen werden auf Grundlage Q-Systems der Bodenklassifizierung vorab definiert.

Die geotechnischen Kategorien sind abhängig vom Schwierigkeitsgrad des Projektes und von der Zuverlässigkeitsklasse (RC) bzw. Schadensfolgeklasse (CC). Die Untersuchungsklassen werden vom Schwierigkeitsgrad der Ingenieurgeologie und den entsprechenden Sicherheitsanforderungen bestimmt.

| Reliability class | Degree of difficulty |        |      |
|-------------------|----------------------|--------|------|
|                   | Low                  | Medium | High |
| CC/RC 1           | 1                    | 1      | 2    |
| CC/RC 2           | 1                    | 2      | 2/3  |
| CC/RC 3           | 2                    | 2/3    | 3    |
| CC/RC 4*          | *                    | *      | *    |

Abbildung 23: Klassifikation geotechnischer Kategorien [33]

| Investigation class               |            | Level of engineering geological difficulty |              |          |
|-----------------------------------|------------|--------------------------------------------|--------------|----------|
|                                   |            | a1. Low                                    | a2. Moderate | a3. High |
| Safety requirement<br>for project | b1. Low    | A                                          | A            | B        |
|                                   | b2. Medium | A                                          | B            | C        |
|                                   | b3. High   | B                                          | C            | D        |

Abbildung 24: Klassifikation Untersuchungsklassen [33]

Die Vortriebsklassifizierung mitsamt den Mindestanforderungen der Sicherungsmaßnahmen erfolgt auf Grundlage der Bodenklassifizierung. Für jede Gesteinsmassenklasse (rock mass

class; A-G) werden die Anforderungen an die permanenten Sicherungen vorgegeben. Die Maßnahmen müssen vom Auftragnehmer gemäß den vereinbarten Bedingungen durchgeführt werden. Die beiden Abbildungen 27 und 28 zeigen eine mögliche Zuordnung der Sicherungsmaßnahmen.

| Rock Mass Class | Rock Mass Conditions (Q-value <sup>(1)</sup> )                                                            | Rock Support Class (Permanent Rock Support)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A/B             | Low-jointed rock mass<br>Average joint spacing > 1 m<br>Q = 10-100                                        | <b>Rock Support Class I</b><br>- Spot bolting<br>- Reinforced sprayed concrete B35 E700, thickness 80 mm in crown and walls down to max 2 m above tunnel invert                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| C               | Moderately jointed rock mass<br>Average joint spacing 0.3 – 1 m<br>Q = 4 – 10                             | <b>Rock Support Class II</b><br>- Systematic bolting (c/c 2 m), end-anchored, pre-tensioned, fully grouted rock bolts<br>- Reinforced sprayed concrete B35 E700, thickness 80 mm, in crown and walls down to tunnel invert                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| D               | Heavily jointed rock mass or stratified schistose rock mass<br>Average joint spacing < 0.3 m<br>Q = 1 – 4 | <b>Rock Support Class III</b><br>- Reinforced sprayed concrete B35 E1000, thickness 100 mm or more<br>- Systematic bolting (c/c 1.5 m), end-anchored fully grouted rock bolts as permanent support                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| E               | Very poor rock mass quality<br>Q = 0.1 – 1                                                                | <b>Rock Support Class IV</b><br>- Spilling bolts when Q < 0.2, Ø25 mm, max c/c 300 mm<br>- Reinforced sprayed concrete B35 E1000, thickness 150 mm<br>- Systematic bolting, c/c 1.5 m, fully grouted rock bolts<br>- Reinforced ribs of sprayed concrete, Q < 0.2, rib dimension E30/6x Ø20 mm, c/c 2 – 3 m between ribs, bolted systematically c/c 1.5 m, 3 – 4 m long rock bolts <sup>(2)</sup><br>- Decide if cast-in-place invert slab is necessary                                                                                                                                         |
| F               | Extremely poor rock mass quality<br>Q = 0.01 – 0.1                                                        | <b>Rock Support Class V</b><br>- Forepoling, c/c 200 – 300 mm, Ø32 mm or self-boring stud bolts<br>- Reinforced sprayed concrete B35 E1000, thickness 150 – 250 mm<br>- Systematic bolting, c/c 1.5 m, fully grouted rock bolts c/c 1.0 – 1.5 m<br>- Reinforced ribs of sprayed concrete, rib dimension D40/6+4 x rebar Ø20 mm, c/c 1.5 – 2 m between ribs, bolted systematically c/c 1.0 m, 3 – 6 m long rock bolts <sup>(2)</sup><br>- Decide if cast-in-place invert slab is necessary<br>- Cast-in-place reinforced invert slab with rise-to-span ratio min. 10 % of the span of the tunnel |
| G               | Exceptionally poor rock mass<br>Q < 0.01                                                                  | <b>Rock Support Class VI</b><br>- Special evaluation of excavation and rock support                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

<sup>(1)</sup> Q-values are given for uniaxial compressive strength, UCS = 100 MPa

<sup>(2)</sup> Requirements to materials, methods, and solutions are described in «Teknologirapport nr. 2538: Arbeider foran stoff og stabilitetssikring i vegtunneler» (Technology report No. 2538: Works ahead of the tunnel face and rock support in road tunnels), in Norwegian only

Abbildung 25: Zuordnung von Sicherungsmaßnahmen [38]

| Rock support classes           | I                   | II                       | III                      | IV                                      | V               |
|--------------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-----------------|
| Rockmass quality               | Good                | Intermediate             | Poor                     | Very poor                               | Extremely poor  |
| Class                          | A/B                 | C                        | D                        | E/F                                     | G               |
| Q-verdi                        | $Q \geq 10$         | $4 \leq Q < 10$          | $1 \leq Q < 4$           | $0,01 \leq Q < 1$                       | $Q < 0,01$      |
| Bolting in roof c/c and length | 2,5m x 2,5m<br>L=4m | 2,0m x 2,0m<br>L=4m      | 1,7m x 1,7m<br>L=4m      | 1,3m x 1,3m<br>L=4m *                   | Casted concrete |
| Bolting in wall c/c and length | Spotbolting<br>L=3m | Spotbolting<br>L=3m      | 2,0m x 2,0m<br>L=3m      | 1,5m x 1,5m<br>L=3m                     |                 |
| Shotcrete roof (mm)            | 80mm                | 80mm                     | 100mm                    | 150 mm<br>+ reinforced shotcrete arches | Special design  |
| Shotcrete Wall (mm)            | Scaling             | 80 mm<br>1,5 m over sole | 80 mm<br>1,5 m over sole | 100 mm                                  |                 |

Abbildung 26: Beschreibung von Gebirgsunterstützende Maßnahmen auf Basis des Q-Systems [33]

## 6.6 Tübbinge und Ringspalt

### 6.6.1 Österreich

In der Ausschreibung werden vom Bauherrn Anforderungen an die Tübbinge und den Ringspalt für den Ausbau vorgegeben. Dabei wird beim Vortrieb mittels TBM-S, TBM-DS und SM der Einbauort der Tübbinge definiert. Die Tübbingproduktion wird in einer eigenen Position mitsamt der ordnungsgemäßen Lagerung angegeben. Die Kosten dazu werden zu 30 % bei der Bestellung der Tübbingproduktion durch den AN, zu 60 % bei Produktionsbeginn und zu 10 % nach der Produktion der ersten 100 Tunnelmeter Tübbinge ausbezahlt. Die Tübbinge selbst werden je Typ in Meter Tunnel vergütet, bei der Planung nach AG wird die benötigte Tübbingbewehrung in Tonnen vergütet.

Für die Ringspaltverfüllung werden Art und Ort sowie die maximal zulässigen Drücke vom AG vorgegeben. Die Vergütung der Ringspaltverfüllung erfolgt in  $\text{m}^3$ , die anzuschreibende Menge wird ermittelt, indem der theoretische Ringspalt mitsamt eines eventuellen Mehrverbrauches abzüglich der erwarteten Verschiebungen berechnet wird. Für das Ringspaltmaterial wird dabei die tatsächlich benötigte Verfüllmenge verrechnet.

Alternativ kann diese Position auch je Meter Tunnel angegeben werden. Die Abrechnung des Materials erfolgt nach den planmäßigen Abmessungen.

### 6.6.2 Deutschland

Die Abrechnung des Tübbingausbaus erfolgt in Deutschland nach Längenmaß in Meter oder nach der Anzahl der Tübbingringe in Stück. Bei der Abrechnung nach Längenmaß wird die Länge der Sicherung mit Tübbinge in der Bauwerkslängsachse gemessen.

In der DIN 18312 wird lediglich beschrieben, dass die Art der Verfüllung von Ringräumen und die zu verwendenden Stoffe vom AG angegeben werden müssen, die Abrechnungsmethodik der Verfüllung wird in dieser Norm nicht erwähnt.

Für die Planung, Herstellung und den Einbau von Tübbingringen wurden jedoch vom Deutschen Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) Empfehlungen publiziert.

### 6.6.3 Südtirol

Bereits bei der Ausschreibung müssen Angaben zu den Tübbingarten und dem Ringspalt vorgegeben sein.

Die Ringspaltverpressung wird nach Raummaß oder nach Längenmaß vergütet, jedoch getrennt nach Material. Die Abrechnung erfolgt anhand der tatsächlichen Füllmenge abzüglich des vertraglich vereinbarten Überschnittes aus dem Verantwortungsbereich des AN ( $\ddot{u}_s$ ), sämtliche Aufwendungen der Ringspaltverpressung im Bereich  $\ddot{u}_s$  werden jedoch als Nebenleistung angesehen. Die Mindestanforderungen bezüglich den Einbauort der Tübbinge entsprechen jenen der ÖNORM B 2203-2. Die Abrechnungseinheiten dazu sind für den Tübbingausbau das Längenmaß in Meter, jedoch getrennt nach Tübbingarten und -typen.

### 6.6.4 Schweiz

In der Schweiz gehören die Angaben zur Herstellung und Handhabung der Tübbinge zu den besonderen Beilagen zum Angebot des Unternehmers. Jedoch gibt der Bauherr die Druckfestigkeit, die Maßtoleranzen und die Anforderungen bezüglich Dichtigkeit, Oberfläche, etc. vor. Gesondert vergütet wird dabei die Lieferung (Herstellung, Transport und Lagerung auf der Baustelle) pro Laufmeter Tunnel, das Liefern und Verlegen der Tübbingbewehrung nach Gewicht sowie der Transport zum Einbauort und Einbau der Tübbinge einschließlich allfälliger Verbindungen und Fugendichtungen pro Laufmeter Tunnel. Die Ringspaltverfüllung wird in der Schweiz nach Baustoff und Laufmeter Tunnel gesondert vergütet.

Die Anforderungen der Ringspaltverfüllung werden vom AG festgelegt, diese umfassen die Art der Verfüllung (Baustoff, stützende und/oder drainierende Wirkung), das Vorgehen bei der Hinterfüllung (Zeitpunkt, Füllhöhe) sowie den Widerstand gegen chemische Beanspruchung durch Bergwasser. Der Bereich der Sohle wird aus verfahrenstechnischen Gründen aus Mörtel hergestellt.

### 6.6.5 Norwegen

Obwohl Norwegen tendenziell härteres und standfesteres Gebirge besitzt, werden auch dort bei Vortrieb mittels Schild- oder Doppelschildmaschinen Tübbinge eingesetzt und diese mit Mörtel kraftschlüssig mit dem Gebirge verbunden. Dabei wird nicht nur das Gebirge stabilisiert, sondern der geschlossene Tübbingring dient auch als Schutz vor herabfallenden Steinen, Frost sowie vor dem Eindringen des Bergwassers.

## 6.7 Mehrausbruch

In allen Standards wird zwischen arbeitstechnisch bedingtem und geologisch bedingtem Mehrausbruch unterschieden und dementsprechend vergütet. Die folgenden Abbildungen zeigen die schematischen Darstellungen der ÖNORM B 2203-2, DIN 18312, SIA 118/198 und der Südtiroler ATV 2019.

### 6.7.1 Österreich

Der Mehrausbruch wird in der ÖNORM folgendermaßen unterschieden:

Unvermeidbarer Mehrausbruch, Mehrausbruch durch unsachgemäße Arbeit, Mehrausbruch bei TBM-S, TBM-DS und SM mit Tübbingausbau.

Beim unvermeidbaren Mehrausbruch mit TBM-O und TBM-A hat die Ausmaßfeststellung vor Aufbringen des Spritzbetons zu erfolgen. Das Schuttern und Abtransportieren dieses Materials sowie das Auffüllen des Mehrausbruchs mit Spritzbeton wird mit weiteren von den Vortriebsklassen unabhängigen Positionen abgegolten. Für die Auswirkungen auf die zeitgebundenen Kosten sind dabei projektspezifische Regelungen zu vereinbaren.

Beim Vortrieb mittels TBM-S, TBM-DS und SM mit Tübbingausbau werden keine Mehrausbrüche festgestellt. Ebenfalls bei Mehrausbrüchen aufgrund von unsachgemäßer Arbeit erfolgt keine Feststellung und keine weitere Vergütung.

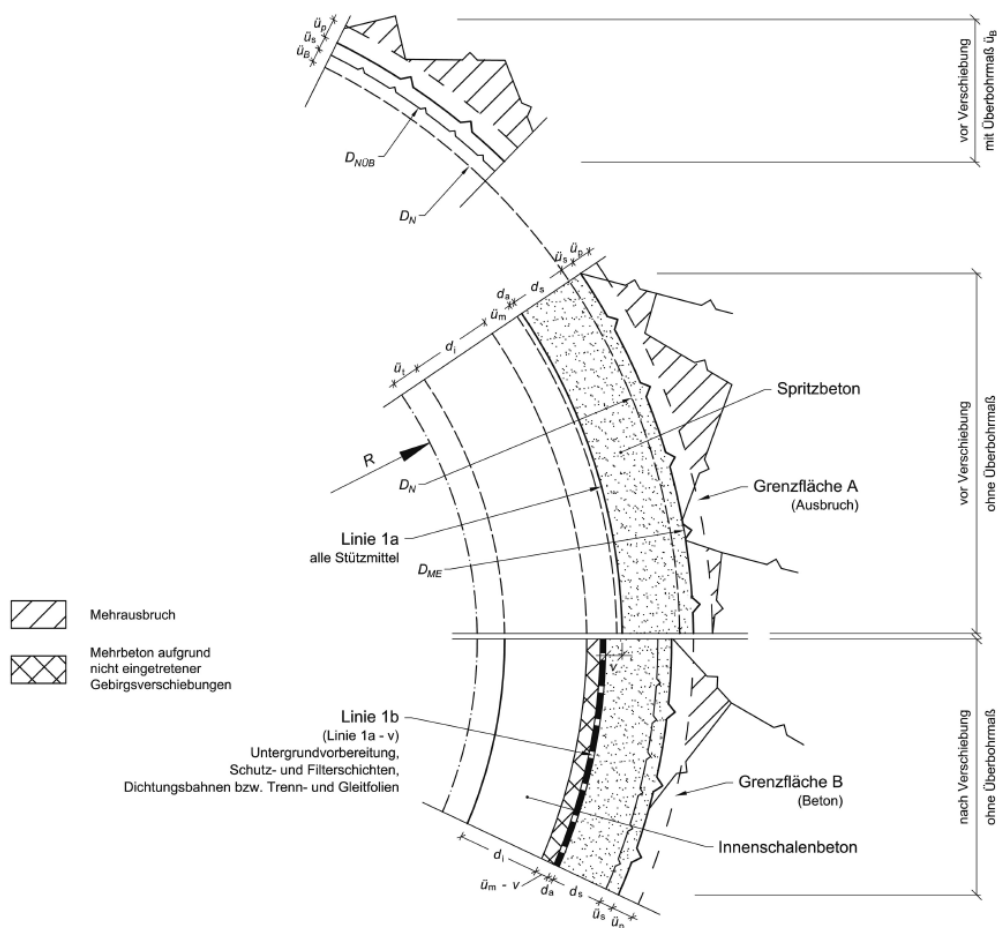


Abbildung 27: Grenzflächen Mehrausbruch ÖNORM B 2203-2 [17]

#### Legende

- A Grenzfläche A, bestimmt durch  $D_{ME} + ü_p$
- $d_a$  plangemäße Dicke der Maßnahmen für die Untergrundvorbereitung, Schutz- und Filterschichten, Abdichtung sowie Trenn- und Gleitfolien
- $d_i$  plangemäße Dicke der Innenschale
- $d_s$  festgelegte Dicke des Spritzbetons als Stützmaßnahme
- $D_{ME}$  maximaler effektiver Bohrdurchmesser mit nicht-abgenutzten Bohrwerkzeugen
- $D_N$  nominaler Bohrdurchmesser; vom AG vorgegeben;  $D_N = 2 (R + ü_t + d_i + ü_m + d_a + d_s)$
- $D_{NÜB}$  nominaler Bohrdurchmesser mit Überbohrmaß;  $D_{NÜB} = D_N + 2 ü_B$
- $R$  Radien des lichten Profils (Minimalprofil); vom AG vorgegeben
- $ü_B$  Überbohrmaß; vom AG vorgegeben
- $ü_m$  festgelegtes Übermaß
- $ü_p$  Maß zur Definition der Grenzfläche; vom AG vorgegeben
- $ü_s$  Überschneidung aus der Sphäre AN für Werkzeugabnutzung, Kurvenfahrt u. a.; vom AN anzugeben
- $ü_t$  in der Ausschreibung vorgegebenes Maß zur Kompensation von TVM-Vortriebsabweichungen und Schalungstoleranzen
- $v$  eingetretene Gebirgsverschiebungen

Abbildung 28: Grenzflächen Mehrausbruch Legende ÖNORM B 2203-2 [17]

### 6.7.2 Deutschland

Mehrausbruch aufgrund der Arbeitsweise des Arbeitnehmers ist zu vermeiden, er ist dazu verpflichtet, diese Hohlräume kraftschlüssig zu verfüllen. Das Laden und Fördern dieses Mehrausbruches werden als Nebenleistung abgegolten, sie bleiben jedoch als Ausbruchmengen unberücksichtigt.

Nicht vermeidbare Mehrausbrüche sind sofort zu melden und werden anschließend als besondere Leistung vergütet. Die daraus entstandenen bzw. bereits angetroffenen Hohlräume sind, soweit notwendig, kraftschlüssig zu verfüllen. Die Ausbruchmengen werden durch Aufmaß des entstandenen Hohlraums ermittelt.

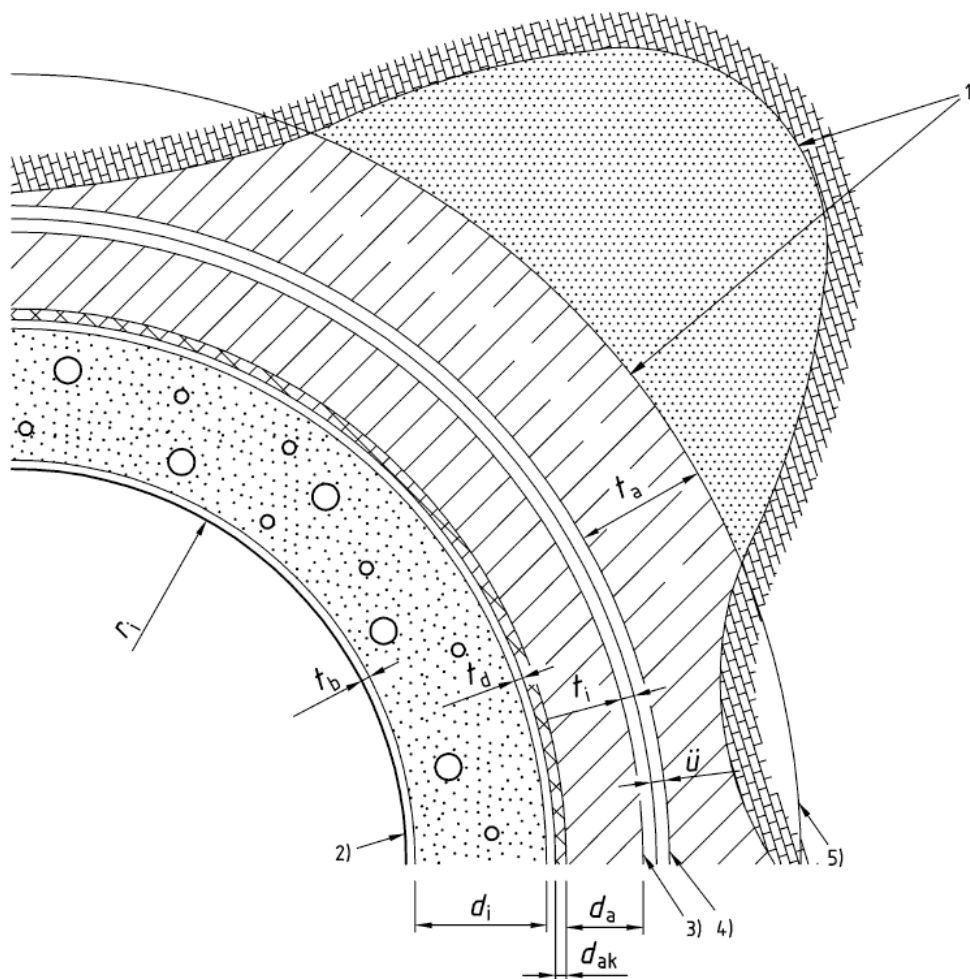


Abbildung 29: Grenzflächen Mehrausbruch DIN 18312 [23]

### Legende

- $r_i$  Planmäßiger Radius der inneren Tragwerksbegrenzung  
 $d_i$  Planmäßige Dicke der Innenschale  
 $d_{ak}$  Dicke der Ankerköpfe und der Abdichtung  
 $d_a$  Planmäßige Dicke der Außenschale  
 $t_b$  Bautoleranz der Innenschale  
 $t_d$  Deformationstoleranz der Außenschale  
 $t_i$  Innentoleranz  
 $t_a$  Außentoleranz  
 $ii$  Überhöhung zum Ausgleich nicht vermeidbarer Verformungen in Problemzonen

$$L_{AS} = L_{TW} + t_b + d_i + t_d + d_{ak} + d_a + t_i + ii$$

$$L_I = L_{AS} - t_i - ii$$

$$L_A = L_{AS} + t_a$$

- 1) Grenzlinien des geologisch bedingten, unvorhersehbaren, unvermeidbaren Mehrausbruchs
- 2)  $L_{TW}$ -Linie (innere Tragwerksbegrenzungslinie)
- 3)  $L_I$ -Linie
- 4)  $L_{AS}$ -Linie (Ausbruchssollprofil)
- 5)  $L_A$ -Linie (äußere Ausbruchtoleranz)

Abbildung 30: Grenzflächen Mehrausbruch Legende DIN 18312 [23]

### 6.7.3 Südtirol

Vermeidbare, durch die Arbeitsweise des AN geschuldete Mehrausbrüche sind zu unterlassen. Die daraus entstandenen Hohlräume sind mit geeigneten Materialien zu verfüllen. Das Lösen, Laden, Fördern und Entsorgen des Materials sind in der ATV als Nebenleistungen definiert. Für die Ausbruchmengen bleiben vermeidbare Mehrausbrüche unberücksichtigt.

Nicht vermeidbare Mehrausbrüche sind dem AG unverzüglich zu melden und werden anschließend als besondere Leistungen vergütet. Diese Hohlräume sind nur soweit notwendig zu verfüllen. Mittels Raummaßes wird die Größe des Mehrausbruches festgestellt, dies ist jedoch noch vor der Aufbringung des Spritzbetons zu ermitteln, die Vergütung erfolgt dabei mittels einer eigenen Position. Auch das Auffüllen des Mehrausbruches mit Spritzbeton ist mit einer eigenen Position definiert.

Während des Vortriebes mit TBM-S, TBM-DS oder SM mit Tübbingausbau werden die Ausbruchmengen des Mehrausbruches nicht festgestellt.



### 6.7.4 Schweiz

In der Schweiz werden vom AN verschuldete Mehrausbrüche und die dazugehörigen Mehrmengen wie beispielsweise Ausbruch, Ausbruchsicherung, Auffüllung, Verkleidung und Innenausbau nicht gesondert vergütet. Bei geologisch bedingtem Mehrausbruch werden Aufladen, Transport und Füllen des Überprofils sowie die Sicherung für das Ausbruchprofil vergütet.

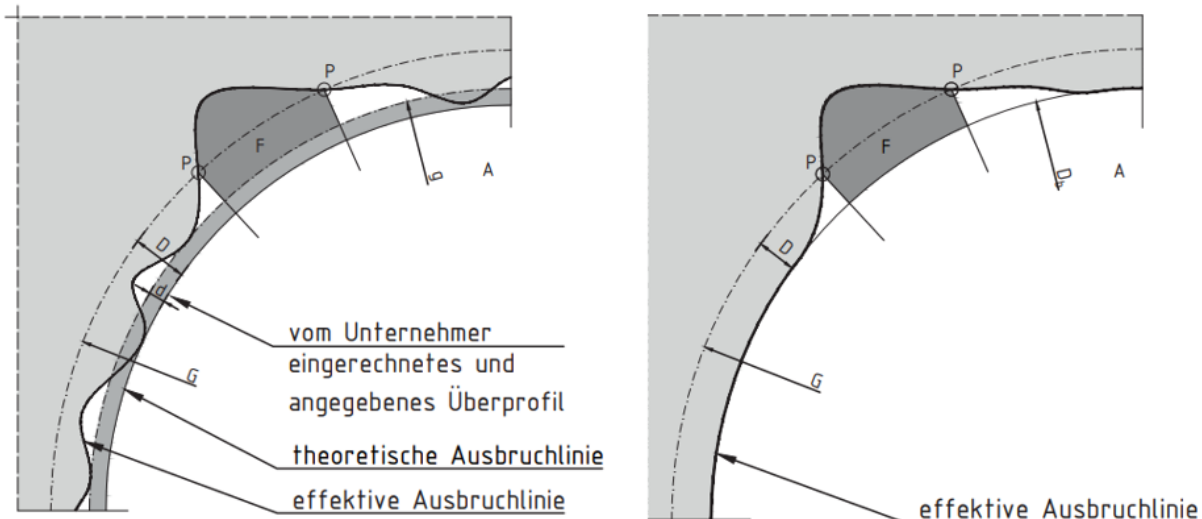


Abbildung 33: Grenzflächen Mehrausbruch SIA 118/198 [22]

- A theoretische Ausbruchfläche
- D Abstand zwischen der theoretischen Ausbruchlinie und der Grenzlinie G
- d Abstand zwischen der theoretischen Ausbruchlinie und der Grenzlinie g
- g bis zu dieser Linie ist das Überprofil im Ausbruchpreis eingerechnet
- G Grenzlinie, abhängig von D
- F Fläche, für die das geologisch bedingte Überprofil vergütet wird
- P Schnittpunkt der Grenzlinie G mit der effektiven Ausbruchlinie

- A theoretische Ausbruchfläche
- D Abstand zwischen der theoretischen Ausbruchlinie und der Grenzlinie G
- D<sub>0</sub> Bohrdurchmesser mit abgenutztem Werkzeug
- G Grenzlinie, abhängig von D
- F Fläche, für die das geologisch bedingte Überprofil vergütet wird
- P Schnittpunkt der Grenzlinie G mit der effektiven Ausbruchlinie

Abbildung 34: Grenzflächen Mehrausbruch Legende SIA 118/198 [22]

### 6.7.5 Norwegen

Der Mehrausbruch wird gemäß dem Kapitel F „Erdarbeiten“ und dem dazugehörigem Unterkapiteln FD „Aushub von Lockermassen“, FH „Aushub von Felsen“ und FM „Beladung und Transport“ vergütet. Darin steht fest, dass Mehrausbrüche, welche durch unsachgemäßes Arbeiten (ungenaueres Bohren oder unvorsichtiges Sprengen) entstanden sind, nicht gesondert vergütet werden. Nicht vermeidbare Mehrausbrüche dagegen werden mit folgenden Regeln berücksichtigt:

Mehrausbrüche von weniger als 0,5 m außerhalb des geplanten Querschnittes werden nicht weiter gemessen. Wenn diese mehr als 0,5 m über den entworfenen Querschnitt hinausgehen, dann werden die Mehrausbrüche profiliert und in die Mengen werden dem Aufladen und Transport beigerechnet.

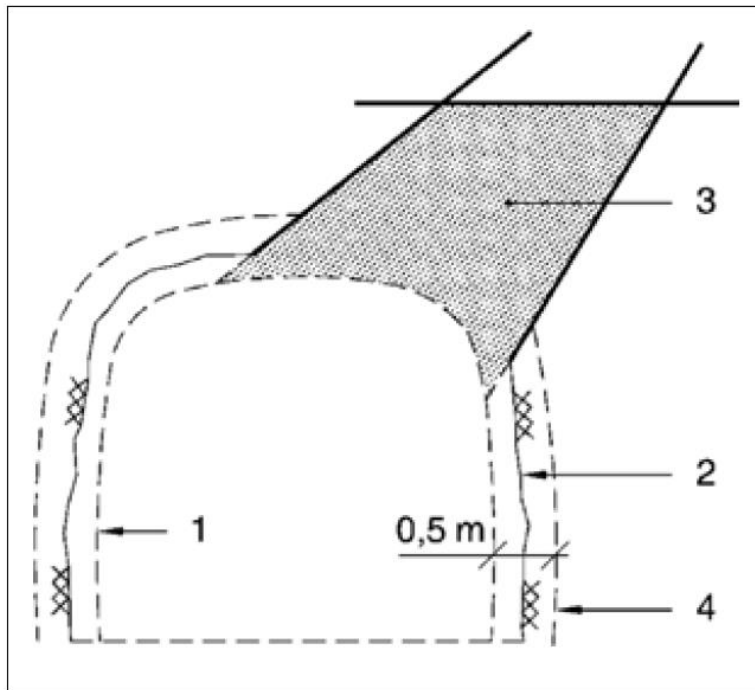


Abbildung 35: Mehrausbruch Regelung Norwegen [31]

### 6.7.6 Vergleich Vorhaltemaß und Überhöhung

Vorhaltemaße und Überhöhungen werden berücksichtigt, um bei der Planung auftretende bautechnisch bedingte Herstelltoleranzen oder erwartbare Verformungen des Bauwerks des aufgefahrenen Hohlraumrands einzubeziehen. Dies gewährleistet im Endzustand die Einhaltung der erforderlichen Geometrie.

|             | Österreich                                                                                              | Deutschland                                                                             | Schweiz                                                                                                                                      | Südtirol                                                                                                 |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vorhaltemaß | Vorhaltemaß<br>Gewölbe +<br>Bogenstich<br><br>ü <sub>p</sub> : Maß zur<br>Definition der<br>Grenzfläche | t <sub>b</sub> : Bautoleranz der<br>Innenschale                                         | Gesamttoleranz:<br>- Verformungen des<br>Tragwerks<br>- Herstellungsgenauigkeiten<br>- Vermessung<br>Achsabweichungen<br>(Vermessungsfehler) | Vorhaltemaß<br>Gewölbe +<br>Bogenstich                                                                   |
|             |                                                                                                         | t <sub>i</sub> : Innentoleranz                                                          |                                                                                                                                              | ü <sub>p</sub> : Überprofil bis<br>zur Grenzfläche A                                                     |
| Überhöhung  | ü <sub>m</sub> :<br>festgelegtes<br>Übermaß                                                             | t <sub>d</sub> :<br>Deformationstolera<br>nz der Außenschale                            | d: Abstand zwischen der<br>theoretischen Ausbruchlinie und<br>der Grenzlinie g                                                               | ü <sub>m</sub> : Überhöhung<br>zum Ausgleich<br>nicht vermeidbarer<br>Verformungen in<br>Problemzonengen |
|             |                                                                                                         | ü: Überhöhung zum<br>Ausgleich nicht<br>vermeidbarer<br>Verformungen in<br>Problemzonen |                                                                                                                                              |                                                                                                          |

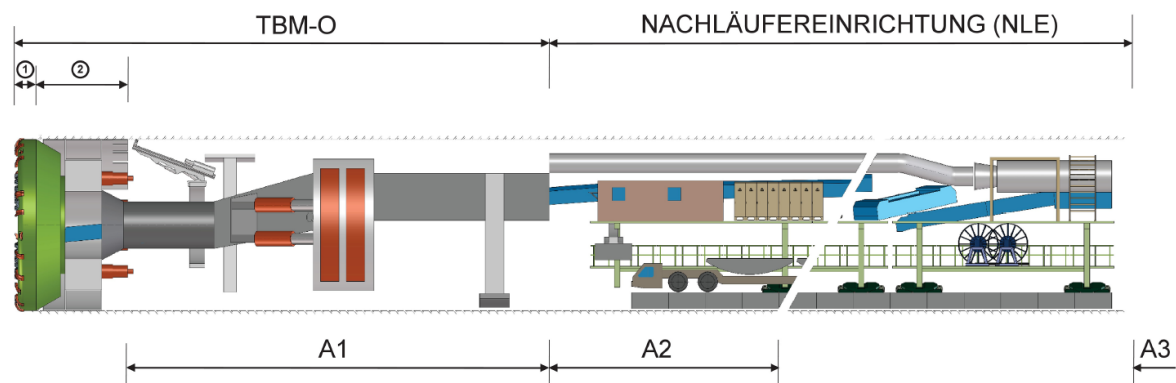
Tabelle 4: Vergleich Übermaß und Überhöhung [39]



## 6.8 Arbeitsbereiche

### 6.8.1 Österreich

Die Arbeitsbereiche einer TVM werden in drei Bereiche unterteilt. Der Arbeitsbereich 1 (A1) umfasst dabei beispielsweise bei einer TMB-O den Maschinenbereich hinter dem Firstschild bis Ende des Maschinenbereichs, der Arbeitsbereich 2 (A2) den Bereich der Nachläufereinrichtung (NLE) für den Stützmitteleinbau. Der Arbeitsbereich 3 (A3) ist der gesamte Bereich hinter der NLE.

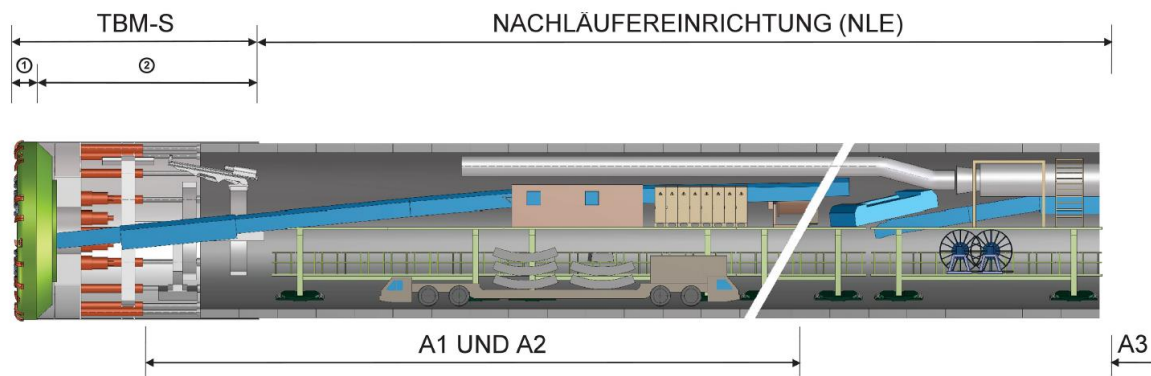


#### Legende

|                   |                                                                   |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Arbeitsbereich A1 | Maschinenbereich hinter dem Firstschild bis Ende Maschinenbereich |
| Arbeitsbereich A2 | Bereich der NLE für Stützmitteleinbau                             |
| Arbeitsbereich A3 | Bereich hinter der NLE                                            |
| ①                 | Bohrkopf                                                          |
| ②                 | Bohrkopfträger und Firstschild                                    |

Abbildung 36: Arbeitsbereich TBM-O [17]

Bei den restlichen Vortriebsmaschinen, welche mit Schilden geschützt sind, werden die Arbeitsbereiche 1 und 2 gesamt als der Bereich für Tübbingeinbau und Tübbingbettung zusammengefasst. Der Bereich hinter der NLE wird jedoch auch hier als Arbeitsbereich 3 definiert.



#### Legende

|                           |                                              |
|---------------------------|----------------------------------------------|
| Arbeitsbereiche A1 und A2 | Bereich für Tübbingeinbau und Tübbingbettung |
| Arbeitsbereich A3         | Bereich hinter der NLE                       |
| ①                         | Bohrkopf                                     |
| ②                         | Schild                                       |

Abbildung 37: Arbeitsbereich TBM-S [17]

### 6.8.2 Deutschland

In der DIN 18312 werden dazu keine gesonderten Arbeitsbereiche definiert.

### 6.8.3 Südtirol

Die Arbeitsbereiche in Südtirol werden jenen der ÖNORM B 2203-2 gleichgesetzt.

### 6.8.4 Schweiz

Die Schweiz umfasst die Arbeitsbereich L1, L2 und L3, sowie die Arbeitszonen L1\*, L2\* und L3\*, welche folgendermaßen definiert sind:

L1: Maschinenbereich

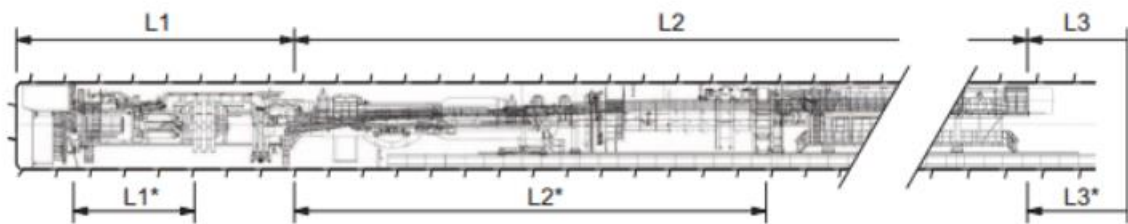
L2: Nachläuferbereich

L3: rückwertiger Bereich bis 200 m hinter Nachläufer

L1\*: Arbeitszone für Ausbruchsicherung im Maschinenbereich

L2\*: Arbeitszone für Ausbruchsicherung im Nachläuferbereich

L3\*: Arbeitszone für Ausbruchsicherung im rückwertigen Bereich



Bezeichnung der Arbeitsbereiche und -zonen:

- L1 Maschinenbereich
- L1\* Arbeitszone für Ausbruchsicherung im Maschinenbereich
- L2 Nachläuferbereich
- L2\* Arbeitszone für Ausbruchsicherung im Nachläuferbereich
- L3 rückwärtiger Bereich bis 200 m hinter Nachläufer
- L3\* Arbeitszone für Ausbruchsicherung im rückwärtigen Bereich

Abbildung 38: Arbeitsbereich TBM ohne Schild [23]

Die Längen der Arbeitsbereiche für MUF und MUL sind von der Breite des ausgebrochenen Querschnittes abhängig. Dabei gilt:

| Längen der Arbeitsbereiche   |                 |                     |                         |
|------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| Ausbruchbreite <sup>1)</sup> | Brustbereich L1 | Vortriebsbereich L2 | Rückwärtiger Bereich L3 |
| ≤ 3 m                        | 10 m            | 10 m                | 150 m                   |
| ≤ 6 m                        | 15 m            | 15 m                | 200 m                   |
| ≤ 10 m                       | 15 m            | 20 m                | 250 m                   |
| > 10 m                       | 15 m            | 30 m                | 300 m                   |

<sup>1)</sup> Es gilt die Breite des ausgebrochenen Querschnitts.

Abbildung 39: Arbeitsbereiche SPV, MUF, MUL [22]

## 6.9 Erschwernisse

### 6.9.1 Österreich

In Österreich werden die Erschwernisse aufgrund des Wassers und der Klebrigkeit einzeln beschrieben. Die Vergütung kann für beide Erschwernisse in je zwei Varianten erfolgen.

#### 6.9.1.1 Wassererschwernisse:

Variante 1: Grenzwassermenge wird definiert und diese wird überschritten

→ Vergütung als Sondervortrieb

Variante 2: keine Grenzwassermenge, jedoch sind infolge des Bergwassers zusätzliche Aufwendungen unvermeidlich.

→ Vergütung über festgelegte Zusatzzeiten, bei einem zusätzlichen Zeitaufwand von 35 Minuten pro Hub → Vergütung als Sondervortrieb

#### 6.9.1.2 Erschwernisse aufgrund von Klebrigkeit:

Es werden projektspezifisch Grenzen der Verklebungsneigung festgelegt.

Variante 1: Grenzen der Verklebungsneigung werden definiert und diese werden überschritten

→ Vergütung über Positionen und zusätzlichen Vortriebszeiten

Variante 2: Keine Grenze der Verklebungsneigung, jedoch sind infolge der Verklebungsneigung zusätzliche Aufwendungen unvermeidlich.

→ Vergütung über festgelegte Zusatzzeiten und zusätzliche Material, bei einem zusätzlichen Zeitaufwand von 35 Minuten pro Hub → Vergütung als Sondervortrieb

## 6.9.2 Deutschland

### 6.9.2.1 Wasserhaltung und Erschwernisse aufgrund von Wasser

Ausschreibung:

- Grenzwassermenge für Grund- oder Bergwasser mit Festlegung des zu berücksichtigenden Bereichs
- Vorgaben für die Messung des anfallenden Wassers.
- Art und Umfang von Leistungen zum Fassen, Ableiten, Aufbereiten und Einleiten anfallenden Wassers

Abrechnungseinheit:

- Beseitigung des Wassers nach Raummaß (l, m<sup>3</sup>)

Ausführung:

- Fassen und Aufbereiten sowie das Ableiten des Wassers bis zur zugewiesenen Einleitstelle
- Überschreitung der Grenzwassermenge: AG unverzüglich mitteilen, erforderliche Leistungen gemeinsam festzulegen

Nebenleistungen:

- Beseitigen des Brauchwassers
- Leistungen bei den Ausbruch- und Sicherungsarbeiten, die durch Zutritt von Bergwasser bis zur Grenzwassermenge erforderlich werden

Besondere Leistungen:

- Leistungen bei den Ausbruch- und Sicherungsarbeiten, die durch Zutritt von Bergwasser über die vorgegebene Grenzwassermenge hinaus erforderlich werden

Ermittlung:

- Abzurechnende Wassermengen werden aus den aus dem Hohlraum abgeführten Wassermengen abzüglich der zugeführten Brauchwassermengen ermittelt.

In der DIN 18312 sind keine weiteren Erschwernisse (bspw. Klebrigkeit o.Ä.) definiert.

## 6.9.3 Südtirol

### 6.9.3.1 Wasserhaltung und Erschwernisse aufgrund von Wasser

Ausschreibung:

- Art und Umfang der Maßnahmen zum Fassen, Ableiten und gegebenenfalls Behandeln des Bergwassers während der Bauausführung.
- Grenzwassermengen für Bergwasser

#### Abrechnungseinheit:

- Aufwendungen und Erschwernisse bei den Ausbruch- und Sicherungsarbeiten durch Zutritt von Bergwasser über die Grenzwassermenge hinaus als Zulage zum Ausbruch nach Raummaß ( $\text{m}^3$ ) oder Längenmaß (m), getrennt für steigenden und fallenden Vortrieb, in Abhängigkeit von der Wassermenge und der Vortriebsklasse
- Vorhalten und Betreiben von Pumpenanlagen für die Wasserhaltung nach Einsatzzeit (d, h) oder Energieverbrauch (kWh), getrennt nach installierter Leistung der Pumpenanlage,
- Ableiten von Gebirgswasser für die Wasserhaltung nach Längenmaß (m), getrennt nach Durchmesser oder Nutzquerschnitt
- Sammeln und Ableiten von Gebirgswasser nach Flächenmaß ( $\text{m}^2$ ) oder Längenmaß (m), getrennt nach Art

#### Ausführung:

- Das Gebirgswasser ist unmittelbar an den jeweiligen Austrittsstellen zu fassen und mittels Rohrleitungen und Kanälen zu den nächstgelegenen Sammelstellen zu leiten
- Reichen die vereinbarten Maßnahmen für das Ableiten von Bergwasser nicht aus, ist der Auftraggeber unverzüglich zu unterrichten
- Sämtliche Maßnahmen zur sachgemäßen Messung, Ableiten Wasserhaltung

#### Nebenleistungen:

- Beseitigen des Brauchwassers
- Aufwendungen und Erschwernisse bei den Ausbruch- und Sicherungsarbeiten, die durch Zutritt von Bergwasser bis zur Grenzwassermenge entstehen

#### Besondere Leistungen:

- Aufwendungen bei den Ausbruch- und Sicherungsarbeiten, die durch Zutritt von Bergwasser über die Grenzwassermenge hinaus entstehen
- Aufwendungen im Zusammenhang mit dem Sammeln, Fördern und Ableiten von Gebirgswasser ab einer festgelegten Gesamtwassermenge

#### Ermittlung:

- Abzurechnende Wassermengen werden aus den aus dem Hohlraum abgeführten Wassermengen abzüglich der zugeführten Brauchwassermengen ermittelt.
- Wassermessung muss täglich ordnungsgemäß durchgeführt werden, AN muss schriftlich für Aufpreis ansuchen

### 6.9.3.2 Weitere Erschwernisse

- Aufwendungen und Erschwernisse bei den Ausbrucharbeiten durch hohen Verschleiß der Bohrwerkzeuge, Klebrigkeit, Mixed-Face-Bedingungen, Hindernisse, Blockigkeit, usw. als Zulage zum Ausbruch nach Raummaß (m<sup>3</sup>) oder Längenmaß (m), getrennt nach Art und Vortriebsklassen
- Für Nischen und Querschlagsanschlüsse sind Positionen etwaige Erschwernisse und Mehraufwendungen beim Vortrieb vorzusehen

## 6.9.4 Schweiz

### 6.9.4.1 Wasserhaltung und Erschwernisse aufgrund des Wassers beim Vortrieb

Besondere Maßnahmen zum Ableiten des Wassers werden in den Ausschreibungsunterlagen festgehalten. Sollte jedoch mehr Wasser vorherrschen, als im Werksvertrag dokumentiert, dann werden umzusetzenden Maßnahmen von Bauherren und Unternehmer gemeinsam festgelegt. Allgemein gilt, dass das Fassen, Um- und Ableiten des anfallenden Wassers inklusive des Brauchwassers gesondert vergütet wird. Meteorwasser (Wasser aus Niederschlägen) dagegen wird nicht gesondert vergütet.

Außerordentliche Wassereinbrüche liegen in der Risikosphäre des Auftraggebers, bei Auftreten eines solchen Ereignisses müssen vom AN sofortige Maßnahmen zur Schadensminimierung umgesetzt werden und der AG muss unmittelbar in Kenntnis gesetzt werden.

Während des Vortriebs im Fels hat der Wasserdrang verminderte Arbeitsleistungen zur Folge. Diese daraus entstehende Leistungsminderung wird unter Berücksichtigung von Reduktionsfaktoren nach Gruppenstunden vergütet. Die Lohnkosten sind dabei im Preis der Gruppenstunden enthalten, die Baustelleneinrichtung wird infolge eines verlängerten Vorhaltens mitberücksichtigt.

Die Vergütung ist dabei abhängig von der Vortriebsneigung, der Ausbruchfläche und der Wassermenge. Wenn nicht vertraglich anders vereinbart, gilt die folgende Tabelle für die Reduktionsfaktoren der Gruppenstunden bei Wasseranfall:

| Tunnel mit theoretischer Ausbruchfläche<br>$A \leq 25 \text{ m}^2$ bzw. $\varnothing \leq 5 \text{ m}$ |                | Tunnel mit theoretischer Ausbruchfläche<br>$A > 25 \text{ m}^2$ bzw. $\varnothing > 5 \text{ m}$ |                | Schächte        |                | Reduktionsfaktor<br>der Gruppen-<br>stunden |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------------------------------------|
| steigend<br>l/s                                                                                        | fallend<br>l/s | steigend<br>l/s                                                                                  | fallend<br>l/s | steigend<br>l/s | fallend<br>l/s |                                             |
| 10–20                                                                                                  | 5–10           | 10–20                                                                                            | 5–10           | 2–5             | 1–2            | 0,2                                         |
| >20–30                                                                                                 | >10–20         | >20–40                                                                                           | >10–20         | >5–10           | >2–5           | 0,4                                         |
| >30–40                                                                                                 |                | >40–60                                                                                           | >20–30         |                 |                | 0,6                                         |

Abbildung 40: Reduktionsfaktor der Gruppenstunden bei Wasseranfall [22]

Der Beginn der Vergütung muss vom AN und AG gemeinsam festgehalten werden, während der Dauer der Vergütung müssen regelmäßige Messungen durchgeführt werden. Die

Wassermenge wird anhand einer maßgebenden Strecke, zumeist 100 Meter hinter der Ortsbrust, bestimmt.

Beim Vortrieb im Lockergestein wird das Vorgehen projektspezifisch in den Ausschreibungsunterlagen festgelegt.

#### **6.9.4.2 Sonstige Erschwernisse**

Sonstige Erschwernisse wie beispielsweise Gasaustritt oder die Ausführung besonderer Maßnahmen werden auch wie der Wasserdrang gesondert vergütet.

Der erschwerte Vortrieb in Lockergestein sowie der erschwerte Vortrieb in zu Lockergestein zerbrochenem Fels fallen hinsichtlich der Erschwernisse unter die allgemeinen Risiken des AN. Außerdem gehören zum Risikobereich des AN die schlechte Abbaubarkeit durch sehr unterschiedlich harte und weiche Felspartien im gleichen Ausbruchsquerschnitt sowie Störungen im Lade- oder Fördersystem z.B. infolge Klebrigkeit des gelösten Materials.

#### **6.9.5 Norwegen**

In Norwegen werden die Erschwernisse mit Einheitspreisen für Felsstützmaßnahmen und den zeitlichen Äquivalenten abgegolten. Die zusätzlichen Arbeiten werden dabei als zeitliche Parameter berücksichtigt, welche anschließend Einfluss auf die laufenden Kosten und die vertragliche Bauzeit aufweisen.



## 6.10 Übersicht

| Unterscheidungsmerkmale    | ÖNORM B 2203-2                                                                                                                  | DIN 18312                                                                                                                                                                     | ATV 2019 (Südtirol)                                                                                                                                                               | SIA                                                                                      | NS 3420                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aufbau                     | 1. Anwendungsbereich<br>2. Normative Verweisung<br>3. Begriffe<br>4. Verfahrensbestimmung<br>5. Vertragsbestimmung<br>- Anhänge | 0 Hinweise für das Aufstellen der Leistungsbeschreibung<br>1 Geltungsbereich<br>2 Stoffe, Bauteile<br>3 Ausführung<br>4 Nebenleistungen, Besondere Leistungen<br>5 Abrechnung | 0 Hinweise für die Erstellung des Projektes<br>1 Geltungsbereich<br>2 Stoffe, Bauteile; Boden und Fels<br>3 Ausführung<br>4 Nebenleistungen, Besondere Leistungen<br>5 Abrechnung | Bestehend aus:<br>SIA 197<br>SIA 197/1<br>SIA 197/2<br>SIA 198<br>SIA 199<br>SIA 118/198 | 0 Einweisung<br>1 Gemeinsame Bestimmungen<br>2 Aufteilung, Inhalt und Stichwortliste<br>Weitere Kapitel: A, B, BE, BM, BN, BQ, BR, BS, BW, CD, CH, CU, D, F, G, J, K, L, N, P, PN, Q, R, SB, SF, SH, SL, T, U, V, W, X, Y, YB, Z, ZK. |
| Art der Norm               | Werkvertragsnorm                                                                                                                | Allgemeine Technische Vertragsbedingungen (ATV)                                                                                                                               | Allgemeine Technische Vertragsbedingungen (ATV)                                                                                                                                   | SIA 118/198: Allgemeine Bedingungen<br>SIA 198: Ausführungsnorm                          | Normensammlung für Ausschreibungen, Mengenlisten, Materialanforderungen und Ausführung                                                                                                                                                |
| Risiko Baugrund            | Auftraggeber                                                                                                                    | Auftraggeber                                                                                                                                                                  | Auftraggeber                                                                                                                                                                      | Auftraggeber                                                                             | Auftraggeber                                                                                                                                                                                                                          |
| Risiko Ausführung          | Auftragnehmer                                                                                                                   | Auftragnehmer                                                                                                                                                                 | Auftragnehmer                                                                                                                                                                     | Auftragnehmer                                                                            | Auftragnehmer                                                                                                                                                                                                                         |
| Risikoverteilung           | Matrix                                                                                                                          | Vortriebsklassen                                                                                                                                                              | Vortriebsklassen                                                                                                                                                                  | Sicherungsklassen, Abbauklassen und Bohrklassen                                          | Zeitliche Äquivalente                                                                                                                                                                                                                 |
| Standardgemäße Vertragsart | Einheitspreisvertrag                                                                                                            | Einheitspreisvertrag                                                                                                                                                          | Einheitspreisvertrag                                                                                                                                                              | Einheitspreisvertrag                                                                     | Einheitspreisvertrag                                                                                                                                                                                                                  |



| <b>Unterscheidungsmerkmale</b>                        | <b>ÖNORM B 2203-2</b>                                                                   | <b>DIN 18312</b>                                                                                       | <b>ATV 2019 (Südtirol)</b>                                                                                          | <b>SIA 118/198</b>                                         | <b>NS 3420</b>                                                                                     |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gebirgscharakterisierung                              | Gemäß ÖGG-Richtlinie                                                                    | Gemäß DIN-Normen „Geotechnische Erkundung und Untersuchung“                                            | „Allgemein anerkannte Klassifikationssysteme von Gebirgsarten“<br>ÖGG, Bieniawski, Barton, ISRM                     | Gemäß SIA 199 „Erfassen des Gebirges im Untertagbau“       | Kapitel D: Untersuchungen, Aufzeichnungen, Kontrolle<br>→ Q-System (Barton)                        |
| Einteilung des Gebirges                               | Gebirgsverhaltenstypen                                                                  | Homogenbereiche                                                                                        | Gebirgsklassen                                                                                                      | Homogenebereiche                                           | Gebirgsmassenklassen (rock mass class)                                                             |
| Leistungsbeschreibung                                 | Gemäß ÖNORM B 2118                                                                      | Gemäß DIN 18299 inkl. Abschnitt 0 Hinweise                                                             | „Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art“                                                                   | SIA 118 „Allgemeine Bedingungen für Bauarbeiten“           | NS 3420 Part 1 „General conditions“                                                                |
| Trennung von kontinuierlichem und zyklischem Vortrieb | Getrennt 2201-1 und 2203-2                                                              | Gemeinsam in 18312                                                                                     | Getrennt in „Untertagebauarbeiten mit kontinuierlichem Vortrieb“ und „Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb“ | Sprengvortrieb: SPV<br><br>TVM-Vortrieb: TBM, MUF, MUL, SM | Kapitel F: Erdarbeiten Teil 1: Sprengvortrieb<br><br>Kapitel G: Erdarbeiten Teil 2: TBM-Vortrieb   |
| Einteilung TVM                                        | TBM-O und TBM-A<br>TBM-S und TBM-DS<br>SM<br>Unterscheidung Vortriebsklassen TBM und SM | Unterscheidung nur in den Vortriebsklassen TBM, VS und TS                                              | TBM-O und TBM-A<br>TBM-S und TBM-DS<br>SM<br>Unterscheidung Vortriebsklassen TBM und SM                             | TBM<br>MUF<br>MUL<br>SM                                    | TBM<br>(aufgrund der Geologie keine genauere Unterteilung)                                         |
| Vortriebsklassifizierung                              | TBM-O / TBM-A: Matrix<br><br>TBM-S / TBM-DS: Matrix<br><br>SM: Matrix                   | TBM: TBM 1 - TBM 4<br><br>SM – Vollschnittabbau: VS 1 - VS 3<br><br>SM – Teilschnittabbau: VS 1 - VS 2 | TBM: VF1 - VF6<br><br>SM: VS1 – VS3                                                                                 | Sicherungsklasse, Abbauklasse und Bohrklasse               | Vortriebsklassifizierung und Festlegung der Sicherheitsmaßnahmen auf Grundlage des Q-Systems (A-G) |
| Leistungsverzeichnis                                  | In Einzelpositionen gegliedert                                                          | In Einzelpositionen gegliedert                                                                         | In Einzelpositionen gegliedert                                                                                      | In Einzelpositionen gegliedert                             | In Einzelpositionen gegliedert                                                                     |
| Vortriebseinteilung                                   | Regelvortrieb<br>Sondervortrieb<br>Ereignisbewältigung                                  | Vortrieb<br>Stillstand                                                                                 | Vortrieb<br>Stillstand                                                                                              | Vortrieb<br>Vortriebsunterbrüche<br>Andere Stillstände     | k.A.                                                                                               |

| <b>Unterscheidungsmerkmale</b> | <b>ÖNORM B 2203-2</b>                                                                                                 | <b>DIN 18312</b>                                                                                               | <b>ATV 2019 (Südtirol)</b>                                                                                                                                                                                                                                           | <b>SIA 118/198</b>                                                                                                                                                       | <b>NS 3420</b>                                                                                                                                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Weitere wichtige Regelwerke    | ÖGG-Planungsrichtlinien<br>ÖNORM B 2118<br>ÖNORM B 2203-1 (für zyklische Vortriebe)                                   | DIN-Normen „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen“ und „Geotechnische Erkundung und Untersuchung“ | DIN- und UNI- Normen<br>ÖNORM B 2203-2                                                                                                                                                                                                                               | SIA 197<br>SIA 197/1<br>SIA 197/2<br>SIA 198<br>SIA 199<br>SIA 118/198                                                                                                   | NS 3420:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Part 0</li> <li>• Part 1</li> <li>• Part D</li> <li>• Part F</li> <li>• Part G</li> <li>• Part L</li> </ul> |
| Mengenermittlung               | k.A.                                                                                                                  | Näherungsverfahren                                                                                             | Näherungsverfahren                                                                                                                                                                                                                                                   | k.A.                                                                                                                                                                     | K.A.                                                                                                                                                             |
| Ermittlung von Maschinendaten  | Drehmomentenfaktor                                                                                                    | keine                                                                                                          | keine                                                                                                                                                                                                                                                                | Testhübe                                                                                                                                                                 | keine                                                                                                                                                            |
| Erschwernisse                  | (Mehrausbruch)<br>Wassererschwernis<br>Klebrigkeit                                                                    | (Mehrausbruch)                                                                                                 | (Mehrausbruch)<br>Wasser<br>Hoher Verschleiß<br>(Bohrwerkzeuge, Klebrigkeit, Mexid-Face-Bedingungen, Hindernisse, Blockigkeit, Vortrieb, ...)                                                                                                                        | (Mehrausbruch)<br>Wasserhaltung                                                                                                                                          | (Mehrausbruch)<br>Sonstige Erschwernisse                                                                                                                         |
| Vergütung der Erschwernisse    | Wassererschwernisse<br>Variante 1, Variante 2<br><br>Erschwernisse aufgrund von Klebrigkeit<br>Variante 1, Variante 2 | Erschwernisse aufgrund von Wasser<br>→ Besondere Leistungen                                                    | Erschwernisse aufgrund von Wasser<br>→ Besondere Leistungen<br>Erschwernisse aufgrund hohen Verschleißes der Bohrwerkzeuge, Klebrigkeit, Mexid-Face-Bedingungen, Hindernisse, Blockigkeit, etc.<br>Erschwernisse beim Vortrieb von Nischen und Querschlaganschlüssen | Erschwernisse aufgrund von Wasser<br>→ Vergütung mittels Gruppenstunden<br>Erschwernisse bei Gasaustritt und bei Ausführung besonderer Maßnahmen<br>→ Gesondert vergütet | Berechnet mittels zeitlicher Äquivalente und Einheitspreise für Felsstützmaßnahmen                                                                               |
| Festlegungen                   | Ausbaufestlegung                                                                                                      | keine                                                                                                          | Ausbaufestlegung                                                                                                                                                                                                                                                     | Sicherungstyp                                                                                                                                                            | Vortriebsklassifizierung und Festlegung der Sicherheitsmaßnahmen auf Grundlage des Q-Systems (A-G)                                                               |
| Arbeitsbereiche                | A1 – A3                                                                                                               | A1 – A3                                                                                                        | k.A.                                                                                                                                                                                                                                                                 | L1 – L3<br>Arbeitszonen: L1*-L3*                                                                                                                                         | -                                                                                                                                                                |

Tabelle 5: Unterscheidungsmerkmale

## 7 Ausblick

### 7.1 Ausblick digitaler Vortriebs- und Prozessdaten

In den folgenden Kapiteln werden Ansätze für eine Abrechnungsmethodik aufgrund der tatsächlichen Maschinendaten genauer beschrieben.

#### 7.1.1 Ausgangssituation

Derzeit wird der Vortrieb nur teilweise auf Grundlage der wirklichen Vortriebsgeschwindigkeit vergütet. In der Schweiz beispielsweise werden täglich Testhübe durchgeführt und anhand dieser wird die Vortriebsleistung ermittelt. Die Überarbeitung der ÖNORM B 2203-2 sieht erstmals für die Bestimmung des Regelvortriebes die Berücksichtigung des mittleren Drehmomentenfaktors vor und greift deshalb auf die Mittelwerte der Penetration, der Vorschubkräfte und des Drehmoments der Vortriebsmaschine zu. In anderen Ländern hingegen wird die tatsächliche Leistung der Maschine nicht berücksichtigt. Es gibt jedoch erhebliche Unterschiede zwischen der geschätzten und der tatsächlichen Vortriebsleistung. Abbildung 43 zeigt dazu einen Vergleich von acht Tunnelbohrmaschinenvortrieben (Gripper-TBM und TBM-DS) auf drei verschiedenen Kontinenten.

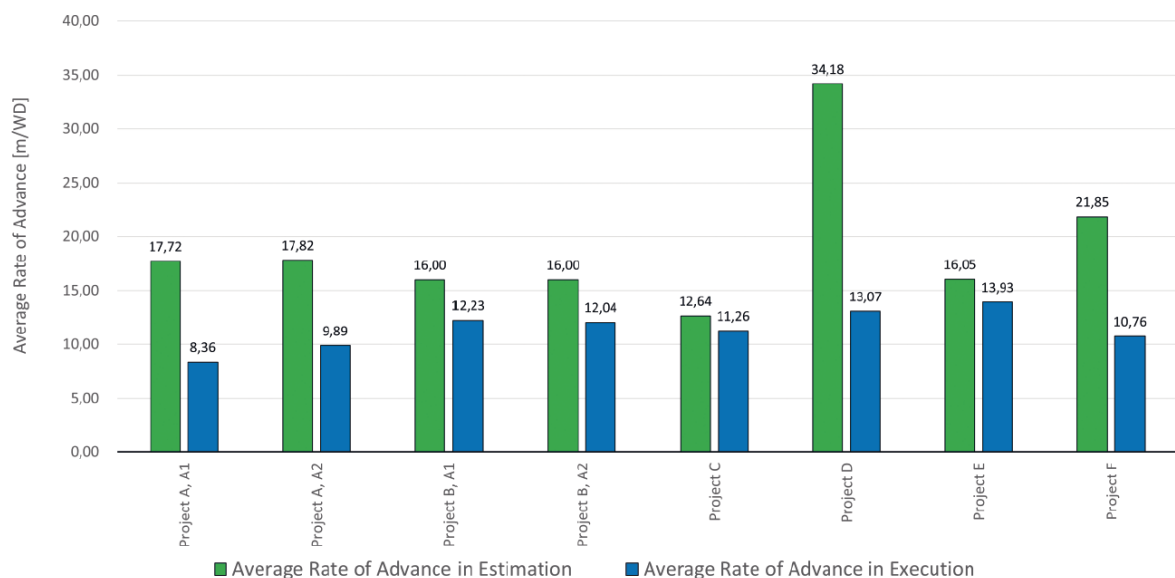


Abbildung 41: Vergleich prognostizierte und tatsächliche Vortriebsgeschwindigkeit [40]

Für diesen Vergleich wurde der Gesamtvorschub herangezogen, die grüne Säule zeigt dabei die Schätzung und die blaue Säule die tatsächliche Leistung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die geschätzte Vortriebsleistung an allen Projekten höher war als die tatsächliche Vortriebsleistung. Solche Abweichungen erzeugen ein großes Konfliktpotential zwischen Auftraggeber und

Auftragnehmer bezüglich der Zahlung für die Bauzeit. Um diese Spannungen zu minimieren, könnten zukünftig die Prozessdaten in Form eines innovativen Vertrags- und Vergütungsmodells in die Abrechnung miteinfließen. Ein solches Modell wurde beispielsweise 2021 in einer Dissertation von Bisenberger [40] entwickelt. Dieses Modell basiert auf fünf Säulen und kann für jeden gängigen Vertragstyp wie beispielsweise Einheitspreis-, Pauschal-, oder Allianzvertrag angewendet werden. Die Säulen umfassen:

- Projektbezogene Daten
- Baubezogene TBM-Prozesse
  - Risikoverteilung in den Sphären der Vertragspartner
  - Bestimmung der Bauzeit in der Kalkulation
  - Digitale Dokumentation der Tunnelarbeiten
  - Modellspezifische Berücksichtigung des Referenzabschnitts

Der Referenzabschnitt repräsentiert dabei einen Tunnelabschnitt mit jenen Bedingungen, auf denen die Berechnung basiert. Damit können die durchschnittlichen Zeiten für die vordefinierten geologischen Klassen, in Österreich beispielsweise die Vortriebsklassen, für jede TBM-Aktivität erfasst werden. Das Modell besteht aus den drei Gruppen Bohrzyklus, begleitende Aktivität und Stillstand / Störung.

Die Dissertation beschreibt zwei mögliche Varianten zur Berechnung der abweichenden Bauzeit. Variante 1 ist ein klassischer Schätz-Ist-Vergleich, bei dem die im Schätzverfahren berechneten Bauzeiten mit den digital dokumentierten TBM-Prozessdauern in der Ausführung die Grundlage für die Bestimmung bilden. In der zweiten Variante werden zwei Teile betrachtet, einerseits die Prozessgruppen Bohrzyklus und begleitende Aktivitäten, die als Standardbetrieb angesehen werden und andererseits die Gruppe Stillstand/Störung.

Der erste Teil der Variante 2 bezieht sich auf den Standardbetrieb und umfasst die modellspezifische Berücksichtigung des Referenzabschnitts. Basierend auf einer „Referenzzykluszeit“ wird für jede geologische Klasse eine „Referenzdauer“ bestimmt. Diese Referenzdauern werden dann in die ursprüngliche Berechnung eingefügt, um eine Bauzeit für jede geologische Klasse zu erhalten. Die Bauzeit im Standardbetrieb wird auch durch die digital dokumentierten TBM-Prozessdauern der Prozessgruppen Bohrzyklus und begleitende Aktivitäten beeinflusst. Die resultierende vergütungswürdige abweichende Bauzeit im Standardbetrieb wird durch die Aufteilung der Bauaktivitätsdauern auf die Sphären des Auftraggebers und des Auftragnehmers sowie die Differenz zwischen den digital erfassten Prozessdauern und den Referenzdauern bestimmt.

Der zweite Teil von Variante 2 bezieht sich auf die TBM-Prozessgruppe Stillstand/Störung. Hier dienen die im Schätzverfahren festgelegten Zeitdauern und die in der Ausführung digital erfassten Prozessdauern als Grundlage für die Berechnung der vergütungswürdigen abweichenden Bauzeit. Dieser Teil wird aufgrund ihrer Unvorhersehbarkeit aus Schätzungen von früheren Projekten durchgeführt. Die Ergebnisse der vergütungswürdigen abweichenden Bauzeit aus beiden Teilen werden addiert, um die Gesamtabweichungszeit zu erhalten, auf die

der Auftragnehmer Anspruch hat und die vergütungswürdig ist. Es soll beachtet werden, dass dies positiv (zusätzliche Zeit) oder negativ (verkürzte Zeit) sein kann. [40]

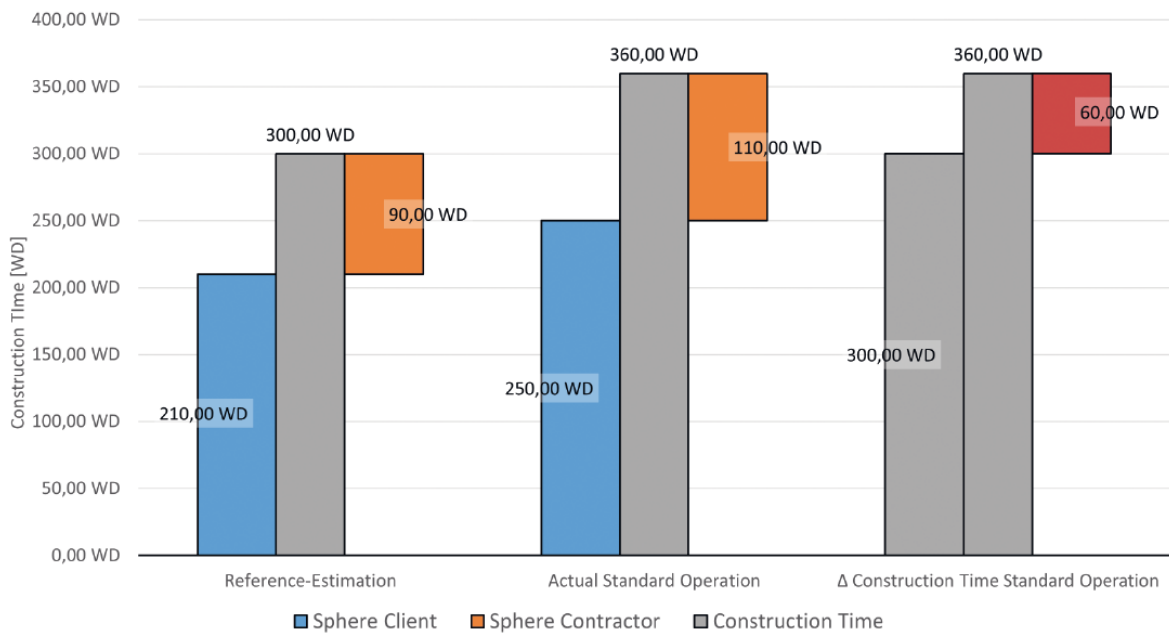


Abbildung 42: Risikozuteilung [40]

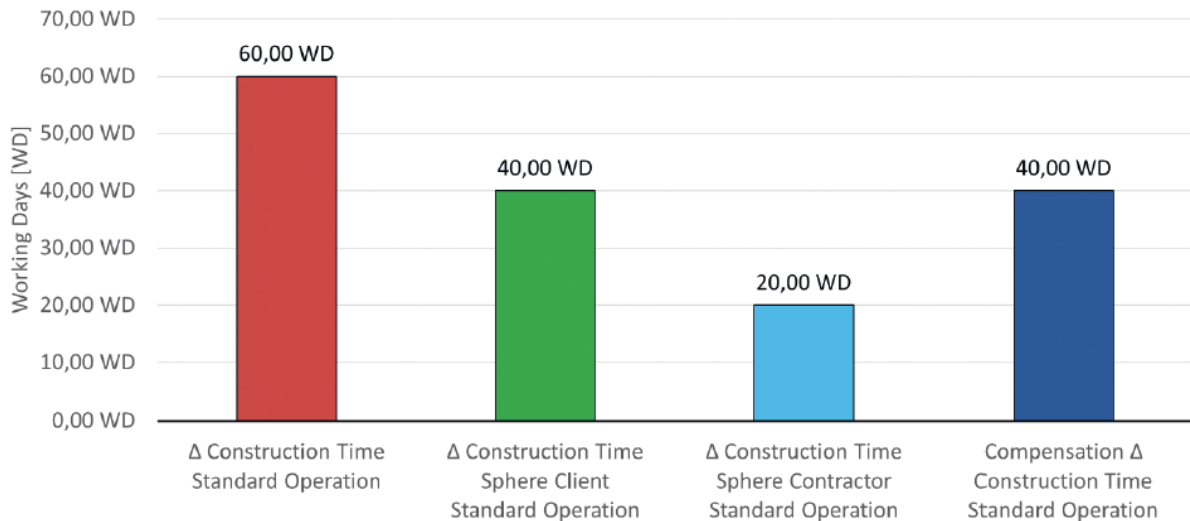


Abbildung 43: Einflussbereich der Bauzeit [40]

### 7.1.2 Prozessdatenanalyse als Qualitätssicherung

Maschinendaten und die dazugehörige Prozessdatenanalyse sind ein wichtiger Teil der Qualitätssicherung. Dabei werden Einzelaggregate bezüglich Sicherheit und Effizienz überwacht sowie das Gesamtsystems der TVM bewertet. Dadurch können Teilprozesse und der Gesamtprozess in Echtzeit visualisiert und überwacht werden.

Der Auftragnehmer hat zu jedem Zeitpunkt die gesamten Maschinendaten für die Überwachung, Steuerung und Optimierung der TVM. In vielen Fällen erhält der Auftraggeber

nur einen Bruchteil dieser Daten, sodass durch den AG keine qualitative Kontrolle in Echtzeit stattfinden kann. Als Lösungsmöglichkeit kann ein externes Prozesscontrolling installiert werden, dabei werden alle beteiligten Parteien an den kontinuierlichen Datenstrom in Echtzeit angebunden und dieser kann somit von jedem überwacht und kontrolliert werden. Das Prozesscontrolling kann entweder direkt vor Ort oder in einem Back-Office stattfinden.

|             | Vorteil                                                    | Nachteil                                                |
|-------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Vor Ort     | Hoher Informationsgehalt<br>Akzeptanz im<br>Baustellenteam | Personaleinbindung<br>Mögliche Einbußen an Objektivität |
| Back-Office | Objektivität                                               | Regelmäßige Rücksprachen mit<br>der Baustelle           |

*Tabelle 6: Vor- und Nachteile eines Prozesscontrolling*

Ziel der Prozessdatenanalyse ist es, kritische Vortriebszustände (Ortsbrustinstabilitäten, Verschleißeffekte, Verklebungseffekte, Beschädigungen des Ausbaus) frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen zu setzen. Dadurch können negative Auswirkungen bezüglich Sicherheit, Qualität, Zeit und Kosten minimiert werden. [41]

### 7.1.3 Daten und künstliche Intelligenz

In modernen Tunnelvortriebsmaschinen werden heutzutage circa 5.000 Sensoren verbaut, welche unter anderem Schneidrad-Drehmoment, Schneidrad-Anpresskraft, Penetration-Druck, Geschwindigkeit, Temperatur, Vibration, Abplatzungen, Versätze, Rissbildungen, etc. messen und erkennen.

Ziel bei der Datenermittlung ist es, dass die Informationen automatisch von den verbauten Sensoren erfasst werden und anschließend mithilfe künstlicher Intelligenz ausgewertet und ins bestehende Modell übertragen werden. Außerdem kann mithilfe von Bilderkennung und Audiodatenauswertung die tatsächlich vorhandene Geologie erfasst und das BIM-Modell automatisch aktualisiert werden und es kann dadurch eine Prognose über die voraussichtliche Vortriebsgeschwindigkeit erstellt werden. Mögliche Anwendung für die künstliche Intelligenz sind beispielsweise die Echtzeit-Modellanpassung, Machine-Learning-Prognosemodelle und die Bilderkennung.

Mit der Weiterentwicklung der künstlichen Intelligenz ist eine Vollautomatisierung einer TBM ein realistisches Ziel. Beginnend mit Assistenzsystemen für eine automatische Steuerung und den automatischen Ringbau kann dieses Ziel schrittweise erreicht werden. [42]

## 8 Fazit

Die grundlegenden Prinzipien und Vertragsbestimmungen im Untertagebau haben sich international weitgehend vereinheitlicht bzw. angenähert. Zu diesen zählen unter anderem der Einsatz von Einheitspreisverträgen zur Vergütung von Leistungen, Materialien, Vorhaltezeiten usw., sowie der Grundsatz einer fairen Risikoverteilung. In jedem Land existieren Leitfäden oder standardisierte Normen, die die vertraglichen Vereinbarungen zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer regeln und die Vorgehensweise bei der Errichtung unterirdischer Bauwerke festlegen. Die Bodenbeschaffenheit gilt in allen Ländern als entscheidender Faktor für Kosten und Bauzeit, weshalb der Erkundung des Baugrunds länderübergreifend große Bedeutung zugeschrieben wird. Erst auf Basis dieser Erkundungen können Ausschreibungen erstellt und Angebote eingeholt werden. Der Baugrund ist ein vom Auftraggeber beigestellter Stoff, somit trägt der Auftraggeber, außer bei einer abweichenden vertraglichen Vereinbarung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer, in allen europäischen Ländern das Risiko für unvorhergesehene und abweichende Bodenverhältnisse. Die ausführende Baufirma ist für die Einhaltung der Vortriebsgeschwindigkeit innerhalb der prognostizierten Bandbreite verantwortlich.

Über viele Jahre hinweg wurden die spezifischen Aspekte der Bauausführung sowie abrechnungsrelevante Details an die örtlichen Gegebenheiten der Gebirgsregionen und die kulturelle Mentalität der Bevölkerung angepasst.

### 8.1 Vergleich

#### 8.1.1 Normen

Ein deutlicher Unterschied besteht darin, ob in den Normen separate Regelungen für den kontinuierlichen und zyklischen Vortrieb vorgesehen sind. Da die beiden Vortriebsarten in vielen Aspekten unterschiedlich behandelt werden müssen, wird eine klare Trennung bevorzugt. Länder wie Österreich, die Schweiz und Südtirol, die diese Unterteilung vorgenommen haben, verfügen auch über detailliertere Vorschriften zum Umgang und zur Vergütung von Tübbing und Ringspaltverfüllungen. Im Gegensatz dazu wird dies in der deutschen DIN 18312 beispielsweise kaum erwähnt.

#### 8.1.2 Boden- und Vortriebsklassifizierung

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist der korrekte Umgang mit der Bodenklassifizierung. Obwohl in verschiedenen Ländern weitgehend unterschiedliche Klassifizierungssysteme und Bodeneinstufungen angewendet werden, zeichnet sich jedes System durch Nachvollziehbarkeit, Transparenz und klare Strukturierung aus, wodurch alle Bodenklassifizierungssysteme für den Tunnelbau geeignet sind. Die Bedeutung darin liegt, dass

der Boden präzise beschrieben wird und damit auch die Kalkulierbarkeit der Kosten und die Sicherheit des Vortriebs gewährleistet werden.

Die Bodenklassifizierung dient als Grundlage für die Einteilung des Vortriebs in verschiedene Vortriebsklassen. Die Vorgehensweise bei der Vortriebsklassifizierung variiert von Land zu Land und ist unterschiedlich strukturiert. Die Matrix, die in Österreich verwendet wird, zeichnet sich durch ihre einzigartige Struktur aus, die eine hohe Anpassungsfähigkeit an Veränderungen der Bodenverhältnisse ermöglicht. Allerdings birgt sie aufgrund ihrer Vielzahl an Kategorien auch das Potenzial für Konflikte. In Deutschland und Südtirol werden die Vortriebsklassen hingegen für Tunnelbohrmaschinen und Schildmaschinen separat festgelegt, wobei die Zuordnung in Deutschland in 4 TBM- und 5 SM-Klassen und in Südtirol in 6 TBM- und 3 SM-Klassen unterteilt ist. In der Schweiz erfolgt die Klassifizierung nach Bohrklasse, Abbauklasse und Sicherungsklasse, während in Norwegen die Klassifizierung zusammen mit den Mindestsicherungsmaßnahmen für jede Gesteinsmassenklasse (rock mass class) angegeben wird. Obwohl die Vortriebsklassifizierung in jedem Land unterschiedlich definiert ist, werden sie dennoch einheitlich und nachvollziehbar eingeteilt. Über die Jahre haben sich alle diese Vortriebsklassifizierungssysteme als geeignet erwiesen.

### **8.1.3 Risiko, Erschwernisse und Mehrausbrüche**

Die Grundsätze der Risikozuordnung sind in allen Ländern ähnlich, wobei das Risiko für den Baugrund üblicherweise beim Auftraggeber und das Risiko für die Ausführung beim Auftragnehmer liegt. Jedoch unterscheidet sich die Herangehensweise in Norwegen im Vergleich zum DACH-Raum deutlich. Dort wird die Bauausführungsdauer mithilfe von zeitlichen Äquivalenten berechnet. Dabei werden geologisch bedingte zusätzliche Leistungen in eine Zeiteinheit umgerechnet, die sich auf die Vergütung der Bauzeit auswirken.

Der Umgang mit Erschwernissen variiert je nach Land. Die österreichische Norm beschreibt beispielsweise zwei Arten von Erschwernissen, nämlich Wasser und Klebrigkeit, und bietet jeweils zwei Varianten für ihre Berücksichtigung an. Auch in anderen Ländern gibt es Regelungen für Erschwernisse aufgrund von Wasser, jedoch sind sie vergleichsweise nicht so detailliert beschrieben wie in der ÖNORM.

Die Behandlung von Mehrausbrüchen erfolgt hingegen weitgehend einheitlich. Grundsätzlich werden geologisch bedingte Mehrausbrüche entsprechend vergütet, während arbeitsbedingte Mehrausbrüche unberücksichtigt bleiben. Die Berechnung der zu vergütenden Mehrausbrüche wird in den jeweiligen Normen anhand von Skizzen definiert. Besonders herausfordernd gestaltet sich die Vergütung von Mehrausbrüchen während des Tübbingausbaus, da ihre Ausmaße und Mengen nur schwer effektiv bestimmt werden können.

### **8.1.4 Alternative Vertragsmodelle**

Das Emerald Book, ein international anerkanntes Vertragsmodell basierend auf dem Einheitspreissystem, bietet eine solide Grundlage für Vertragsabschlüsse. Insbesondere in

Ländern ohne umfangreiche Erfahrung im Tunnelbau kann das Emerald Book als Leitfaden für den Untertagebau dienen. In Ländern wie Österreich, der Schweiz oder Norwegen hingegen, die über langjährige Erfahrung im Tunnelbau verfügen und eigene, gut erprobte und regional angepasste Standards entwickelt haben, ist eine rasche Akzeptanz eines neuen, internationalen Vertragsmodells unwahrscheinlich.

Stattdessen könnte in diesen Ländern der Allianzvertrag zunehmend an Bedeutung gewinnen, um eine partnerschaftliche Projektabwicklung zu fördern. Anstelle von ständigen Auseinandersetzungen über die Vergütung von Leistungen kann mit diesem Modell das Projekt gemeinschaftlich als Team bearbeitet werden. Diese Herangehensweise ist bereits in Australien weit verbreitet und auch in europäischen Ländern wurden bereits erste Projekte erfolgreich abgeschlossen. Somit könnte sich dieses Modell in Zukunft als attraktive Alternative zu den bestehenden Normen etablieren.

## **8.2 ÖNORM B 2203-2 Neuerungen – Einschätzung des Autors**

Die grundsätzliche Trennung vom zyklischen und kontinuierlichen Vortrieb wird als sehr positiv empfunden. Ebenfalls werden die Neuerungen der ÖNORM B 2203-2 als gut eingeschätzt.

### **8.2.1 Matrix**

Die Abrechnung mittels der Matrix ermöglicht eine hohe Flexibilität bei variierenden Baugrundverhältnissen. Anhand des Matrix-Systems können viele Konflikte bezüglich der Ausbruchklassifizierung bereits im Vorfeld vermieden werden. Die Penetration als maßgebender Parameter der ersten Ordnungszahl ist klar definiert, einfach zu verstehen und als messbare Größe gut geeignet. Die zweite Ordnungszahl ist für die TBM-O / TBM-A mit Art, Menge und Einbauart der Stützmittel verständlicher gewählt als lediglich die „Leistungsbestimmenden Merkmale“ der TBM-S / TBM-DS und SM. Die Wahl der Merkmale überlässt einen großen Interpretationsspielraum, welcher durchaus Konfliktpotential aufweist. Die Risikoverteilung wird dank dieses Systems als fair empfunden.

### **8.2.2 Erschwernisse**

Die klar definierten Erschwernisse für Wasser und Klebrigkeit werden als positiv empfunden. Die Festlegung einer Grenzwassermenge bzw. einer Grenze der Verklebungsneigung ist für eine konfliktfreie Festlegung des Vortriebes notwendig.

Für die Abrechnung stellt sich die Frage, ob nicht nur eine gut ausgearbeitete Variante ausreicht, welche anschließend standardmäßig angewendet wird. Die Wahl der zwei Varianten wird nicht als negativ, sondern als „nicht unbedingt notwendig“ angesehen.

Aufgrund der Transparenz und Objektivität der vorab definierten Grenzwerte ist in beiden Erschwernisfällen die Variante 1 die präferierte Wahl des Autors.

### 8.2.3 Drehmomentenfaktor

Die Einführung des Drehmomentenfaktors bewirkt den ersten Schritt zur standardisierten Implementierung der maschinellen Vortriebsdaten. Der Drehmomentenfaktor kann mit den gemessenen Werten hubweise exakt berechnet werden, somit gelingt eine Anpassung an die tatsächlich vorherrschenden Baugrundverhältnisse. Dies ermöglicht transparente und objektive Werte für die Vergütung.

Mit den zukünftigen technischen Möglichkeiten und der fortschreitenden Automatisierung können in den nächsten Jahrzehnten weitere Maschinendaten für den Vortrieb und die Abrechnung relevant werden. Bereits in der nächsten Überarbeitung der Norm sollten Regelungen für gemessene Vortriebsdaten definiert werden.

### 8.2.4 Regelvortrieb, Sondervortrieb, Ereignisbewältigung

Die Definition der „Stillliegezeit“ wurde in der neuen Ausgabe der ÖNORM B 2203-2 beibehalten.

Anstatt der „Vortriebsunterbrechung“ wurde die „Ereignisbewältigung“ eingeführt. Diese sind zwar per Definition etwas verschieden, jedoch werden damit im weiteren Sinne dieselben Situationen abgegolten. Für beide Begriffe wird die Zeit verstanden, in welcher zwar für den Vortrieb gearbeitet wird, die jedoch nicht mit den entsprechenden Regelungen (Vortriebsunterbrechung → Vortriebsklassen; Ereignisbewältigung → Regelvortrieb) abgerechnet werden kann und es daher eine spezielle Abrechnungsform benötigt. Die Regelungen bezüglich der Vergütung beinhalten, dass die zeitgebundenen Baustellengemein- und Gerätekosten sowie die Lohnkosten für die tatsächliche Dauer mit entsprechenden LV-Positionen weitervergütet werden.

Neu ist die Abgrenzung des Regelvortriebs und des Sondervortriebs. Der Regelvortrieb wird mit Kriterien definiert, welche beispielsweise Ausbrüche, Drehmomentenfaktor oder Schildreibung beinhalten. Für jeden Hub wird von AN und AG festgestellt, ob diese Kriterien erfüllt sind und es sich somit um einen Regelvortrieb handelt. Bei Eintreten gewisser Umstände wird der Vortrieb jedoch als Sondervortrieb festgelegt. Die Vergütung dabei erfolgt anhand der vorhandenen Positionen und dem tatsächlichen Aufwand. Neu miteingeführt wurde dafür die Referenzstrecke, welche zur Berechnung der vergütenden Sondervortriebszeiten herangezogen wird. Die Berechnung der Referenzstrecke wird in der Norm sehr genau erläutert und obliegt klaren Regelungen. Mit der Unterteilung des Regelvortriebs und des Sondervortriebs ist es dadurch möglich, dass auch ein begründet erschwelter und dadurch verzögerter Vortrieb definiert werden kann. Diese Methode bietet dem AG und dem AN eine Möglichkeit, den Vortrieb in gerechte Abschnitte zu unterteilen.

# Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre, dass ich meine Masterarbeit selbständig verfasst und alle in ihr verwendeten Unterlagen, Hilfsmittel und die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Ich nehme zur Kenntnis, dass auch bei auszugsweiser Veröffentlichung meiner Masterarbeit die Universität, das/die Institut/e und der/die Arbeitsbereich/e, an dem/denen die Masterarbeit ausgearbeitet wurde, und die Betreuerin/nen bzw. der/die Betreuer zu nennen sind.

Ich nehme zur Kenntnis, dass meine Masterarbeit zur internen Dokumentation und Archivierung sowie zur Abgleichung mit der Plagiatsoftware elektronisch im Dateiformat pdf ohne Kennwortschutz bei der/dem Betreuer/in einzureichen ist, wobei auf die elektronisch archivierte Masterarbeit nur die/der Betreuerin/Betreuer der Masterarbeit und das studienrechtliche Organ Zugriff haben.

Innsbruck am .....

.....

Christian Öfner, BSc

## 9 Literatur

- [1] A. Leplongeon und D. Pleurdeau, "The Upper Palaeolithic Lithic Industry of Nazlet Khater 4 (Egypt): Implications for the Stone Age/Palaeolithic of Northeastern Africa", *Afr Archaeol Rev*, Jg. 28, Nr. 3, S. 213–236, 2011, doi: 10.1007/s10437-011-9100-x.
- [2] D. Hochwarth, *Tunnelbau in der Antike: Alles eine Frage der richtigen Technik*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/bau/tunnelbau-in-der-antike-alles-eine-frage-der-richtigen-technik/>.
- [3] H. Ahmadi, A. Nazari Samani und A. Malekian, "The Qanat: A Living History in Iran" in *Water and Sustainability in Arid Regions*, G. Schneier-Madanes und M.-F. Courel, Hg., Dordrecht: Springer Netherlands, 2010, S. 125–138, doi: 10.1007/978-90-481-2776-4\_8.
- [4] K. Grewe, "Tunnel : die Entwicklung der Technik von den Anfängen bis zum Ende des Mittelalters", 2008, doi: 10.5169/SEALS-378437.
- [5] D. Chapman, N. Metje und A. Stark, *Introduction to Tunnel Construction*, 2. Aufl., 2017.
- [6] P. Teichert, "Die Geschichte des Spritzbetons", 1979, doi: 10.5169/SEALS-85583.
- [7] J. Schmitt, B. Bayrakci und U. Burbaum, "Maschinentechnische Entwicklungstendenzen im maschinellen Tunnelbau im Lockergestein", 2019.
- [8] B. Maidl und et al., *Mechanised Shield Tunneling*, 2013.
- [9] B. Maidl und et al., "Hardrock Tunnel Boring Machines", 2012.
- [10] G. Girmscheid, *Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus*, 3. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn A Wiley Brand, 2013.
- [11] Herrenknecht, *Herrenknecht - Produkte*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/> (Zugriff am: 26. Februar 2024).
- [12] K. Bergmeister, *Beton-Kalender 2014: Schwerpunkte: Unterirdisches Bauen - Grundbau - Eurocode 7*, 5. Aufl. Newark: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6735513>
- [13] K. Eichler und et al., Hg., *Spezialtiefbau: - Erkundung und Ausführung - Technik und Umwelt - Methoden und Auswirkungen - Baustoffe und Verfahren*, 2018.
- [14] S. Kainrath-Reumayer und W. Dolsak, "Gebirgsanker im Berg- und Tunnelbau: Berg Huettenmaenn Monatshefte 153, 397–404", 2008, doi: 10.1007/s00501-008-0409-y.
- [15] E. Schneider, "Der Österreichische Tunnelbauvertrag", 2004.
- [16] W. Holzer, O. K. Wagner und W. Leitner, "Überarbeitung der österreichischen Werkvertragsnorm ÖNorm B 2203-2 für den kontinuierlichen Vortrieb", *Geomechanics and Tunneling*, Jg. 14, Nr. 6, S. 730–739, 2021, doi: 10.1002/geot.202100057.

- [17] *ÖNORM B 2203-2:2023 03 01*, Austrian Standards international, Mrz. 2023.
- [18] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, "Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb: Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung", 2014.
- [19] G. Anagnostou und H. Ehrbar, "Das Bauen unter Tage in der Schweiz und die Tunnelnormen", 2013.
- [20] R. Wyss, "Die Rolle der Geologie in den neuen Schweizer Tunnelnormen", 2004, doi: 10.5169/SEALS-224992.
- [21] D. Fabbri, "Risk, Contract Management, and Financing of the Gotthard Base Tunnel in Switzerland", *Engineering*, Jg. 5, Nr. 3, S. 379–383, 2019, doi: 10.1016/j.eng.2019.04.001.
- [22] *SIA 118/198: Allgemeine Bedingungen für Untertagebau*, SN 507198:2023 de, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Nov. 2023.
- [23] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "DIN 18312 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (AtV) - Untertagebauarbeiten", 2019.
- [24] C. Budach, "Einteilung von Boden in Homogenbereiche bei maschinellen Tunnelvortrieben – Kennwerte, Vortriebsabschnitte, Beispiele", *Geotechnik*, Jg. 44, Nr. 1, S. 33–40, 2021, doi: 10.1002/gete.202000035.
- [25] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "DIN 18299 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art", 2023.
- [26] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "DIN 1960 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil A: Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen", 2019.
- [27] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "DIN 1961 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil B: Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen", 2016.
- [28] A. ATHANASOPOULOU, W. Bogusz, D. Bournas, A. Bezuijen, M. Brandtner und A. Breunese, Hg., *Standardisation needs for the design of underground structures*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://op.europa.eu/s/nFDp>
- [29] UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *About Us*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.uni.com/en/about-us/> (Zugriff am: 3. November 2023).
- [30] AOV – Agentur für die Verfahren und die Aufsicht im Bereich öffentliche Bau-, Dienstleistungs- und Lieferaufträge, "Besondere Vergabebedingungen für öffentliche Bauarbeiten Teil II Allgemeine Technische Vertragsbestimmungen 2019 (ATV 2019)", 2019.

- [31] Norwegian Tunneling Society, Hg., *Contracts in Norwegian Tunnelling: Publication No. 21*, 2012.
- [32] E. Kleivan, "NoTCoS: The Norwegian Tunnelling Contract System", 1989, doi: 10.1016/0886-7798(89)90031-X.
- [33] Norwegian Tunneling Society, Hg., *The Principles of Norwegian Tunneling: Publication No. 26*, 2017.
- [34] Österreichische Bautechnik Vereinigung, "ÖBV-Merkblatt - Alternative Vertragsmodelle: Empfehlungen für die Auswahl und Umsetzung", 2021.
- [35] Bernd Affenzeller, "Der Allianzvertrag aus Sicht des Auftragnehmers", 2019.
- [36] H. Ertl und K. Hechenblaickner, "Das Emerald-Book – Ein Meilenstein auf dem Weg in die Zukunft", *Geomechanics and Tunnelling*, Jg. 14, Nr. 6, S. 794–800, 2021, doi: 10.1002/geot.202100039.
- [37] A. E. Dix, "THE RENAISSANCE OF FAIRNESS IN GROUND RISK ALLOCATION – THE NEW ITA/FIDIC EMERALD BOOK: International Journal of Civil Engineering and Technology 11(1), 2020, 43-52", 2020.
- [38] Norwegian Tunneling Society, Hg., *Norwegian Tunneling Technology: Publication No. 23*, 2014.
- [39] DAUB, "BIM-Modellanforderungen – Teil 5: Vorhaltemaße und Überhöhungen", 2022.
- [40] T. Bisenberger, "Innovative contract and compensation model in mechanised tunnelling – Calculation of the deviating construction time based on digital excavation and process data: *Geomechanics and Tunnelling* 16, No. 1, pp. 22–27", 2023, doi: 10.1002/geot.202200063.
- [41] D. Handke und D. Edelhoff, "Qualitätssicherungselemente und Risikomanagementstrategie für den maschinellen Tunnelbau – Vom Maschinenkonzept zum Prozesscontrolling: Quality and risk management strategy for mechanized tunnelling – From machine concept to process controlling", *Geomechanics and Tunnelling*, Jg. 9, Nr. 3, S. 222–233, 2016, doi: 10.1002/geot.201600017.
- [42] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., *Taschenbuch für den Tunnelbau 2023*. Newark: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=7099640>