

ENTWURFSRICHTLINIE - Kontinuierlicher Vortrieb von Eisenbahntunneln mit Tunnelvortriebsmaschinen

GUIDELINE - for the design of TBM-bored railway tunnels

Autoren:

**Univ. Prof. Dipl.-Ing. Eckart Schneider - Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, A
Dipl.-Ing. Dr. techn. Max John - Konsulent für Tunnelplanung, Innsbruck, A**

ZUSAMMENFASSUNG: Die Richtlinie für den Entwurf von Eisenbahntunneln, die kontinuierlich mit Tunnelvortriebsmaschinen vorgetrieben werden, behandelt das Thema prozessorientiert und beginnt mit einer Auflistung der in den einzelnen Planungsphasen vom Planer zu erbringenden Leistungen, soweit sie über den für einen zyklischen Vortrieb erforderlichen Leistungsumfang hinausgehend für einen TBM- Einsatz erforderlich sind. In gleicher Weise werden die besonderen Anforderungen an die Baugrunderkundung und an die geotechnischen Untersuchungen gegliedert nach Planungsphasen dargelegt.

Der Planungsprozess soll durch eine stufenweise vertiefte Risikoanalyse begleitet werden. Sie soll innerhalb der Planungsphasen entsprechend dem wachsenden Kenntnisstand fortgeschrieben werden und ist als integrierender Bestandteil des Planungsprozesses zu verstehen. Aus den Gefährdungs- und Schadensbildern sollen Maßnahmen zur Bewältigung abgeleitet und in die Leistungsbeschreibung aufgenommen werden. Sofern den Bietern dazu Vorschläge abverlangt werden, können diese im Vergabeverfahren als Kriterien zur Bewertung der Angebote herangezogen werden.

Die Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen folgt den Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen, die von DAUB, ÖGG und FGU erarbeitet wurden. Die in der Richtlinie enthaltenen Hinweise zur Querschnittsgestaltung bauen auf den Vorgaben der HL-Richtlinie zur inneren Tragwerksbegrenzung auf.

Besonderer Regelungsbedarf besteht bei maschinell vorgetriebenen Eisenbahntunneln hinsichtlich der Vorhaltemaße und Toleranzen. Dafür bietet die Richtlinie detaillierte Hinweise und Massangaben. Die Empfehlungen zur Tunnelauskleidung tragen der Tatsache Rechnung, dass bei maschinellen Tunnelvortrieben Tübbinge ein wesentliches Auskleidungselement darstellen.

Im letzten Kapitel der Richtlinie wird die statisch- konstruktive Auslegung des Ausbaus anhand der gültigen Vorschriften und Normen behandelt. Im Anhang werden mitgeltende Richtlinien und Normen sowie berücksichtigte Unterlagen aufgeführt.

1 Vorbemerkungen

1.1 Einführung

Fast alle Verkehrstunnel in Österreich wurden bisher mit zyklischem Vortrieb im Sprengverfahren oder mit Baggereinsatz aufgeföhren. Die Gründe für die Bevorzugung dieses Verfahrens liegen in den komplexen geotechnischen Verhältnissen im Alpenraum (starke wechselhafte Geologie, hohen Gebirgsverformungen, Störungszonen u.dgl.), den großen Querschnittsabmessungen, der teilweise begrenzten Tunnellänge und dem hohen Entwicklungsstand der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode, die aufgrund laufender Weiterentwicklungen ein sehr hohes technisches Niveau erreicht hat und eine sehr wirtschaftliche Herstellung von Tunneln erlaubt.

Durch die in den letzten Jahren rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Tunnelvortriebsmaschinen mit großem Durchmesser, die Ausweitung ihres Anwendungsgebietes und die Tendenz zu Einspurtunnel sowie den anstehenden Großprojekten (Wienerwaldtunnel, Innquerung Münster, U-Bahn Wien, Koralmtunnel, Brenner-Basistunnel) hat der Einsatz von Tunnelvortriebsmaschinen große Realisierungschancen. Für den mechanischen Vortrieb bestehen bis dato keine Vorgaben für die Planung, die erforderlichen geotechnischen Untersuchungen und die Anwendung der unterschiedlichen Vortriebs- und Ausbausysteme.

Um diesem Mangel abzuhelpfen, wurde im Herbst 1999 von Prof. E. Schneider und Dr. M.

John die Entwicklung von Entwurfsrichtlinien für kontinuierlich vorgetriebene Straßen- und Eisenbahntunnel initiiert. Auf Empfehlung von Generaldirektor Dr. G.M. Vavrovsky wurde das Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement der Universität Innsbruck gemeinsam mit Dr. M. John vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie / Sektion II / Gruppe C / Abteilung 10 mit der „Ausarbeitung von Grundlagen für die Entwicklung einer Entwurfsrichtlinie für mechanisch vorgetriebene Verkehrstunnel“ beauftragt.

Bei Anwendung der Richtlinie wird in Zukunft die Vergleichbarkeit von Ausschreibungsvarianten und Alternativangeboten deutlich verbessert. Damit wird einem lang gehegten Wunsch der Auftraggeber und Auftragnehmer entsprochen.

1.2 Organisation

Für die Bearbeitung gelang es, die Mitarbeit der auf dem Gebiet des maschinellen Vortriebes erfahrensten österreichischen Ingenieurbüros zu gewinnen. Zur Beratung wurden die österreichischen Eisenbahngesellschaften und als Vertreter der Bauindustrie vier in maschinellen Vortrieben besonders erfahrene österreichische Baufirmen eingebunden.

Nach dem Erheben der Grundlagen wurde im Jänner 2000 die Bearbeitung in Angriff genommen. Im Dezember 2001 wurde der Entwurf fertig gestellt und dem Auftraggeber (Verkehrsministerium) übergeben.

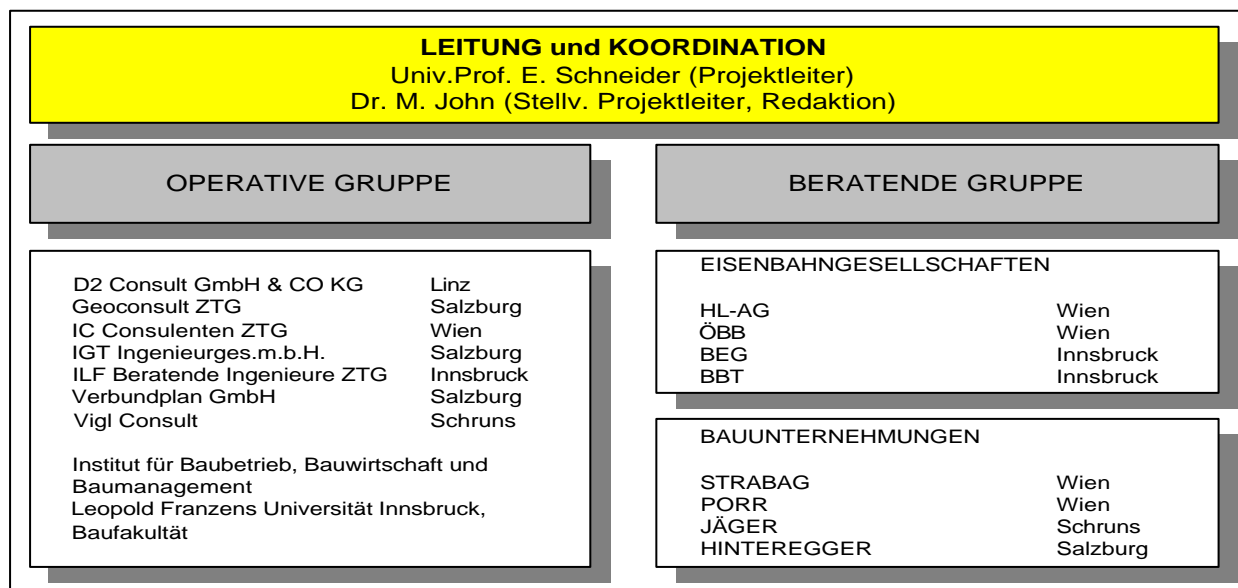


Bild 1: Projektorganisation

1.3 Zielsetzung

Die Richtlinie soll die unterschiedliche Planungstiefe in den einzelnen Planungsphasen aufzeigen und alle Aspekte zusammenfassen, die bei mechanisch vorgetriebenen Verkehrstunnel von der Baugrunderkundung über die Wahl des Vortriebssystems, die Auslegung der Tunnelröhre bis zur statisch-konstruktiven Bearbeitung von Bedeutung sind. Damit wird dem Auftraggeber eine Grundlage zur Verfügung gestellt, nach der die Projektierung ausgerichtet werden kann. Für Planer dient die Richtlinie als Überblick über alle Vortriebssysteme, den möglichen Ausbau unter Berücksichtigung der Querschnittselemente und wesentlichen Randbedingungen wie z.B. Entwässerung und Abdichtung.

Von besonderer Bedeutung ist die Anleitung zu Risikoanalysen, die für maschinell vorgetriebene Verkehrstunnel generell durchgeführt werden sollen und die für einen Vergleich zwischen kontinuierlichem und zyklischem Vortrieb als unerlässlich erachtet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen und dem bei einem Vortrieb mit TVM projektspezifisch auszurichtenden Vortriebs- und Ausbausystem setzt die Anwendung dieser Richtlinie fundierte Fachkenntnisse und eine intensive Auseinandersetzung mit den jeweiligen Randbedingungen voraus. Großes Gewicht wurde auf eine systematische Darstellung der für die einzelnen Planungsphasen empfohlenen Erkundungsmaßnahmen und geotechnischen Untersuchungen gelegt.

Tabelle 1: Planungsphasen

| | I Vorprojekt | | II Einreichprojekt | III Bauprojekt | |
|-----------------------|---|---|---|---|--|
| | Vorstudie | Vorentwurf | | Ausschreibungsunterlagen | Ausführungsplanung |
| ZIEL | Berücksichtigung TVM-Einsatz bei Trassenwahl | Umweltverträglichkeit TVM-Einsatz | Bewilligung für TVM-Einsatz nach EBG §36 | Leistungsbeschreibung Vertragsunterlagen | Ausführungsunterlagen |
| ERKUNDUNG | Erhebung Unterlagen; Aufstellen Erkundungsprogramm | Kartierung Bohrungen, Schürfe Versuche | Verdichtung der Erkundungen | Ergänzende Untersuchungen nach Erfordernis | Vorauserkundung im Zuge des Vortriebs nach Erfordernis |
| GEOLOGIE / GEOTECHNIK | Auswertung der Unterlagen im Hinblick auf TVM-Einsatz | Modellbildung; Prognose Gebirgsverhalten; Zusammenstellung TVM-relevanter Parameter | geologisches, geotechnisches, hydrogeologisches Gutachten | Einarbeitung der ergänzenden Erkundungen; Angabe vortriebsbeeinflussender Parameter | Dokumentation; Überprüfung der Prognose |
| PLANUNG | Randbedingungen, Kostenschätzung, Bauablauf für TVM-Einsatz | Machbarkeit Konzeptentwicklung Kostenschätzung | Systemwahl Kostenberechnung Bauzeitermittlung | Systemscheid; Mengenermittlung, Leistungsbeschreibung Bauablauf, Termine | Objekt-, Schal-, Detail-, und Bewehrungspläne |
| STATIK | | Abschätzung Tragvermögen und Setzungsverhalten | Vordimensionierung, Setzungsprognosen | Ergänzung der Vordimensionierung nach Erfordernis | Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit |
| RISIKO-ANALYSE | | Vergleich unterschiedlicher Systeme als Entscheidungshilfe | Gewähltes TVM - System u. mögliche Alternativen | Gefährdungs- und Schadensbilder; Maßnahmen | Notfall- und Alarmprogramme für mögliche Störfälle |

1.4 Geltungsbereich

Die vorliegende Entwurfsrichtlinie enthält Vorgaben für die Projektierung von Eisenbahntunneln, die unter Einsatz von Tunnelvortriebmaschinen kontinuierlich vorgetrieben werden, und zwar sowohl für Einspur- als auch Doppelspurtunnel. Die Hinweise zum Entwurf des Tunnelquerschnittes basieren auf den Richtlinien für Hochleistungsstrecken und gelten demgemäß für Normalspur und ein Stromsystem mit 15 kV 16 2/3 Hz Einphasen Wechselstrom. Für U-Bahnen und Eisenbahnen mit davon abweichenden Querschnittselementen wie z.B. Spurweite (Schmalspur), Stromsystem (3 kV Gleichstrom) oder Erdungssystem ist die Ausbildung des Tunnelquerschnittes auf die diesbezüglichen Vorgaben abzustimmen.

Der Planung von Erkundungs- und Rettungsstollen sind grundsätzlich die gleichen maschinenspezifischen Anforderungen wie für Streckentunnel zu Grunde zu legen. Für die Planung der Auskleidung sind bei Erkundungsstollen die Nutzung und die zeitlich begrenzte Nutzungsdauer zu berücksichtigen. Für Rettungsstollen können u.U. geringere Anforderungen an die Dichtigkeit gestellt werden. Alle übrigen Empfehlungen der Richtlinie sind auch für Erkundungs- und Rettungsstollen sinngemäß anzuwenden.

2 Planungsphasen

Die Planung von Eisenbahntunnel wird in Phasen abgewickelt, die auf die Behördenver-

fahren abgestimmt sind. Die Beschreibung der Bearbeitungsschritte in den einzelnen Planungsphasen soll keine vollständige Leistungsbeschreibung darstellen, sondern zeigt die Aspekte auf, die für einen TVM-Einsatz zu berücksichtigen sind und zugleich einen Vergleich mit anderen Baumethoden erlauben.

Die Ergebnisse der geologischen Erkundung müssen am Beginn der jeweiligen Planungsphase weitgehend abgeschlossen sein. Das bedeutet, dass die Durchführung und Auswertung der geologischen Erkundung den jeweiligen Planungsphasen zeitlich vorangehen sollte.

3 Baugrunderkundung und geotechn. Untersuchungen

Für einen kontinuierlichen Vortrieb mit TVM sind gegenüber dem zyklischen Vortrieb vertiefende Baugrunduntersuchungen und ergänzende geotechnische Untersuchungen erforderlich. Diese sind von Beginn der Projektierung an zu berücksichtigen, ausgenommen ein TVM-Vortrieb kann begründet ausgeschlossen werden, z.B. wegen zu geringer Tunnellänge.

Die Richtlinie empfiehlt für die Baugrunderkundungen und die geotechnischen Untersuchungen folgende Schritte:

- ✗ Beschreibung des Bearbeitungsziels
- ✗ Festlegung des Erkundungsumfangs (z.B. Auswertung von vorhandenen Unterlagen)
- ✗ Darstellung des Erkundungskonzeptes (z.B. Kartierung, Bohrungen, etc.)
- ✗ Darstellung des Ergebnisses

Eine nachvollziehbare Darlegung der im Rahmen der Untersuchungen ermittelten Ergebnisse, welche die Basis für die Entscheidung über einen möglichen TVM-Einsatz bilden, hat in einem geologisch-geotechnischen Bericht zu erfolgen. Darüber hinaus sind Planunterlagen zu erstellen; z.B. in der Phase Vorstudie mindestens ein geologisch-geotechnischer Längenschnitt.

In der Vorentwurfsphase ist eine wesentliche Vertiefung der Erkundungen gefordert, die auch Labor- und Feldversuche umfasst. Der geologisch-geotechnische Längenschnitt soll durch Lagepläne und Querprofile ergänzt werden. Der geologisch-geotechnische Bericht soll eine Wertung der Aussagen hinsichtlich

Verlässlichkeit enthalten.

Beim Einreichprojekt ist neben der Verdichtung der Erkundungen das Schwergewicht auf TVM-spezifische Untersuchungen zu legen. Die Untersuchungen sind auf den vorgesehenen Typ der TVM abzustimmen (Tunnelbohrmaschine oder Schildmaschine). In dieser Phase sind zusätzliche hydrogeologische Untersuchungen zur Erkundung der Durchlässigkeit des Baugrundes, eventuell Markierungsversuche zur Ermittlung der Grundwasserfließrichtung sowie der Fließgeschwindigkeit und vertiefte chemische Analysen des Bergwassers vorgesehen. In Abhängigkeit von der Komplexität werden dreidimensionale Darstellungen der geotechnischen Verhältnisse empfohlen.

Im Zuge der Erstellung der Ausschreibungsplanung, der Leistungsbeschreibung sowie der Unterlagen für den Bauvertrag können weitere Untersuchungen erforderlich werden, die in Ergänzung zu den vorherigen Planungsphasen auszuführen sind. Weiters ist zu klären, ob in der Ausführungsphase Vorerkundungen (z.B. Kernbohrungen, Hammerbohrungen mit oder ohne Preventer, geophysikalische Erkundungen u.dgl.) erforderlich sind, die in die Leistungsbeschreibung aufzunehmen sind.

Während der Bauausführung sind die vor Ort angetroffenen geologisch-geotechnischen Verhältnisse zu dokumentieren, die Prognose zu verifizieren und jener der Ausschreibungsplanung gegenüberzustellen. Werden Vorerkundungen durchgeführt, sind diese zu dokumentieren, zeitnah auszuwerten und kurzfristige Prognosen zu erstellen.

4 Risikoanalyse

Zur Einhaltung der Projektziele soll - angepasst an die einzelnen Projektphasen - eine Risikoanalyse durchgeführt werden. Zielsetzung einer Risikoanalyse ist die vorausschauende Identifikation und Bewertung aller Einflussgrößen, welche die Ziele des Projektes im Hinblick auf Qualität, Bauzeit, Baukosten und Umfeld gefährden können. Die Risikoanalyse dient in der

- ✗ Planungsphase I: als Entscheidungshilfe für die Auswahl des Tunnelsystems (Doppelspurtunnel oder zwei Einspurtunnel), der Vortriebsart (zyklischer

Vortrieb oder Einsatz einer TVM) und der Systemwahl der TVM.

- ✗ Planungsphase II: zur Ermittlung der terminlichen und monetären Auswirkungen der für die Umsetzung des Projektes relevanten Risiken und den daraus abzuleitenden Maßnahmen sowie zur Herleitung von Zuschlagskriterien.

Die Risikoanalyse erfasst mögliche Abweichungen von den Projektzielen und die damit verbundenen Auswirkungen. Das Abweichungspotential ist abhängig vom aktuellen Projektstand und verringert sich naturgemäß mit zunehmender Bearbeitungstiefe.

Als Grundlage der Risikoanalyse ist eine Risikodefinition und eine Beschreibung der Gefährdungs- und Schadensbilder vorzunehmen. Es wird empfohlen, folgende Mindest-Struktur einzuhalten :

- ✗ Baugrund:
 - ? Stabilität (z.B. Versagen aus dem Firstbereich oder aus der Ortsbrust)
 - ? Erschwernisse (z.B. unvorhergesehene Wasser- oder Gaszutritte)
- ✗ Planung
 - ? Fehleinschätzungen (z.B. unerwartetes Verhalten des Baugrundes)
 - ? Fehldimensionierung (z.B. Überbeanspruchung des Ausbaues)
- ✗ Baudurchführung
 - ? Vortrieb, Ausbau und Auskleidung (z.B. Verklemmen der TVM)
 - ? Außergewöhnliche Ereignisse (z.B. Brand, Explosion)

Risikoanalysen sollen innerhalb der Planungsphasen entsprechend dem wachsenden Kenntnisstand fortgeschrieben werden und sind als integrierter Bestandteil des Planungsprozesses zu verstehen.

In der Planungsphase I erfolgt die Risikoanalyse in Form einer quantitativen Analyse, wobei die Ergebnisse für die zur Diskussion stehenden Varianten einander in tabellarischer Form oder graphisch gegenübergestellt werden. Im Vordergrund steht die Identifizierung der möglichen Gefährdungs- und Schadensbilder. Da für eine Variantenbeurteilung stets das Gesamtergebnis maßgebend

ist, ist der risikorelevante Anteil dem unveränderlichen Anteil (geplantes Projekt) zu überlagern.

Im Zuge der Ausschreibungsplanung werden auf Basis der in der Planungsphase I identifizierten Gefährdungs- und Schadensbilder Maßnahmen zu deren Bewältigung in die Leistungsbeschreibung aufgenommen oder Kriterien zu deren Bewertung im Zuge der Vergabe (insbesondere für Alternativangebote) formuliert. Die vom Planer erstellten Risikoanalysen sollen den Anbietern mit den Ausschreibungsunterlagen zur Verfügung gestellt werden.

Im Zuge der Ausführungsplanung soll ein Notfall- und Alarmprogramm erstellt werden, in welchem die außergewöhnlichen Ereignisse aufgelistet und die Maßnahmen bei deren Eintritt beschrieben sind. Darüber hinaus sind die organisatorischen Maßnahmen (Rettungsplan etc.) festzulegen.

5 Vortriebssysteme

Die Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen folgt den Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebssystemen (DAUB, ÖGG, FGU), ergänzt um Aufweitungs- und Doppelschildmaschinen.

Bei der Auswahl des Vortriebssystems sind für Tunnelbohrmaschinen im Festgestein folgende Kriterien zu berücksichtigen :

- ✗ Gebirgsverhalten
- ✗ Stützmittelerfordernisse
- ✗ Verspannbarkeit
- ✗ Deformationsverhalten

Für Schildmaschinen, die im Lockergestein eingesetzt werden, gelten folgende Kriterien als wesentlich :

- ✗ Ortsbruststützung
- ✗ Grundwasserverhältnisse
- ✗ Hindernisse

Im Zuge der Ausschreibung sind vom Planer die Mindestanforderung an das Vortriebssystem, die Nachlaufeinrichtung und das Datenerfassungs- und Auswertungssystem anzugeben. Dasselbe gilt für die vortriebsbegleitenden geotechnischen und zusätzlichen Messprogramme.

| | | | |
|----------------------------|---|--|--------|
| Tunnelbohrmaschinen TBM | TBM ohne Schild: TBM | offene TBM - Bohrkopf und Verspanneinrichtung | TBM |
| | Aufweitungs-Maschinen ohne Schild: TBM-A | einstufige Aufweitungs-TBM - Aufweitungskopf in Pilotstollen | TBM-A1 |
| | | zweistufige Aufweitungs-TBM - 2 Aufweitungsköpfe in Pilotstollen | TBM-A2 |
| | TBM mit Schild: TBM-S | TBM mit Einfauchschild - Bohrkopf im Schildmantel | TBM-S |
| | | TBM mit Doppelschild - Bohrkopf im Schildmantel + Gripperschild | TBM-DS |
| Schildmaschinen SM | Schildmaschinen mit Vollschnittabbau: SM-V | Ortsbrust ohne Stützung | SM-V1 |
| | | Ortsbrust mit mechanischer Stützung | SM-V2 |
| | | Ortsbrust mit Druckluft-Beaufschlagung für Vortrieb in Grundwasser | SM-V3 |
| | | Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung - Hydroschild mit Bentonitzugabe | SM-V4 |
| | | Ortsbrust mit Erddruck-Stützung - EPB Schild mit Boden als Stützmedium | SM-V5 |
| | | Ortsbrust mit veränderbarer Stützung - Mix/Poly Schildmaschine | SM-VM |
| | | Ortsbrust ohne Stützung | SM-T1 |
| | Schildmaschinen mit teillächigem Abbau: SM-T Excavator/ Schrämmaschinen | Ortsbrust mit Teilstützung | SM-T2 |
| | | Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung für Vortrieb in Grundwasser | SM-T3 |
| | | Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung | SM-T4 |

Bild 2: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen

6 Querschnittsgestaltung

Maßgebende Kriterien für die Wahl des Querschnittes von Eisenbahntunneln sind das Tunnelsystem (Einspur- oder Doppelspurstollen), sowie Anforderungen aus dem Betrieb wie z.B. das Betriebsprogramm (Personen, Güter oder Mischverkehr) und die Entwurfsgeschwindigkeit. Für die Regelprofile von Eisenbahntunneln gelten die Angaben zur inneren Tragwerksbegrenzung, die in der HL-Richtlinie enthalten sind.

Besonderer Regelungsbedarf besteht bei maschinell vorgetriebenen Eisenbahntunneln hinsichtlich der Vorhaltemaße und Toleranzen. Das Vorhaltemaß für Gebirgsdeformationen ist projektspezifisch festzulegen. Bei TVM mit Schild ist zwischen Bohrdurchmesser und Außendurchmesser der Tübbingauskleidung systembedingt eine Differenz von 8-10 cm vorhanden, die als Vorhaltemaß für die Gebirgsdeformationen zur Verfügung steht. Werden größere Verformungen erwartet, sind diese durch einen Überschnitt oder durch entsprechende Eigenschaften des Ausbaues zu gewährleisten.

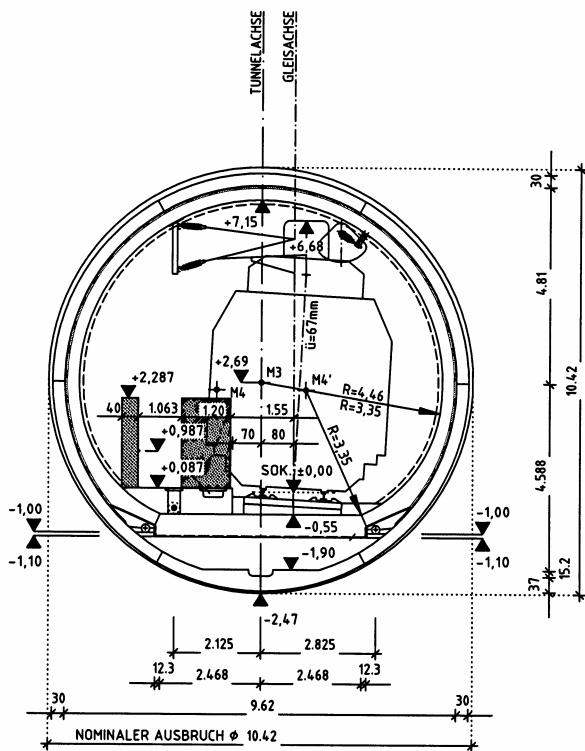
Als Vorhaltemaß für Abweichungen in Folge von Ungenauigkeiten bei der TVM-Steuerung, der Vermessung und des Ausbaus wird ein Vorhaltemaß von mindestens 11 cm gefordert. Dabei ist ein Absinken der TVM um 8 cm berücksichtigt, welches durch ein Anheben der TVM-Achse um 4 cm kompensiert wird. Die endgültige Gleislage wird nach dem Durchschlag

auf Basis einer Bestandsvermessung projektspezifisch optimiert. In der HL-Richtlinie ist eine Abweichung der Profilaehse zur inneren Tragwerksbegrenzung von plus minus 3 cm zugelassen. Der Ausgleich der Abweichungen durch die Gleislage darf nur unter Einhaltung der Mindestneigungen und Mindestausrundungsradien erfolgen.

Auf Grund der unterschiedlichen Randbedingungen, die die Querschnittelemente bestimmen, ist die Vorgabe eines einheitlichen Regelquerschnittes nicht sinnvoll. Ein solcher müsste auf die Maximalanforderungen ausgelegt werden, was wirtschaftlich nicht vertretbar wäre.

Das Beispiel in Bild 3 zeigt die innere Tragwerksbegrenzung eines dränenen Einspurstunnels, der für eine Entwurfsgeschwindigkeit von maximal 200 km/h ausgelegt ist. In diesem Fall ist die lichte Querschnittsfläche, die auf Grund der aerodynamischen Anforderungen bei Verwendung von nichtdruckertüchtigtem Rollmaterial und durch die Tunnellänge vorgegeben ist, querschnittsbestimmend. Sind auf Grund des Instandhaltungs- und Betriebskonzeptes Rettungsnischen erforderlich, so können Kastennischen ohne Profilaufweitung untergebracht werden. Die starke Krümmung im Fußbereich der Ulmen berücksichtigt den Einbau einer Ulmendrainage.

Nach Meinung der Verfasser soll weder der Regelquerschnitt für Einspurstunnel noch der Regelquerschnitt für Doppelspurstunnel als sacrosanct angesehen werden. In Einzelfällen



RADIALES VORHALTEMASS FÜR INNENSCHALE UND TÜBBING: MIND. 11cm

| | M3 | FIRSTRADIUS |
|-------------|-------|-----------------------|
| INNENSCHALE | +2,69 | R ₁ =4,46m |
| TÜBBING | +2,69 | R ₁ =4,81m |
| AUSBRUCH | +2,74 | R ₃ =5,21m |

DIE SOHLOBERKANTE AUF -0,55 IST EINZUHALTEN.

AUSBRUCHQUERSCHNITT = 85,3m²

BERÜCKSICHTIGTE TOLERANZEN (BEISPIELHAFT):

- + HORIZONTALE UND VERTIKALE STEUERGENAUIGKEIT ±2cm
- + RADIALE VERMESSUNGSUNGENAUIGKEIT ±5cm
- + ABTAUCHEN DES BOHRKOPFES BIS 10cm
- ~ TOLERANZ INNENSCHALE IN DER INNEREN TRAGWERKSBEGRÄNZUNG ENTHALTEN
- ~ BAUUNGENAUIGKEIT TÜBBINGSSYSTEM NICHT BERÜCKSICHTIGT
- ~ DER RINGSPALT ERGIBT 15cm ÜBERMASS FÜR DIE FIRSETZUNG

Bild 3: Querschnittselemente für einspurigen Eisenbahntunnel

können durchaus begründete Abweichungen – vor allem in Richtung optimierter (= kleinerer Querschnitte) - vorgenommen werden. In der vor kurzem abgeschlossenen Überarbeitung der Machbarkeitsstudie für den Brenner-Basistunnel wurde so vorgegangen. In Anlehnung an den lichten Querschnitt des Gotthard-Basistunnels wurde für den Brenner-Basistunnel ein kleinerer Regelquerschnitt geplant, der nicht der HL-Richtlinie entspricht. Dafür muss im Betrieb ein höherer Energieverbrauch in Kauf genommen werden.

Ein wesentlicher Parameter für den lichten Durchmesser eines Doppelspurtunnels ist der Achsabstand der Gleise. Die HL-Richtlinie sieht für Tunnel mit einer Entwurfsgeschwindigkeit

bis maximal 200 km/h einen Abstand von 4,70 m vor. Die SBB begnügt sich mit 4,20 m. Bei Neubaustrecken in Deutschland ist für Entwurfsgeschwindigkeiten bis 300 km/h ein Gleis mit Abstand von 4,50 m vorgesehen. Für Ausbaustrecken mit einer Entwurfsgeschwindigkeit unter 200 km/h sind nur 4,00 m vorgeschrieben. Von Seiten der österreichischen Bahnbetreiber sollte nochmals überprüft werden, ob der Gleisabstand nicht auf 4,50 m reduziert und damit eine erhebliche Reduktion der Baukosten erzielt werden kann.

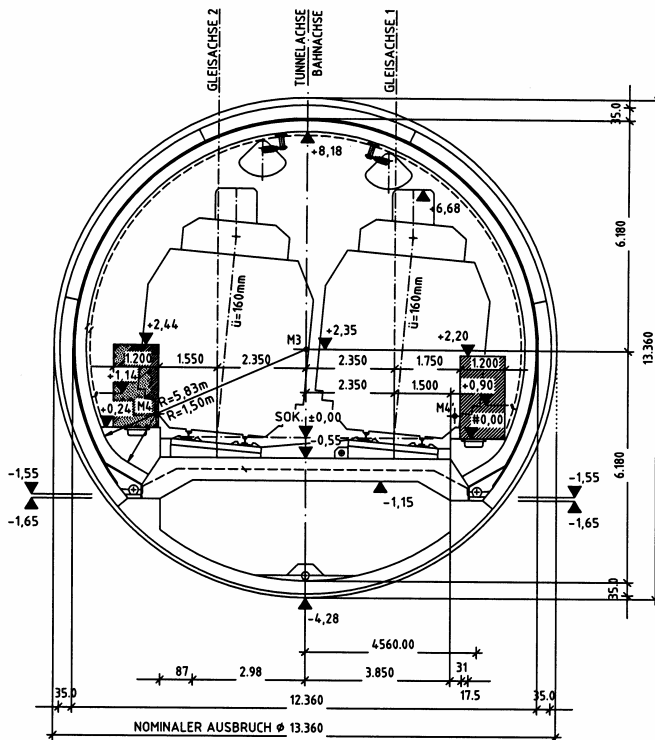
Neben dem Achsabstand der Gleise spielen die Parameter Raum für Einbauten, technischer Nutzraum, Breite des Flucht- und Rettungsweges, die Art des Oberbaus und der Fahr-

Tabelle 2: Gegenüberstellung Gleisabstand Deutschland, Österreich, Schweiz

| | DB | | SBB v > 160 km/h | ÖBB v ? 200 km/h |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| | NBS V _e ? 300 km/h | ABS V _e ? 200 km/h | | |
| Gleisabstand [m] | 4,50 | 4,00 | 4,20 | 4,70 |
| Vorschrift | DS 800.0130 Kapitel 2, Seite 10 | | W Bau GD 23/96 Ziffer 3.2, Seite 2 | HL-Richtlinie Anlage 3, Seite 2 |

leitungsaufhängung sowie die Form der Stromabnehmer eine wichtige Rolle. Aerodynamische Überlegungen sind gleichfalls zu beachten. Es wird darauf hingewiesen, dass bei einem Doppelspurtunnel mit Kreisquerschnitt

ein relativ großer Raum unterhalb der Fahrbahnkonstruktion verbleibt, der u.U. für andere Zwecke genutzt werden kann, z.B. als Kollektor für Kabel und Leitungen oder als Fluchtweg.



RADIALES VORHALTEMASS FÜR INNENSCHALE UND TÜBBING: MIND. 13cm

| | M3 | FIRSTRADIUS |
|-------------|-------|-------------|
| INNENSCHALE | +2,35 | $R_1=5,83m$ |
| TÜBBING | +2,35 | $R_1=6,18m$ |
| AUSBRUCH | +2,40 | $R_0=6,68m$ |

DIE SOHLOBERKANTE AUF -0,55 IST EINZUHALTEN.

AUSBRUCHQUERSCHNITT = $140,2m^2$
 BERÜCKSICHTIGTE TOLERANZEN (BEISPIELHAFT):
 + HORIZONTALE UND VERTIKALE STEUERGENAUIGKEIT $\pm 2cm$
 + RADIALE VERMESSUNGENAUIGKEIT $\pm 5cm$
 + ABTAUCHEN DES BOHRKOPFES BIS 10cm
 + TOLERANZ INNENSCHALE $\pm 2,0cm$ (7cm LT. INNENSCHALENRICHTLINIE ABZÜGLICH 5cm ENTHALTENE TOLERANZ IN DER INNEREN TRAGWERKSBEGRENZUNG)
 + BAUUNGENAUIGKEIT TÜBBINGSYSTEM NICHT BERÜCKSICHTIGT
 + DER RINGSPALT ERGIBT 20cm ÜBERMASS FÜR DIE FIRSETZUNG

Bild 4: Querschnitselemente für zweispurige Eisenbahntunnel

7 Entwässerung und Abdichtung

Die Richtlinie behandelt die drei grundlegenden Varianten der Entwässerung und Abdichtung : druckentlastet (drainiert), druckdicht (wasserdruckhaltend) und druckgeregelt. Gegenüber konventionell vorgetriebenen Tunneln bestehen keine wesentlichen Abweichungen mit Ausnahme der Abdichtung bei einschaliger Tübbingauskleidung. Diese wird im Allgemeinen druckdicht (= wasserdruckhaltend) ausgeführt. Dazu ist eine Abdichtung der Fugen mittels vorgespannter oder quellender Dichtung in einer Dichtungsnut erforderlich. Zum Sichern der Funktion der Dichtungen sind hohe Anforderungen an die Verlegegenauigkeit der Tübbinge zu stellen. Bei hohem Wasserdruck ist eine doppelte Abdichtung der Fugen angebracht.

8 Tunnelauskleidungen

An Tunnelauskleidungssysteme werden folgende allgemeine Anforderungen gestellt:

- ✍ Gewährleistung der Standsicherheit des Bauwerkes auf Lebensdauer
- ✍ Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes in Bezug auf Risse, Dichtigkeit, Verformungsverhalten, Bewehrungskorrosion und optisches Erscheinungsbild auf Lebensdauer,
- ✍ Erzielen des geforderten Betriebsverhaltens des Bauwerkes in Bezug auf Reibung (Oberflächenrauigkeit, Systemrauigkeit, lokale Reibungsverluste), Schall- und Erschütterungsemission

- ☞ Möglichkeit für Überprüfungen und Instandsetzungen des Bauwerkes zur Erhaltung der geforderten Systemeigenschaften auf Lebensdauer

- ☞ Befestigung der Oberleitung und Tunnelausrüstung

Dazu kommen die Anforderungen an den Brandschutz, welcher objektspezifisch festzulegen ist. Dabei sind zu berücksichtigen:

- ☞ Definition der Schutzziele bzw. Schutzzonen unter Einbeziehung der jeweiligen Randbedingungen (vorhandene Bebauung über dem Tunnel, Grundwassersituation, Wasserläufe, Verkehrswege, Standsicherheit des umgebenden

Bodens/Gebirges etc.)

- ☞ Beeinträchtigungen der Tunnelauskleidung in Abhängigkeit von Brandlast und Branddauer

- ☞ Größe der akzeptierbaren Schäden in Abhängigkeit von den definierten Schutzziele

- ☞ Zulässige Betriebsunterbrechung für Instandsetzung unter Berücksichtigung der Möglichkeiten für Verkehrsumlagen

Beim Bau von Verkehrstunneln können folgende Auskleidungssysteme verwendet werden:

| Ausbausysteme | Ausbauart | Funktion |
|----------------------|--|--|
| Einschalige Systeme | Tübbingauskleidung | Tübbingauskleidung übernimmt Tragfunktion, Dichtfunktion, Brandschutz nach Erfordernis |
| | Spritzbetonauskleidung | Spritzbeton, Stahlausbau und Anker übernehmen Tragfunktion, Dichtfunktion nur mit Zusatzmaßnahmen, Brandschutz zusätzlich erforderlich |
| Zweischalige Systeme | außen Tübbingauskleidung/ innen Ortbetonauskleidung | Tübbingauskleidung übernimmt Tragfunktion, Innenschale erhöht Tragfunktion und Dichtfunktion bei WDI-Schale, Brandschutz nach Erfordernis |
| | außen Spritzbetonauskleidung/ innen Ortbetonauskleidung | Spritzbeton, Stahlausbau und Anker übernehmen temporäre Tragwirkung, Innenschale übernimmt dauerhafte Tragfunktion, Dichtfunktion bei WDI-Schale, Brandschutz nach Erfordernis |

Bild 5: Tunnelauskleidungssysteme

Die Ersteller der Entwurfsrichtlinie gehen davon aus, dass bei kontinuierlich vorgetriebenen Verkehrstunneln in Österreich überwiegend Schildmaschinen zum Einsatz gelangen werden, bei denen für die Auskleidung fast immer Tübbinge verwendet werden. Deshalb wurde die Auskleidung mit Tübbingen in der Richtlinie besonders ausführlich behandelt. Für Tunnel im Gebirge mit mittlerer und höherer Überlagerung können Tübbinge als Vorauskleidung in einem zweischaligen System, bei seichtliegenden Tunneln können einschalige Tübbingauskleidungen verwendet werden.

8.1 Tübbingauskleidung mit festem Durchmesser und variablem Ringspalt

Die Tübbingauskleidung wird aus vorgefertigten Segmenten zwängungsfrei im Schutze des Schildmantels einer TVM zu einer Röhre mit festem Durchmesser zusammengefügt. Zwischen Gebirge und Auskleidung ergibt sich ein Ringspalt, der entsprechend der Deformationen des Gebirges variabel ist und sich u. U. auf Null reduziert. Durch Verpressen des Ringspaltes mit Mörtel oder Verblasen mittels Kies erfolgt unmittelbar hinter dem Schild der Kraftschluss zwischen Gebirge und Auskleidung.

Die Tübbingauskleidung kann mit gedichteten oder ungedichteten Fugen ausgeführt werden. Die gedichtete Tübbingauskleidung erfordert einen allseitig exakten Fugenschluss und benötigt Verbindungsmittel zum Vorspannen der Dichtungen. Kurven- und Korrekturfahrten werden durch eine spezielle Geometrie der Tübbinge ermöglicht. Der Ringspalt wird in der Regel mit Mörtel verfüllt.

Nicht gedichtete Tübbingauskleidungen werden lediglich entlang ihrer lastübertragenden Längsfuge kraftschlüssig versetzt. Ihre Umfangsfugen lassen eine begrenzte Öffnungsweite zu. Der Ringspalt wird in der Regel mit Kies hinterblasen und lediglich im Sohlbereich mit Mörtel verpresst. Dabei ist der Kraftschluss auch im hinterblasenen Kies zu gewährleisten. Erforderlichenfalls, insbesondere im Bereich von Nischeneinbindungen oder bei erosionsgefährdetem Gebirge, ist der Kies mit Zementsuspension zu verfestigen. Die Ausrichtung der Auskleidungsröhre im Fräsprofil erfolgt durch Variation der Umfangsfugenweite, zum Teil mit Einlagen in den Fugen. Damit lassen sich auch Korrektur- sowie in einem begrenzten Maße Kurvenfahrten bewerkstelligen. Für Kurvenfahrten können zusätzlich Korrekturtübbinge eingesetzt werden. Nicht gedichtete Tübbingauskleidungen können in der Regel nur bei zweischaligen Ausbausystemen angewendet werden.

8.2 Tübbingauskleidung mit variablem Innendurchmesser

Die Tübbingauskleidung wird Ring für Ring mittels eines keilförmigen Schlusssteines kraftschlüssig gegen das Gebirge verspannt. Somit ist der Innendurchmesser der Tübbingauskleidung entsprechend der aktuellen Deformation des Gebirges innerhalb enger Grenzen variabel. Ein Ringspalt fehlt entweder zur Gänze oder wird durch eine spezielle Ausformung der Tübbing-Außenseite in einem gewissen Ausmaß hergestellt. Die Fugen bleiben offen oder werden für eine nachfolgende Ringraumverpressung zwischen Gebirge und Tübbing vermörtelt. Dieses System setzt ein Mindestmaß an Standfestigkeit des Gebirges voraus.

Eine Sonderform der Tübbingauskleidung mit variablem Durchmesser stellen "nachgiebige" Tübbingauskleidungen für stark druckhafte Gebirgsverhältnisse dar. Stauch- oder Quetschelemente, die in den Längsfugen eingebaut werden, erlauben eine begrenzte Nach-

giebigkeit, die zu einer definierten Umfangs- und Durchmesser-Verkleinerung führt.

Ist eine abgedichtete Auskleidung gefordert, erfordert dieses System einen zweischaligen Ausbau.

8.3 Anforderungen an die Tübbingauskleidung

In der Richtlinie werden folgende Punkte behandelt:

- ✍ Fugenausbildung und Einbaubedingungen
- ✍ Schlussteinerfordernis
- ✍ Abmessungen der Tübbinge
- ✍ Teilung des Tübbingrings
- ✍ Verbindungssysteme
- ✍ Montagehilfen
- ✍ Ovalisierung
- ✍ Nischen und Anschluss von Querschlägen

9 Statisch-konstruktive Auslegung des Ausbaues

Für die Standsicherheit der Auskleidung von seicht liegenden Tunnelbauwerken ist die RVS 9.32 „Tunnel in Lockergestein unter Bebauung“ sinngemäß anzuwenden. Darüber hinaus sind folgende Nachweise zu erbringen :

- ✍ Standsicherheit der Ortsbrust
- ✍ Auftriebssicherheit
- ✍ Ausbläuersicherheit
- ✍ Ausbruchssicherheit
- ✍ Berechnung von Oberflächensetzungen

Bei tiefliegenden Tunnelbauwerken sollen – soweit dies die Randbedingungen zulassen – Standsicherheitsuntersuchungen für die Leibung und die Ortsbrust durchgeführt werden. Dabei sollen die wahrscheinlichen Versagensmechanismen berücksichtigt werden. Bei seichtliegenden Tunnelbauwerken, die in der Regel in WU-Beton ausgeführt werden, hat die Berechnung des Widerstandes nach ÖNORM B4700, Abschnitt 2.4 zu erfolgen. Der Teilsicherheitsfaktor für die Außenschale bei zweischaligem Ausbau beträgt 1,20. Bei Tübbingauskleidungen sind die Pressenkräfte für die Bemessung der Tübbinge mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,40 zu beaufschlagen. Für die Bemessung der Innenschale bei zweischaligem Ausbau sind die Schnittgrößen mit einem Teilsicherheitsfaktor von 1,35 zu multiplizieren. Schnittgrößen, die für die Grenzfallbetrachtung gemäß RVS 9.32

ermittelt werden, werden mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,00 berücksichtigt. Ziffer 2.4 Punkt 3 (Druckglieder) muss im Allgemeinen weder bei der Außen- noch bei der Innenschale berücksichtigt werden, da es sich vorwiegend um gebettete, d.h. nicht stabilitätsgefährdete Systeme handelt.

Für Tunnelauskleidungen in einschaliger Bauweise sind für Bauzustände ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,20, für den Endzustand ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,35 und für die Grenzfallbetrachtung ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,00 (jeweils auf der Einwirkungsseite) anzusetzen. Des weiteren sind folgende globale Sicherheitsbeiwerte einzuhalten: Auftriebsicherheit im Bauzustand 1,05; im Endzustand 1,10. Für Ausbläser und Aufbruchsicherheit – beides nur im Bauzustand zutreffend – beträgt der erforderliche Sicherheitsbeiwert 1,10. Für die Stabilität der Ortsbrust gilt hinsichtlich des Erddrucks ein Sicherheitsbeiwert von 1,35 und für den Wasserdruck ein solcher von 1,05.

In der Richtlinie werden die Belastungen und Einwirkungen, die bei der Dimensionierung der Ausbausysteme zu berücksichtigen sind, detailliert aufgeführt. Anschließend werden die einschlägigen Vorschriften, gebräuchliche Berechnungsmodelle sowie die Kriterien für deren Anwendung vorgestellt. Das letzte Kapitel behandelt den Nachweis der Tragsicherheit für seicht- und tiefliegende Tunnel und das Thema Gebrauchstauglichkeit.

10 Mitgeltende Richtlinien u. Normen, berücksichtigte Unterlagen

Neben der bereits genannten HL-Richtlinie und den Stahlbeton Normen sind insbesondere

die ÖNORM B2203 – Untertagebauarbeiten, Teil 2 – Kontinuierlicher Vortrieb, Werkvertragsnorm, die kurz vor der Fertigstellung steht, zu beachten bzw. einzuhalten. Die österreichische Gesellschaft für Geomechanik hat des Weiteren eine Richtlinie für die geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit kontinuierlichem Vortrieb in Auftrag gegeben. Die hier vorgestellte Richtlinie bildet gemeinsam mit den o.g. Regelwerken einen abgestimmten Rahmen für Planung und Bau von mit TVM vorgetriebenen Verkehrstunneln. Als mit geltend sind auch die vom österreichischen Betonverein herausgegebenen Richtlinien für Faser-, Innenschalen- und Spritzbeton sowie Tübbinge (in Ausarbeitung) zu berücksichtigen. Ebenso mitgeltend sind die von der österreichischen Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr herausgegebenen Regelwerke für Tunnelbauten (RVS 9.24, RVS 9.32, RVS 9.34).

Bei der Erstellung der Richtlinie wurden darüber hinaus die einschlägigen Empfehlungen, die gemeinsam von DAUB, ÖGG und FGU herausgegeben wurden, sowie Richtlinien der Deutschen Bundesbahn und der ITA berücksichtigt.

Eine vergleichende Untersuchung der Querschnittelemente für maschinell vorgetriebene Eisenbahntunnel in Deutschland, in der Schweiz und in Österreich wurde am Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement der Universität Innsbruck, Bau-fakultät von D. Kruschke durchgeführt.

Die in Kapitel 6 – Querschnittsgestaltung geäußerte persönliche Meinung der Verfasser baut auf den in dieser Untersuchung dargelegten Fakten auf.