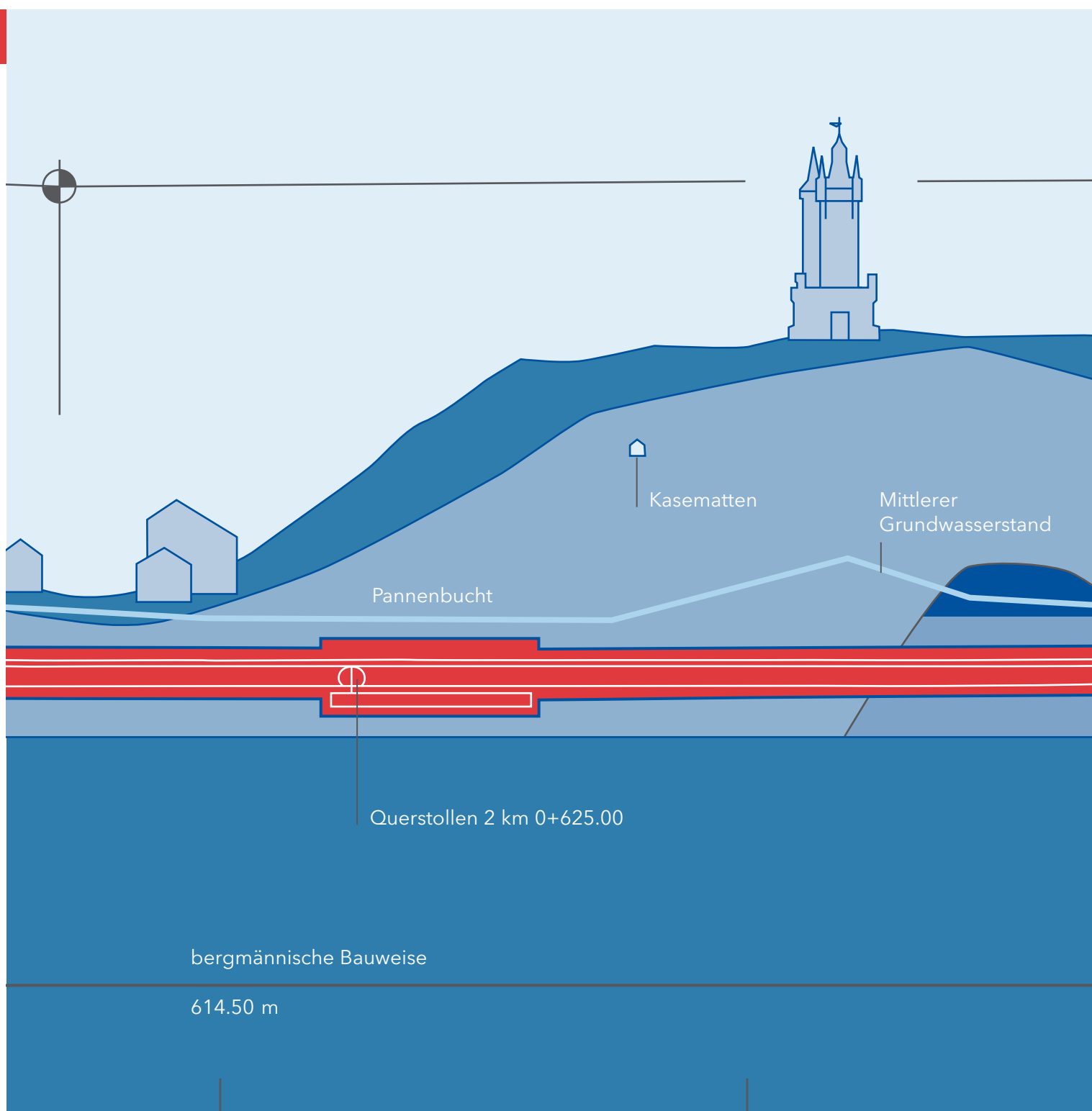




Wirtschaftliche Aspekte

bei Tunnelbauwerken in frühen Planungsphasen

Heft 52-2006





Impressum

Herausgeber

Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen
Stabsstelle Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Wilhelmstraße 10
65185 Wiesbaden

Bearbeiter

Dipl.-Ing. Ulrich Burbaum, CDM Amann Infutec Consult AG & Co. KG

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Krajewski, Fachhochschule Darmstadt/
CDM Amann Infutec Consult AG & Co. KG

Dipl.-Ing. Dipl.-Geol. Dr. Klaus J. Seeger, Hessische Straßen- und
Verkehrsverwaltung

Gestaltung

ansicht kommunikationsagentur,
www.ansicht.com

Druck

Druckerei Krapp GmbH

ISSN 0941-8881

© 2005 Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen
Alle Rechte vorbehalten

Tunnel als Verkehrsbauwerke haben eine verhältnismäßig kurze Geschichte. Die Anfänge des Tunnelbaus reichen zwar bis in die Zeiten des Kaiser Augustus zurück, mit dem Untergang des römischen Reiches verschwand jedoch das Wissen um die Tunnelbaukunst. Im 17. Jahrhundert beginnt in England und Frankreich der Verkehrstunnelbau in Form der Kanaltunnel. Der Ausbau insbesondere der schienengebundenen Infrastruktur im 19. Jahrhundert bedingte einen steigenden Bedarf an Tunnelstrecken zum Überwinden morphologischer Barrieren.

Dementsprechend wurden in den frühen 60-iger Jahren vor allem im Alpenraum große Straßenverkehrstunnel mit dem Ziel gebaut, Verkehrswege und Fahrzeiten zu verkürzen.

Mitte der 70-iger Jahre fand ein gesellschaftliches Umdenken statt. Ingenieur- und Verkehrsbauwerke, bis dato Symbol des Fortschritts, wurden in ihrer Folgewirkung auf Mensch, Natur und Landschaft betrachtet. Der Wunsch nach Bewahren des Lebensraumes führte weg vom Verkehrsbauwerk als bestimmendes Element und zur Fokussierung auf die Verkehrsdienstleistung für die Gesellschaft. Das zeitgleich steigende Verkehrsaufkommen forcierte die Tunnelbauaktivitäten insbesondere unter dem Aspekt, die Mobilität der Menschen auszubauen bei gleichzeitigem Schutz der Lebensräume und Erhalt unserer historisch gewachsenen städtischen Strukturen.

Die unterirdische Bautätigkeit hat sich deshalb in den vergangenen Jahrzehnten stark entwickelt, obwohl Deutschland aus geographischer Sicht kein typisches Tunnelbauland darstellt.

Die wachsenden baulichen und sicherheitstechnischen Anforderungen machen Tunnelbauwerke zu kostenintensiven Verkehrsabschnitten mit zunehmend steigenden Folgekosten. Die wirtschaftliche Verwendung von Verkehrsinfrastrukturmitteln ist daher von hoher Priorität. Bereits in sehr frühen Planungsstadien, lange vor der eigentlichen Projektrealisierung, erfolgen entscheidende Weichenstellungen für die spätere Kostenentwicklung.

Vor diesem Hintergrund entstand die vorliegende Planungshilfe. Sie soll dem Projektbearbeiter und anderen Projektbeteiligten die wirtschaftlichen Auswirkungen ihrer Planungsentscheidungen aufzeigen.

Hierdurch können bereits in einer frühen Projektphase kostenrelevante Randbedingungen erkannt und darauf aufbauend die Planungen hinsichtlich der Trassenführung wirtschaftlich optimiert werden.



Dr.-Ing. Jürg Sparmann
Präsident des Hessischen Landesamtes
für Straßen- und Verkehrswesen



INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	4
1.1	Zielsetzung	4
1.2	Planerische Randbedingungen	5
1.3	Aufbau und Anwendungsbereich der Planungshilfe	6
1.3.1	Inhalt	6
1.3.2	Datengrundlage	7
1.4	Grundsätze des Tunnelbaus nach der Spritzbetonbauweise	8
1.5	Bauverfahren und Bauablauf	14
2	Kosten von Tunnelbauwerken	16
2.1	Kostenfaktoren	16
2.2	Vergleichsbasis	17
3	Bauwerksgeometrie	20
3.1	Tunnellänge	20
3.1.1	Vorbemerkungen	20
3.1.2	Rohbau	22
3.1.3	Flucht- und Rettungssystem	22
3.1.4	Pannenbuchten	23
3.1.5	Technische Ausstattung	23
3.1.6	Betriebskosten	24
3.2	Steigung des Tunnels	24
3.2.1	Sicherheitsmaßnahmen	24
3.2.2	Entwässerung	24
3.3	Tunnelquerschnitt	26
3.3.1	Regelquerschnitt	26
3.3.2	Anzahl der Röhren	27
3.3.3	Querschnittsform	29

4	Gelände und Baugrund	30
4.1	Topographie	30
4.1.1	Einsatzbereiche alternativer Lösungen	30
4.1.2	Firstüberdeckung im bergmännischen Tunnelbau	32
4.1.3	Seitliche Gebirgsüberdeckung	33
4.1.4	Portallage	35
4.2	Gebirgseigenschaften	36
4.2.1	Gebirgsfestigkeit	36
4.2.2	Einfluss des Gebirges auf den Tunnelbau	37
4.2.3	Wechselnde Gebirgsverhältnisse	41
4.2.4	Umwelttechnische Aspekte	43
4.2.5	Verwertung von Ausbruchsmaterial	43
4.2.6	Arbeitssicherheit	43
4.3	Grund- und Bergwasser	44
4.3.1	Allgemeines	44
4.3.2	Einfluss in der Bauphase	45
4.3.3	Einfluss auf Bauwerkskonstruktion und die Betriebsphase	47
5	Umfeldfaktoren	50
5.1	Gebäude und Verkehrswege	50
5.1.1	Setzungen	50
5.1.2	Gebäudeunterfahrung	52
5.1.3	Randbebauung	53
5.1.4	Aufrechterhaltung von Verkehrswegen	54
5.2	Nachbarbebauung, Lärm und Erschütterungen	54
6	Zusammenfassung	56
	Literatur	57
	Anlagen	58

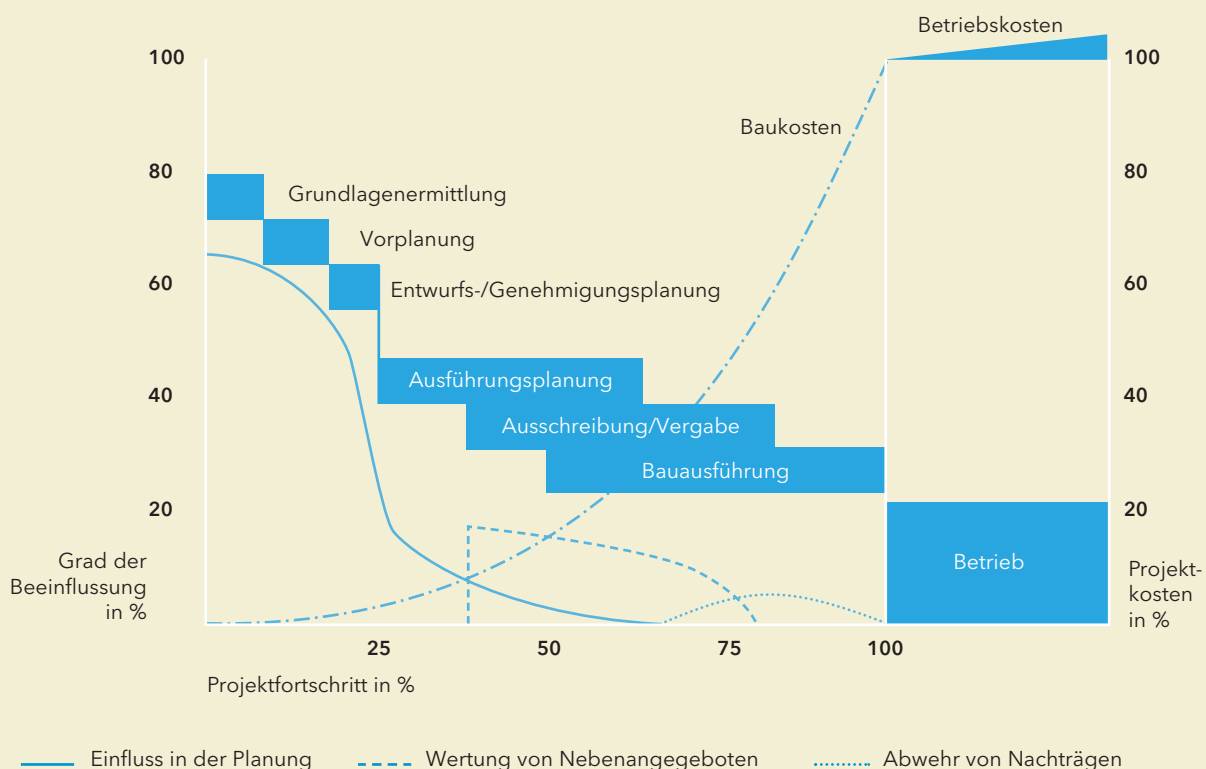
EINLEITUNG

1.1 Zielsetzung

Tunnelbauwerke stellen vielfach die technisch anspruchsvollsten und kostenintensivsten Abschnitte von Verkehrswegen dar. Dies betrifft sowohl den Bau als auch den Betrieb und die Unterhaltung des unterirdischen Straßenabschnittes. Die Kosten sind von zahlreichen Parametern abhängig, die häufig als bauwerksspezifische Randbedingungen in Projektierung, Bau und Betrieb eingehen. Dabei ist zu beachten, dass Planungsentscheidungen, die diese Randbedingungen definieren, erheblichen Einfluss in positiver wie auch in negativer Richtung haben können. So werden häufig bereits in

einem frühen Planungsstadium mit der Wahl von Trasse und Gradienten bei der Streckenplanung im Rahmen der **Linienfindung** und bei der weiteren Erarbeitung des **Streckenentwurfes** (entsprechend RE) und der daraus resultierenden Portallagen die Randbedingungen für den nachfolgenden **Bauwerksentwurf** (nach RAB-ING) festgelegt, die maßgeblich die Kosten für Bau und Betrieb dieser Ingenieurbauwerke bestimmen. Spätere Korrekturen sind in der Regel nur noch in eng begrenztem Maße möglich. Insbesondere genehmigungsrechtliche Gründe erschweren häufig die mit zunehmender Detailkenntnis sinnvollen, verschiedentlich auch fachlich notwendigen Anpassungen.

Abb. 1-1: Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Kostenentwicklung während der Projektrealisierung eines Tunnelbauwerkes [ergänzt nach Gottschalk 1994]



Die Abbildung 1-1 verdeutlicht den Zusammenhang, wonach die Möglichkeit zur Beeinflussung der Projektkosten mit zunehmender Konkretisierung der Planung laufend abnimmt, wohingegen die Gesamtkosten (Planungs- und Baukosten) stetig ansteigen.

Die vorliegende Studie entstand daher unter der Zielsetzung, die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Bauwerkskosten zu verdeutlichen und dem Planenden eine Einschätzung der Kostenwirksamkeit planerischer Entscheidungen zu ermöglichen.

Der möglichst kostengünstige Entwurf eines Tunnels bereits in einer frühen Projektphase – dies ist meistens die Linienfindung – ist ein äußerst wichtiger Planungsschritt und kann damit auch die Realisierungschancen beeinflussen. Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieser Planungshilfe, die wirtschaftlichen Auswirkungen von Planungsentscheidungen auf die Kosten für Tunnelbauwerke aufzuzeigen. Der Straßenplaner soll damit in die Lage versetzt werden, bereits bei der Linienfindung die wesentlichen Kosten bildenden Randbedingungen zu erkennen und dementsprechend eine verkehrsplanerisch als auch wirtschaftlich optimierte Trasse erarbeiten zu können.

1.2 Planerische Randbedingungen

Die Planung von Verkehrstunneln stellt bekanntlich eine außergewöhnlich komplexe Ingenieuraufgabe dar, bei der unterschiedlichste Randbedingungen zu beachten sind. Solche Planungen können nicht nach schematisierten Abläufen bearbeitet werden. Dennoch soll im Folgenden versucht werden, anhand eines Leitfadens als Planungshilfe sicherzustellen, dass bereits bei ersten Planungsschritten, in denen im Allgemeinen verkehrstechnische Aspekte im Vordergrund stehen (z. B. bei der Linienfindung), auch die wichtigsten tunnelbautechnischen Belange berücksichtigt werden. Auf diese Weise soll bereits in frühen Planungsstadien eine wirtschaftlich und technisch optimierte Tunnelplanung angegangen werden.

Bei der Planungshilfe wird vorausgesetzt, dass die wesentlichen für die Linienfindung relevanten Einflussfaktoren, wie z. B. Bebauung, Infrastruktur, Naturschutz, Lärmschutz u. a., bereits Eingang in die Planung gefunden haben. Ferner ist bereits im Vorfeld anhand der jeweiligen örtlichen Randbedingungen zu klären, ob an Stelle eines Tunnelbauwerkes alternative Lösungen wirtschaftlicher sein können (vgl. auch Kap. 4). Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Randbedingungen können im günstigen Fall unterschiedliche Strecken- bzw. Bauwerksvarianten den weiteren Betrachtungen zugrunde gelegt werden.

Um die wirtschaftlichen Aspekte eines Tunnelbauwerkes zu bewerten, werden in einem ersten Schritt die Kostenaspekte, die aus der Bauwerksgeometrie resultieren, betrachtet (Kapitel 3). Die hierfür erforderlichen Informationen liegen in der Regel bereits in einem frühen Planungsstadium vor. Mit zunehmender Informations- und Datengrundlage kann in einem zweiten Schritt der Einfluss von Baugrund und Grundwasser auf die späteren Baukosten bewertet werden (Kapitel 4). Schließlich sind Randbedingungen wie die Unterfahrung von Gebäuden u.ä. zu bewerten (Kapitel 5), wobei solche Einflüsse in der Regel als kostenverursachend einzurechnen sind, meist aber nicht durch Trassenvarianten vermieden werden können.

Grundsatz: Einflussnahme auf die Baukosten bei Tunnelbauwerken

Mit der Festlegung der Portallagen erfolgt bereits in einem frühen Planungsstadium eine wesentliche Weichenstellung bezüglich der späteren Baukosten.

1.3 Aufbau und Anwendungsbereich der Planungshilfe

1.3.1 Inhalt

In diesem Heft werden die wesentlichen Faktoren aufgezeigt, die die Kosten beim Bau und während des Betriebs des Bauwerkes beeinflussen. Da im Stadium der Linienfindung in der Regel noch keine vertieften Kenntnisse beispielsweise zur Beschaffenheit des Untergrundes vorliegen, ist eine Beurteilung der Situation nur auf der Grundlage allgemein erhältlicher Informationen möglich. Dieser Randbedingung wird in diesem Heft Rechnung getragen. Die Beeinflussung der Baukosten durch planerische Entscheidungen bzw. die Wechselwirkung zwischen Planungsentscheidung und Kosten werden qualitativ aufgezeigt.

Den deutlich größten Anteil an den Baukosten stellen die Kosten für Ausbruch und Sicherung dar. Ferner ist dieser Bauabschnitt sicherheitsrelevant und risikobehaftet. Für den Erfolg einer Tunnelbaumaßnahme ist daher von großer Bedeutung, dass die Wahl von Trasse und Gradienten sowohl einen sicheren als auch kostenoptimierten Vortrieb zulässt. Die späteren Bauphasen, wie beispielsweise der Einbau der Innenschale, aber auch die technische Ausrüstung, haben demgegenüber geringere Kostenrisiken. Demzufolge werden in diesem Heft die den bergmännischen Tunnelvortrieb beeinflussenden Faktoren verstärkt behandelt. Der maschinelle Vortrieb von Straßentunneln mit Hilfe von Tunnelbohrmaschinen stellt in den Mittelgebirgsregionen bisher einen Spezialfall dar, der im Folgenden nicht weiter berücksichtigt wird und in einer weiteren Ausarbeitung bearbeitet wird.

Wirtschaftlichkeitsaspekte bei Tunnelbauwerken in offener Bauweise werden nicht vertieft behandelt, sondern im Wesentlichen hinsichtlich deren Abgrenzung zum Anwendungsbereich des bergmännischen Tunnelbaus betrachtet.

Neben den Kosten für den Rohbau werden die Kosten für die technische Ausstattung betrachtet. Art und Umfang der technischen Ausstattung ist in den „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ [U1] festgelegt. Sofern möglich, werden Betriebskosten mit relativen Kostenanteilen berücksichtigt.

Die Kostenwirksamkeit von Planungsentscheidungen ist im Tunnelbau komplex, da sich unterschiedliche Faktoren positiv bzw. negativ überlagern. In dem vorliegenden Heft wird abschnittsweise der Einfluss von einzelnen losgelösten Randbedingungen behandelt. Die Überlagerung der unterschiedlichen Aspekte ist vom Planer vorzunehmen.

Selbstverständlich sind neben den hier behandelten allgemeinen Grundsätzen zum Entwurf von Tunnelbauwerken auch örtliche, projektbezogene Randbedingungen zu beachten, auf die im Rahmen dieser Studie nicht eingegangen werden kann. Die vorliegende Planungshilfe stellt daher keine Grundlage für Kostenkalkulationen oder Wirtschaftlichkeitsvergleiche dar. Diese sind für jeden Einzelfall auf Basis der entsprechenden Planungsunterlagen zu erstellen. Anhand der nachfolgenden Ausführungen wird jedoch eine erste qualitative Einschätzung der zu erwartenden Baukosten möglich. Verschiedene technische Lösungen können somit unter Wirtschaftlichkeitsaspekten betrachtet und weiterverfolgt oder ggf. ausgeschlossen werden.

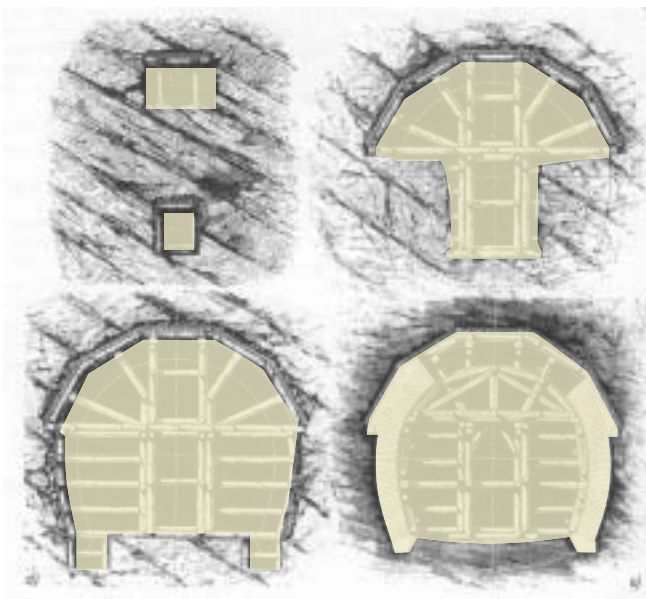
1.3.2 Datengrundlage

Die diesem Entwurfsheft zugrunde liegenden Kosten basieren auf Erfahrungswerten aus realisierten Projekten in Hessen und anderen Bundesländern sowie auf Angaben von Baufirmen (ohne Wettbewerb). Die Angaben berücksichtigen die tatsächlichen Kosten. Es ist zu berücksichtigen, dass die bei einzelnen Projekten entstandenen Kosten im Vergleich starke Streuungen aufweisen. Der Betrachtung der Einflussfaktoren wurden deshalb mittlere Kosten unter Angabe einer realistischen Streubreite zugrunde gelegt.

Die [Ergebnisse von Ausschreibungen](#) können aufgrund von örtlichen Randbedingungen, der allgemeinen Preisentwicklung, konjunkturellen Schwankungen, unterschiedlicher kalkulatorischer Ansätze sowie aus akquisitionstrategischen Gründen der im Wettbewerb stehenden Bieter [erheblich von den Ansätzen abweichen](#).

Weiterhin werden im Rahmen dieser Studie Standardfälle behandelt. Örtliche, projektbezogene Besonderheiten, welche die Kosten erheblich beeinflussen können, werden soweit möglich genannt. Die berücksichtigten Kosten beinhalten keine Kosten für Planungs- und Beratungsleistungen, Baugrunduntersuchungen oder Leistungen für das Projektmanagement.

Abb. 1-2: Alte Österreichische Tunnelbauweise (aus [U6])



1.4 Grundsätze des Tunnelbaus nach der Spritzbetonbauweise

Um Trasse und Gradiente eines Tunnels optimal wählen zu können, ist es erforderlich, die Kosten bildenden Randbedingungen zu erkennen. Hierfür wiederum ist zumindest ein Grundverständnis dafür erforderlich, wie das Tragsystem eines bergmännisch aufgefahrenen Tunnels ausgebildet ist.

Das Tragverhalten von modernen Tunnelbauwerken unterscheidet sich grundsätzlich von demjenigen der traditionellen Bauweisen. Vor Einführung der Spritzbetonbauweise (auch: Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT, international: New Austrian Tunneling Method (NATM)) erfolgte der Tunnelbau vielfach in Anlehnung an die Bauweisen im Bergbau. Der Hohlraum wurde abschnittsweise hergestellt und nach massiver Holzverzimmerung partiell erweitert. Die Sicherung erfolgte in der Regel durch stark dimensionierte Mauerwerksgewölbe (Abb. 1-2). Diesem Konzept liegt die Vorstellung zugrunde, dass mit dem Ausbruch oberhalb des Hohlraums ein Gebirgskörper destabilisiert wird, der sich mit seinem Eigengewicht, quasi als Last, auf die Tunnelsicherung legt.

Abb. 1-3: Ausbruch und Sicherung im traditionellen Bergbau (Türstockbauweise) (aus [U6])

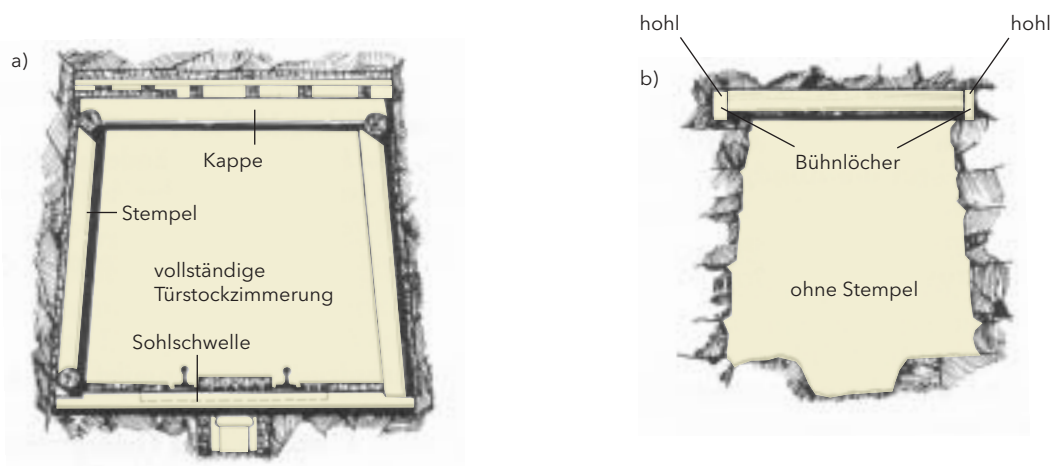
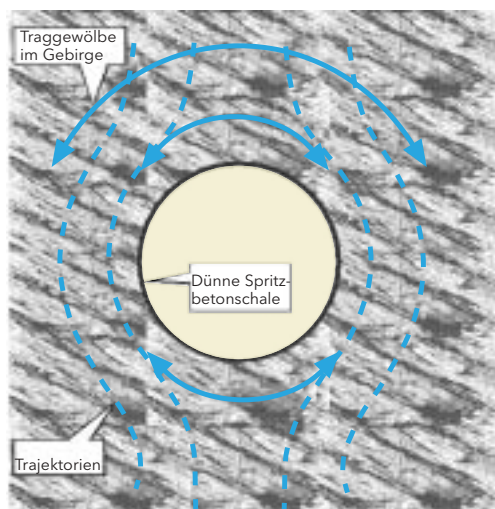


Abb. 1-4: Tragsystem des Tunnelbaus nach der Spritzbetonbauweise



Das statische Konzept entspricht weitgehend demjenigen eines Türstocks, bei welchem der horizontale Balken durch Auflasten beansprucht wird. Die Einwirkungen werden vom Balken auf die vertikalen Pfosten weiter gegeben, die die Lasten wiederum über die Stützenfüße in das Gebirge einleiten (Abb.1-3).

Dieses Tragkonzept bildet jedoch nicht die gebirgsmechanischen Verhältnisse im modernen Tunnelbau ab. Bei der Spritzbetonbauweise wird das Gebirge nicht als „Last“ verstanden. Vielmehr werden die Tragfähigkeit und Festigkeit des Gebirges als Bestandteil des Gesamttragwerks genutzt. Es wird vorausgesetzt, dass sich im Gebirge ein gewölbeartiger Tragring um den Hohlraum herum ausbildet. Der Boden bzw. der Fels trägt



EINLEITUNG

damit die Eigengewichtslasten im Wesentlichen selbst ab und es wird nur eine verhältnismäßig schwache Unterstützung des Tragsystems durch die Tunnelauskleidung erforderlich (Abb. 1-4). Dieses geomechanische Traggewölbe kann sich allerdings nur bei einer ausreichenden Überdeckung und bei hinreichender Qualität des dort anstehenden Gebirges ausbilden.

Grundsatz: Tragmodell für den bergmännischen Tunnelbau

Bergmännische Tunnel sind so zu planen, dass sich um den Ausbruchsquerschnitt herum im Gebirge ein Traggewölbe ausbilden kann. Die Sicherung und der Ausbau des Tunnels hat als tragendes Element eine nachgeordnete Bedeutung. Das wesentliche Tragelement besteht bei Tunnelbauwerken dementsprechend aus dem Gebirge selbst. Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Tunnelbau und den meisten anderen Ingenieurprojekten besteht u. a. darin, dass der Baugrund den vom Bauherrn gelieferten „Baustoff“ für das Tragwerk darstellt.

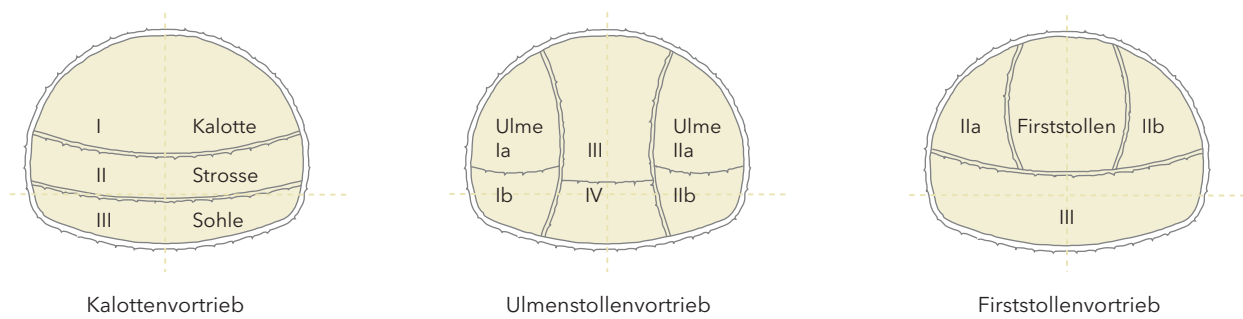
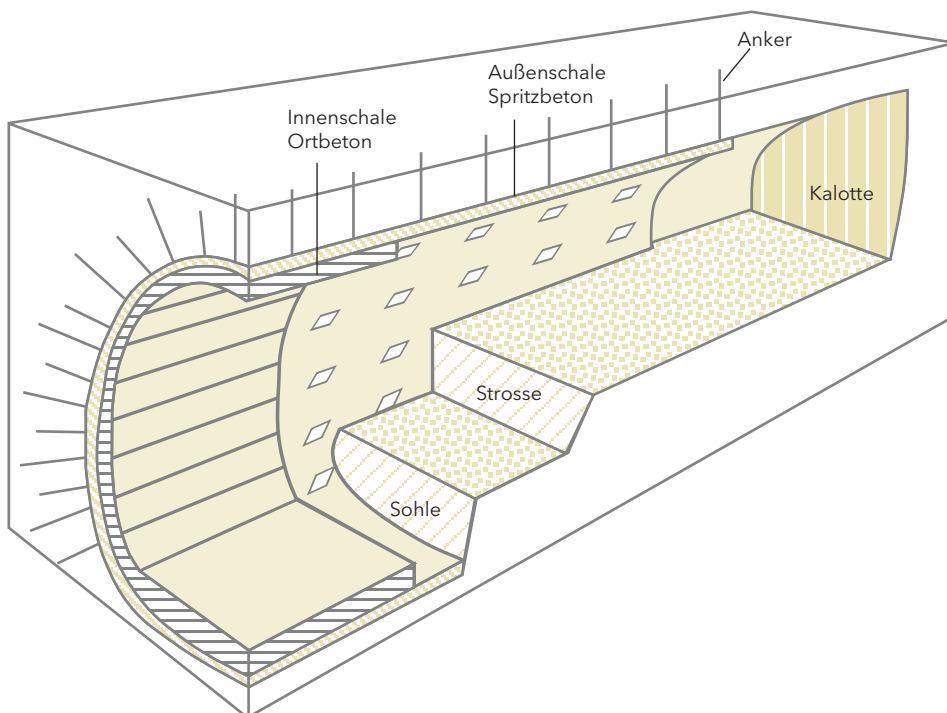
Mit dem Ausbruch des Tunnelquerschnitts wird in der Natur das ursprünglich im Gebirge vorhandene Gleichgewicht der Spannungen verändert. Es ist Aufgabe der planenden und bauausführenden Ingenieure den Ausbruch und die nachfolgenden Sicherungsmaßnahmen so zu wählen, dass sich zu jedem Zeitpunkt ein neuer sicherer Gleichgewichtszustand ausbilden kann. Hierfür ist es erforderlich, die Ausbruchfolgen sowohl hinsichtlich der Dimensionierung von Teilausbrüchen als auch hinsichtlich der zeitlichen Abfolge festzulegen.

Gleichzeitig sind geeignete Sicherungsmittel, wie z. B. Spritzbeton, Anker, Spieße, Rohrschirme etc. einzubauen. Maßgebend für die Notwendigkeit und Dimensionierung der Maßnahmen sind in erster Linie die jeweilige Gebirgsqualität und -beschaffenheit, die geometrischen Randbedingungen (Firstüberdeckung, seitliche Gebirgsüberdeckung etc.) sowie die Bergwasserverhältnisse.

In standsicherem Fels oberhalb des Bergwasserspiegels und vergleichsweise geringem Ausbruchsquerschnitt kann häufig, in Anlehnung an traditionelle Bauweisen, ein so genannter Hufeisenquerschnitt ausgeführt werden. Der aus statischer Sicht vorhandene Nachteil des in der Sohle nicht geschlossenen Tragwerks kann dabei wegen der günstigen Festigkeitseigenschaften des Gebirges hingenommen werden.

Bei ungünstigeren Gebirgsverhältnissen wird eine geschlossene und ausgerundete Querschnittsform notwendig. Der Ausbruchsquerschnitt muss dabei aus statischen und/oder aus arbeitstechnischen Gründen vielfach in Teilausbrüche unterteilt werden. Im günstigsten Fall kann ein so genannter Kalottenvortrieb durchgeführt werden, bei welchem zunächst der obere Abschnitt, die Kalotte, ausgebrochen und gesichert wird (Abb. 1-5a). Zeitlich und räumlich nachlaufend erfolgt später der Ausbruch der Strosse und schließlich der Sohle (Abb. 1-6). Ungünstige Gebirgsverhältnisse können bei dieser Bauweise den Einbau einer so genannten temporären Kalottensohle notwendig machen, die beim nachfolgenden Ausbruch der Strosse wieder abgebrochen wird.

Abb. 1-5: Unterteilung des Ausbruchsquerschnitts

Abb. 1-6: Räumliche Ausbruchs- und Sicherungsfolge im Tunnelvortrieb nach der Spritzbetonbauweise
(Hier: Kalotte - Strosse - Sohle - Vortrieb)

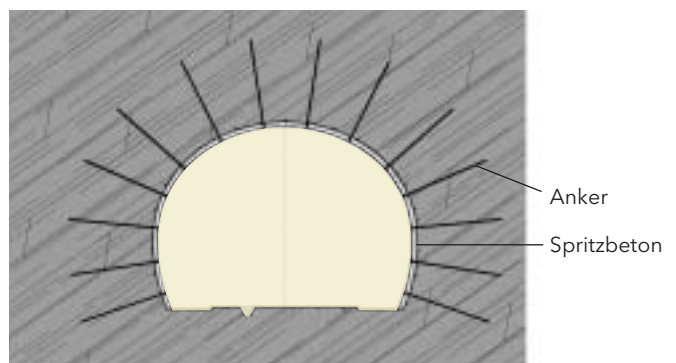
EINLEITUNG

In besonders ungünstigen Fällen kann eine weitere Unterteilung des Ausbruchsquerschnittes erforderlich werden. Beim Ulmenstollenvortrieb (Abb. 1-5b) werden zunächst kleinformatige, seitlich im endgültigen Tunnelquerschnitt (an den Ulmen) angeordnete Stollen hergestellt. Der Ausbruch des Kerns erfolgt anschließend, wobei auch hier die zuvor eingebaute Spritzbetonschale teilweise wieder abgebrochen werden muss. Die einzelnen Ausbrüche werden bei dieser Vorgehensweise aus Standsicherheitsgründen, aber auch arbeitstechnisch in weitere Teilquerschnitte unterteilt (Kalotte, Strosse, Sohle). Alternativ zum Ulmenstollenvortrieb wird verschiedentlich auch ein so genannter Firststollenvortrieb ausgeführt (Abb. 1-5c).

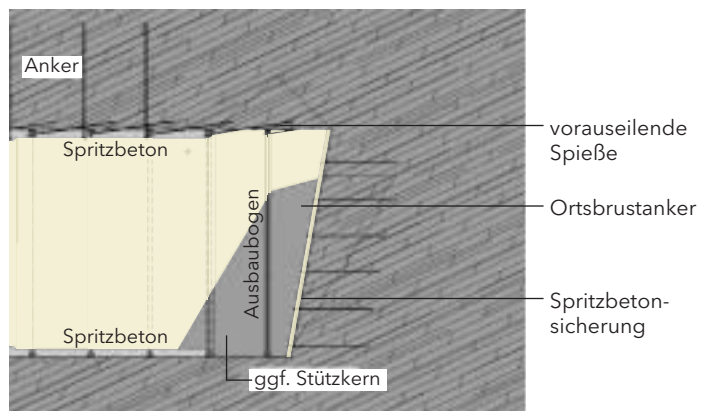
Der Vortrieb des Tunnels erfolgt in so genannten Abschlägen, die beim Kalottenvortrieb beispielsweise i. A. zwischen ca. 0,8 m und 2 m lang sind. Die Ortsbrust, das heißt, das beim Ausbruch freigelegte Gebirge ist i. A. unmittelbar nach dem Entfernen des gelösten Gesteins zu sichern. Es handelt sich hierbei um eine provisorische Sofortmaßnahme. Man unterscheidet Maßnahmen,

- die dem Arbeitsschutz und der Ertüchtigung (Verstärkung) des Gebirgstragsrings dienen (z.B. Ausbaubögen, Systemankerung, Abb. 1-7a),
- die der Sicherung der Ortsbrust, d. h. der Ausbruchfläche (z.B. Ankerung der Ortsbrust, Stützkern, Abb. 1-7b) dienen,
- zur vorausgehenden Sicherung des Ausbruchsquerschnitts (z.B. Spieße, Rohrschirme, Abb. 1-7c) verwendet werden.

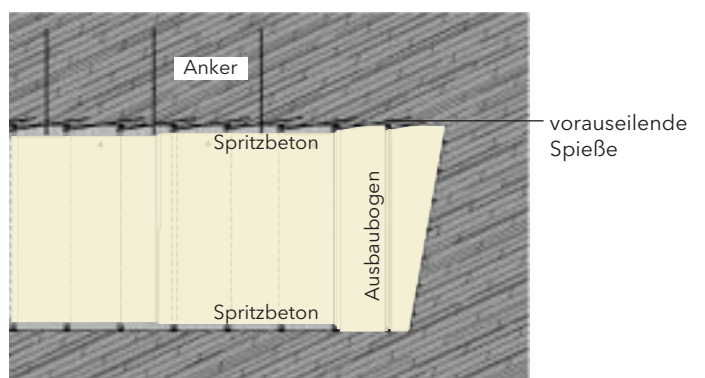
Abb. 1-7: Sicherungsmittel im Tunnelbau



a Systemankerung in Ringrichtung



b Ortsbrust mit Anker und Stützkern



c Spießeisicherung

Die Ausbruchs- und Sicherungssequenzen bzw. -maßnahmen sind im Tunnelbau infolge der wechselnden Gebirgsverhältnisse, aber auch infolge wechselnder Randbedingungen (Überdeckung, vorhandene Bebauung etc.) i. A. vielfältig. Eine mehr oder weniger starre Planung und Vorabfestlegung der Maßnahmen wird den Notwendigkeiten nicht gerecht und ist im Tunnelbau nicht möglich. Vielmehr müssen die Ausbruchs- und Sicherungsmittel während des Vortriebs entsprechend den jeweiligen Verhältnissen gewählt werden. Um trotz dieser variablen Vorgehensweise eine zuverlässige Grundlage für die Kalkulation und Preisbildung einerseits und für die Abrechnung der Leistungen ander-

erseits zu schaffen, werden im Tunnelbau Vortriebsklassen definiert. Diese werden projektspezifisch erarbeitet und stellen einen Katalog von Maßnahmen dar, der den Entscheidungen während des Vortriebs zugrunde gelegt wird. Die Definition der Vortriebsklassen („Ausbruchsklasse“) orientiert sich in der Regel an den Vorgaben der DIN 18312, die Bestandteil der VOB [U8] ist. Danach werden grundsätzlich sieben Vortriebsklassen (VKL) plus Varianten unterschieden, wobei für Verkehrstunnel in Deutschland i.d.R. die nachfolgend aufgeführten Klassen Bedeutung haben:

Abb. 1-8: Häufig zur Anwendung kommende Vortriebsklassen

Vortriebsklasse	Unterteilung des Ausbruchsquerschnitts erforderlich	Sicherung der Ortsbrust erforderlich	Vorausseilende Sicherung des Gebirges erforderlich
VKL 3	nein	nein	nein
VKL 4A	ja	nein	nein
VKL 5A	ja	ja	nein
VKL 6A	ja	nein	ja
VKL 7A	ja	ja	ja



EINLEITUNG

Der bautechnische Aufwand im Vortrieb erhöht sich mit steigender Ausbruchsklasse dadurch, dass z.B. nicht der gesamte Ausbruchsquerschnitt in einem Arbeitsgang gelöst werden kann oder eine zusätzliche Sicherung des Gebirges erforderlich wird (Abb. 1-8).

Die Vortriebsklassen 3 und 4 kommen beim Auffahren von Tunneln in kompakten Festgesteinen wie z.B. Basalt, Diabas, Granit, Diorit, massigen Kalksteinen und ähnlichen Gesteinen in Betracht. In geschichteten Sedimentgesteinen wie z.B. Sandsteinen, Sandstein-Tonstein-Wechselfolgen u.ä. kommen in Abhängigkeit vom Verwitterungs- und Auflockerungsgrad meist die Vortriebsklassen 5A, 6A und 7A zur Ausführung. In stark entfestigtem Gebirge, Störzonen und Lockergesteinsbereichen kommt meist eine Vortriebsklasse 7A mit zusätzlichen Maßnahmen (zusätzliche Sicherungen, statisch erforderlicher Sohlschluss, weitere Unterteilung des Ausbruchsquerschnitts, Rohrschirm etc.) zur Anwendung.

Die hessischen Mittelgebirgslandschaften sind tunnelbautechnisch häufig als vergleichsweise ungünstig zu beurteilen. Selbst in weitgehend unverwittertem Festgestein ist infolge der oft vorhandenen starken tektonischen Zerlegung günstigenfalls ein Vortrieb in der Vortriebsklasse 5A möglich. In verwittertem Festgestein bzw. Lockergestein überwiegt die Anwendung der Vortriebsklasse 7A.

Im Buntsandstein von Ost- und Südhessen kann es bei vergleichsweise hohen Gesteinsfestigkeiten zur Absonderung von blockigen Felskeilen oder -platten kommen. In diesen Fällen ist eine vorausseilende Firstsicherung erforderlich, die in den Vortriebsklassen 6A und 7A vorgesehen ist. Lediglich in wenigen Gebieten Hessens, z.B. im kristallinen Festgestein des Odenwaldes oder des Rheinischen Schiefergebirges werden bereichsweise so günstige Gebirgsverhältnisse angetroffen, dass ein Vortrieb in den Klassen 3 oder 4 möglich ist.

1.5 Bauverfahren und Bauablauf

Das Bauverfahren bzw. der Bauablauf ist im Wesentlichen von der Tunnelgeometrie (Länge, Querschnitt) und den örtlichen Verhältnissen (Grundwasser, Bebauung, Schutzgüter etc.) abhängig. Die Auswirkungen auf die Baukosten werden daher in den nachfolgenden Kapiteln in den entsprechenden Abschnitten behandelt.

Wichtig ist, bereits in frühen Planungsphasen den erforderlichen Flächenbedarf für Baustelleneinrichtung und Zuwegungen zu berücksichtigen, da dieser das spätere Bauverfahren bzw. den Bauablauf einschränken kann. Dies trifft insbesondere für längere Tunnelbauwerke zu, wo ein Gegenvortrieb oder ein Zwischenangriff wirtschaftlich sinnvoll sein kann oder Lüftungsstollen/-schächte erforderlich werden.

Um eine möglichst wirtschaftliche Bauausführung zu ermöglichen, sollte eine Festlegung des Bauverfahrens bzw. Bauablaufes in frühen Planungsphasen (Vorplanung, RE-Entwurf) nach Möglichkeit nicht erfolgen, sondern der Bearbeitung des Bauwerksentwurfs oder der Ausführungsplanung vorbehalten sein.

Grundsatz: Bauverfahren und Bauablauf

Der für verschiedene Bauverfahren/Bauabläufe erforderliche Flächenbedarf ist möglichst frühzeitig zu berücksichtigen. Eine Festlegung oder Einschränkung des Bauverfahrens sollte vermieden werden.

2

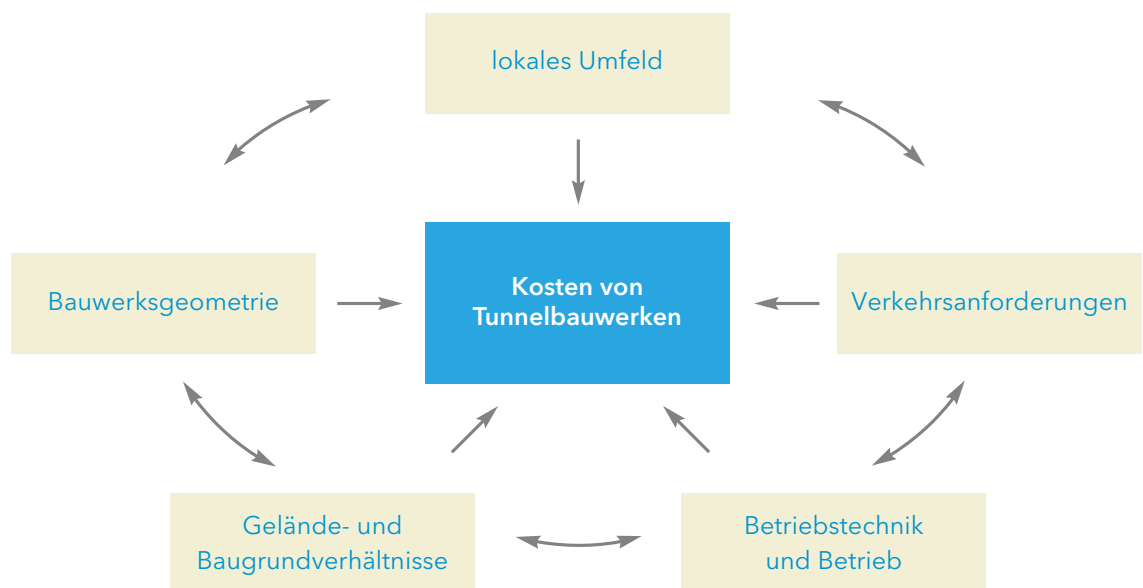
KOSTEN VON TUNNELBAUWERKEN

2 Kosten von Tunnelbauwerken

2.1 Kostenfaktoren

Die Kosten von Tunnelbauwerken sind von unterschiedlichen Einflüssen bestimmt. Wesentliche Faktoren sind z. B. die Bauwerksabmessung, also Länge des Bauwerks und zugeordneter Regelquerschnitt, und die Baugrundverhältnisse. Lokale Randbedingungen wie z. B. Bebauung im innerstädtischen Bereich, die betriebstechnische Ausstattung oder die Verkehrsbelastung sind weitere Kostenfaktoren, welche nicht voneinander unabhängig betrachtet werden können, sondern sich gegenseitig beeinflussen.

Abb. 2-1: Einflussfaktoren auf die Kosten von Tunnelbauwerken



Den weitaus größten Anteil nehmen die Rohbaukosten ein, weshalb diese im Mittelpunkt der weiteren Betrachtungen stehen. Auf die Tunnelausstattung entfällt zwar ein deutlich geringerer Anteil der Gesamtbaukosten, jedoch ist infolge des zunehmenden Einsatzes von Sicherheits- und Leittechnik ein wachsender Einfluss feststellbar. Bezogen auf die lange Nutzungsdauer des Tunnelbauwerkes sind auch die späteren Betriebskosten für die Wirtschaftlichkeit von Bedeutung und bei einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung zu berücksichtigen.

2.2 Vergleichsbasis

Wie bereits ausgeführt, sind die verschiedenen Einflüsse auf die Baukosten von Tunneln nicht voneinander unabhängig. Um die Auswirkungen von einzelnen Planungsentscheidungen auf die Baukosten transparent zu machen, wurden Randbedingungen für ein Vergleichsbauwerk (Referenz-tunnel) als Bezugsgröße festgelegt. Bei diesem Tunnel wird von realistischen, aber günstigen Verhältnissen hinsichtlich Bauwerkskonstruktion und Baugrund ausgegangen.

Um die Kostenkonsequenzen aufzuzeigen, werden die Einflüsse von im Wesentlichen erschwerenden Randbedingungen dargestellt. Bezüglich dieses **Referenz-tunnels** werden im Folgenden jeweils eine Einflussgröße variiert (z.B. der Regelquerschnitt) und die entsprechenden Auswirkungen anhand der spezifischen Baukosten betrachtet.

In die Kalkulation des Referenz-tunnels sind die in Kapitel 1.3.2 genannten Daten als Kostenansätze eingeflossen. Betrachtet wird ein in Spritzbetonbauweise hergestellter Tunnel, da dieses Verfahren die in deutschen Mittelgebirgen am häufigsten verwendete Bauweise darstellt. Als Bezugsbauwerk wird ein Tunnel in einem Gebirge mit guten Tragfähigkeitseigenschaften gewählt. Die Überdeckung beträgt in der Regel mehr als 20 m. Der bergmännische Vortrieb erfolgt zumeist durch Sprengen. Die günstigen Gebirgseigenschaften erlauben einen zügigen Vortrieb infolge großer möglicher Abschlagslängen (z.B. Vortriebsklassen 3 und 4).

Die Flanken des Gebirgszuges sind steil, so dass die Länge der Voreinschnitte verhältnismäßig kurz ist (Abb. 2-2). Anfahrestrecken mit ungünstigen Gebirgseigenschaften (z.B. Hanglehm, starke Verwitterung oder Zerrüttung des Gebirges) sind kurz: Portal und ca. 20 m des Tunnels werden in offener Bauweise erstellt, weitere 10 m werden noch unter ungünstigen Vortriebsbedingungen (z.B. Vortriebsklasse 7A) hergestellt.

2

KOSTEN VON TUNNELBAUWERKEN

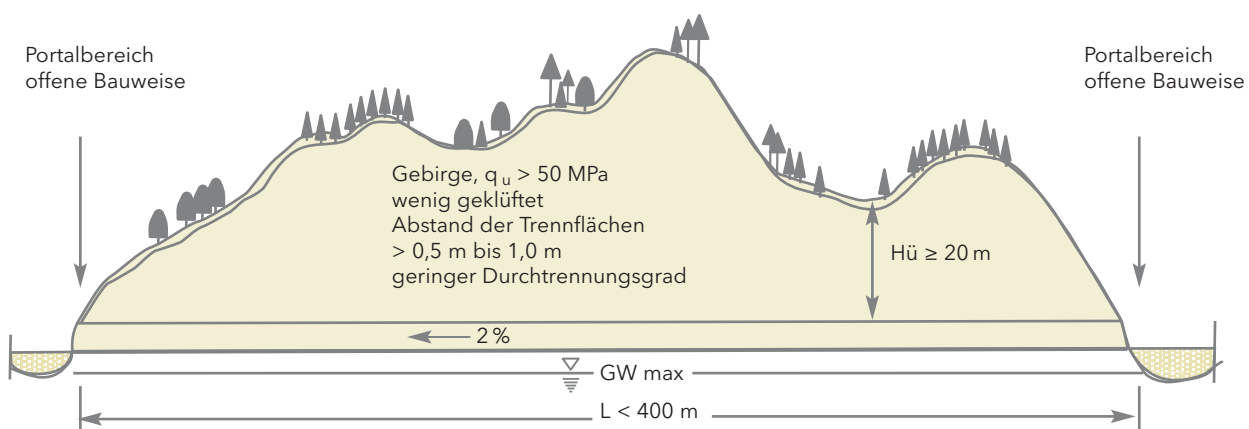


Abb. 2-2: Längsschnitt des als Vergleichsbasis dienenden Referenz隧NELS

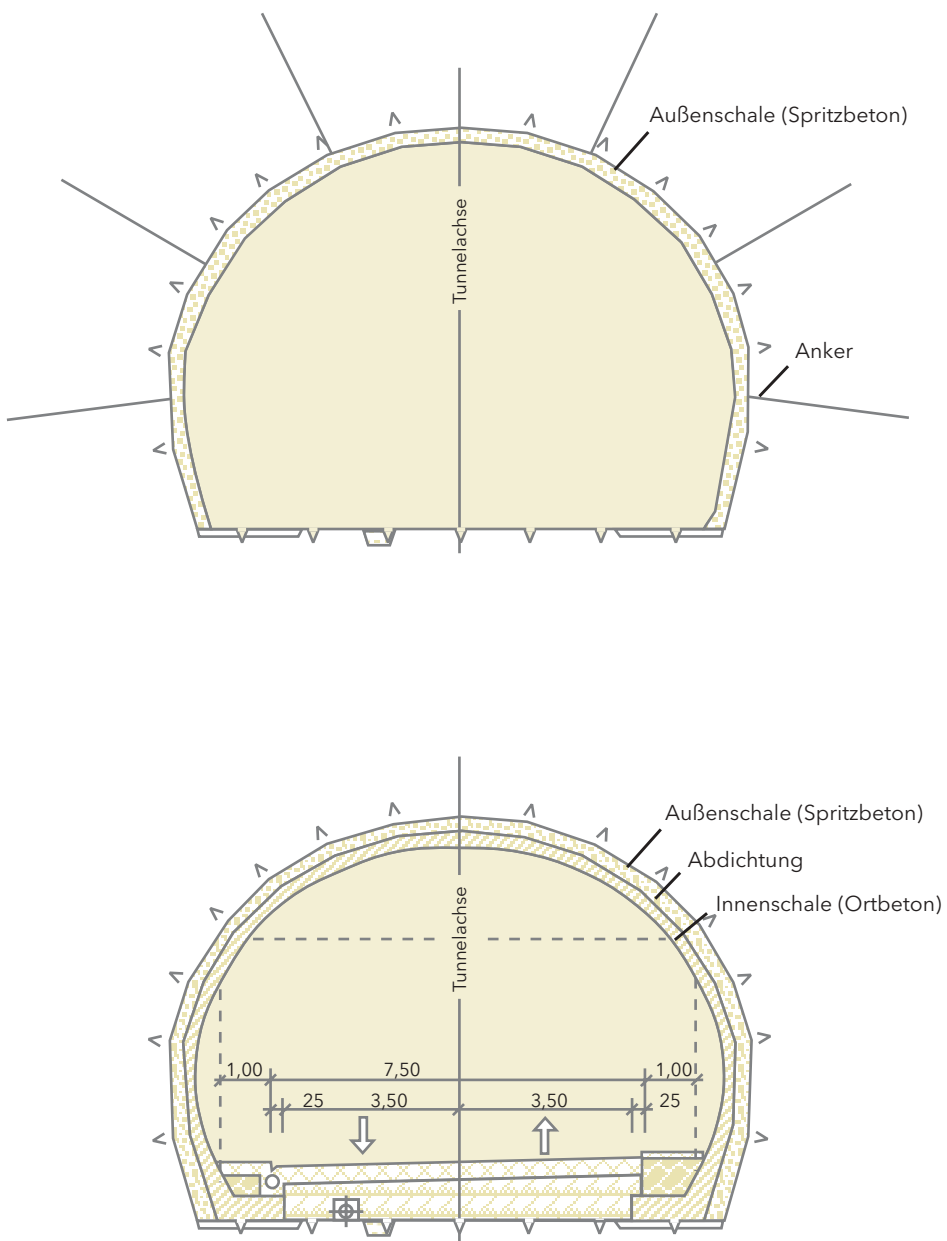
Der Tunnel wird mit einer Röhre im Querschnitt RQ 10,5 T ausgebildet (Gegenverkehr). Die Länge des Bauwerks beträgt $< 400 \text{ m}$. Die Trasse verläuft gerade (keine Kurven, kein Wechsel der Steigung). Die Gradienten sind schwach geneigt, der Vortrieb erfolgt einseitig in steigender Richtung.

Der Grundwasserspiegel liegt unterhalb der Tunnelsohle. Als Querschnittsform der Innenschale wird ein Hufeisenprofil mit offener Sohle verwendet. Diese Innenschale wird in Mindestdicke und Regelqualität sowie mit einer sog. Regenschirmabdichtung ausgeführt, zuzickerndes Bergwasser wird dräniert (Abb. 2-3). Die konstruktive Ausgestaltung entspricht den derzeitigen im Bundesfernstraßenbereich geltenden Regelwerken [U1], [U7].

Die Kostenansätze sind als spezifische Kosten (netto) für einen laufenden Meter Tunnelröhre ausgedrückt. Alle Preisangaben sind Netto-Kosten ohne Berücksichtigung der Mehrwertsteuer. Für diesen Referenz隧NELS mit günstigen Randbedingungen wurden mittlere spezifische Baukosten (Rohbau und technische Ausstattung) von 14.000 bis 16.000 Euro/lfdm kalkuliert.

Eine weitergehende wirtschaftliche Bewertung unter Ansatz von Nutzungsdauer, kalkulatorischer Kosten und anderer Faktoren erfolgte nicht, da diese als Wirtschaftlichkeitsuntersuchung dem Einzelfall vorbehalten bleibt.

Abb. 2-3 Querschnitt des als Vergleichsbasis dienenden Referenztunnels



3

BAUWERKSGEOMETRIE

3.1 Tunnellänge

3.1.1 Vorbemerkungen

Die Länge eines Tunnels beeinflusst entscheidend die Gesamtbaukosten des Projekts. Dementsprechend sollte die Tunnellänge soweit als möglich minimiert werden.

Die Gesamtbaukosten steigen annähernd proportional zur Tunnellänge. Aus durchgeführten Untersuchungen geht hervor, dass die spezifischen Baukosten je Meter Tunnelröhre für einen ca. 1.000 m langen Tunnel im Mittel etwa 3 % bis 5 % unter den spezifischen Baukosten für einen ca. 500 m langen Tunnel liegen. Bei einem 2.000 m langen Tunnel sinken die Kosten je Tunnelmeter um bis zu 7 % (s. Abb. 3-2).

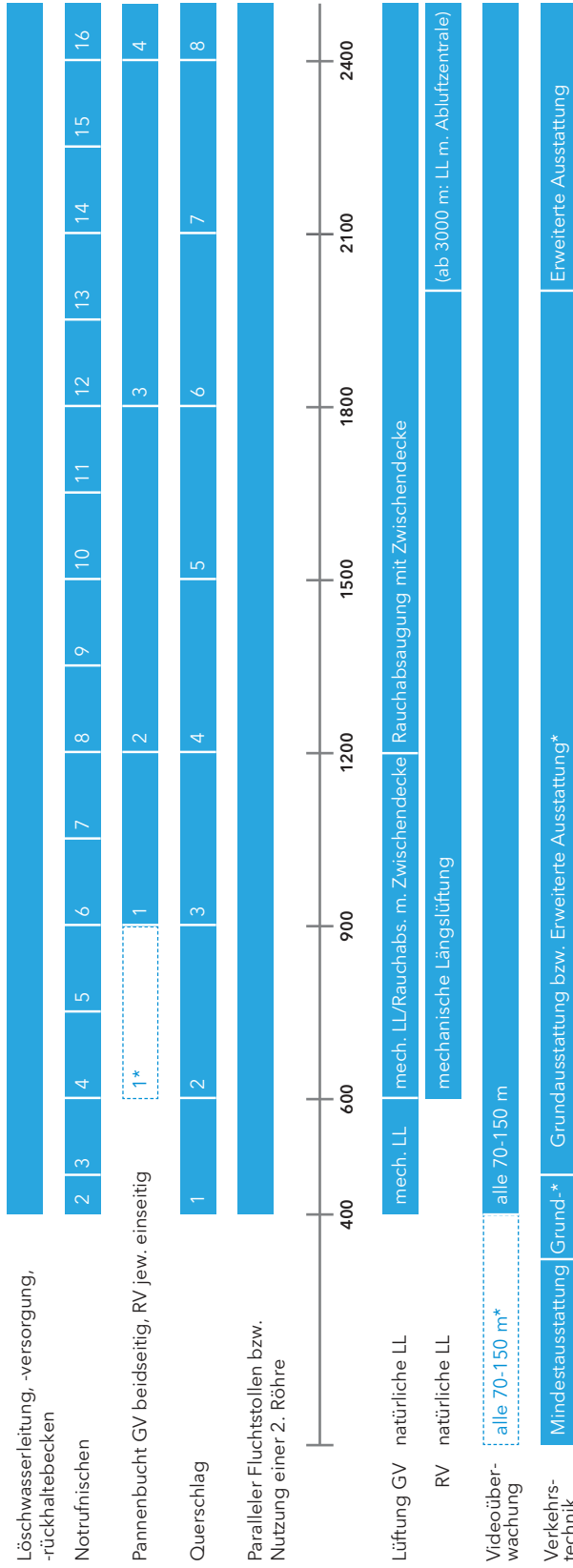
Im Einzelfall kann allerdings ein vergleichsweise längerer Tunnel durchaus eine wirtschaftlich und technisch sinnvolle Variante darstellen, wenn durch diese Lösung schwierige und kostentreibende Randbedingungen umgangen werden können.

Die betriebs- und sicherheitstechnischen Anforderungen an das Tunnelbauwerk steigen intervallartig mit dessen Länge. Diese Anforderungen beinhalten insbesondere kostenintensive bauliche Maßnahmen wie z. B. die Einrichtung von Fluchtwegen (der Bau eines parallelen Fluchstollens, Querschläge zu Nachbarröhren) oder das Anlegen von Pannenbuchten sowie ausstattungs-technische Maßnahmen, welche in der Folge aufwendige bauliche Zusatzmaßnahmen erfordern. Hierzu zählen beispielweise Lüftungstechnische Einrichtungen mit Luftaustauschzentralen, Abluft-/Zuluftstollen oder Tunnelquerschnitte mit Zwischendecken.

Bei der Festlegung der Bauwerkslänge muss dieser Umstand besondere Berücksichtigung finden. Die wesentlichen baulichen Anforderungen an die Sicherheitseinrichtungen sowie die erforderliche Mindestausstattung nach RABT [U1] in Abhängigkeit von der Tunnellänge veranschaulicht Abb. 3-1. Insbesondere Tunnelbauwerke, die eine Länge von mehr als 400 m erreichen, verursachen erhöhte Kosten durch die dann erforderlichen Sicherheitseinrichtungen.

In der Planungsphase können die Bauwerkskosten durch Unterschreiten von definierten Tunnellängen (z. B. < 400 m, < 600 m, < 900 m, < 2000 m) optimiert werden.

Abb. 3-1 Bauliche und technische Sicherheitseinrichtungen nach RABT [U1]
Mindestanforderung nach RABT (vereinfacht)

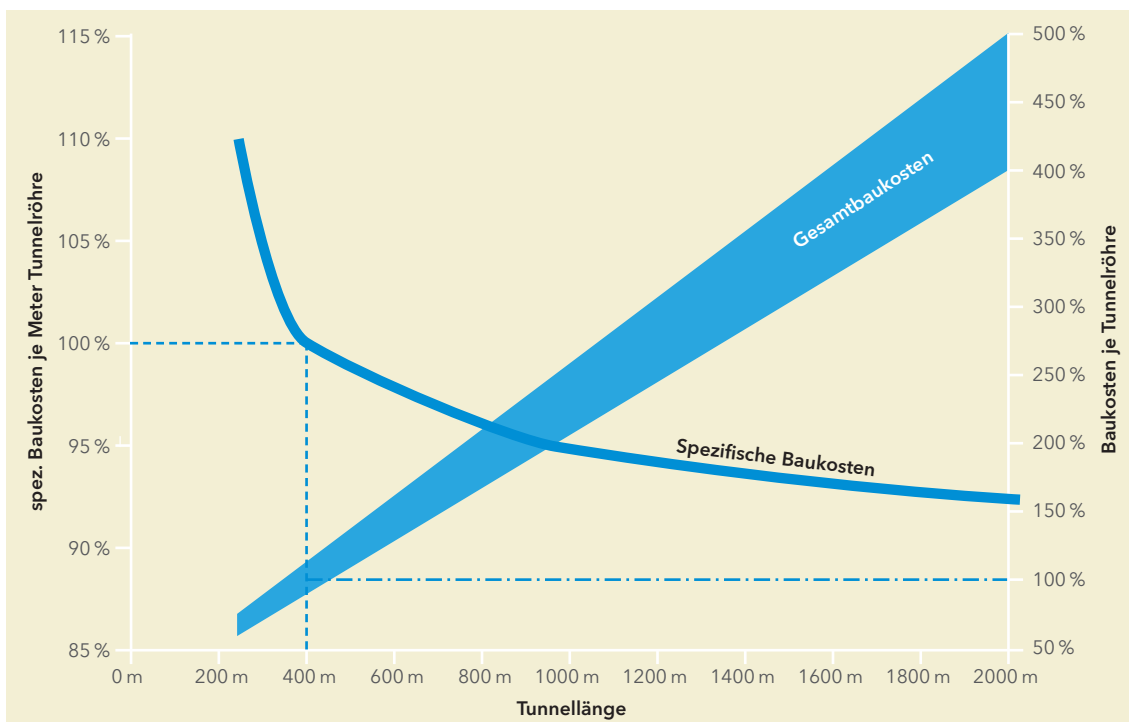


*verkehrsabhängig nach RABT (GV: Gegenverkehr, RV: Richtungsverkehr, LL: Längslüftung)

3

BAUWERKSGEOMETRIE

Abb. 3-2: Spezifische Baukosten und Gesamtbaukosten in Abhängigkeit von der Tunnellänge



3.1.2 Rohbau

Die spezifischen Rohbaukosten je Tunnelmeter nehmen mit der Tunnellänge ab, da der Anteil der von der Länge weitgehend unabhängigen Baukosten abnimmt (Abb. 3-2). Zu diesen nichtlinearen Kostenanteilen zählen z.B. die Baustelleneinrichtung, die zu Beginn des Vortriebs erforderlichen Anfahrvorgänge, die Herstellung der Voreinschnitte, der Bau der Portalblöcke und das Portalvorfeld, Betriebsgebäude, Zufahrten und ähnliches. Mit zunehmender Länge fallen aber auch zusätzliche Aufwendungen für bauliche Sicherheitseinrichtungen wie z.B. Notrufrischen, Flucht- und Rettungswege, Pannenbuchten u. a. an.

3.1.3 Flucht- und Rettungssystem

Das Flucht- und Rettungssystem für Tunnel wird im Wesentlichen durch die Tunnellänge bestimmt und ist in Abhängigkeit der Tunnellänge zu gestalten. Gemäß RABT [U1] sind bei einer Tunnellänge ab 400 m in regelmäßigen Abständen von < 300 m Notausgänge zur Selbstrettung anzuordnen. Die Notausgänge führen entweder ins Freie, in eine andere Tunnelröhre oder zu einem Rettungsstollen.

Die Möglichkeit, den Ausgang eines Fluchtweges über einen Querstollen direkt ins Freie zu führen („Fensterstollen“), ist von der Morphologie des Geländes sowie den jeweiligen projektbezogenen infrastrukturellen Gegebenheiten abhängig. Größere Steigungen und Treppenschächte als Fluchtweg sind nach Möglichkeit zu vermeiden.

Die häufigste Lösung bei einröhrigen Tunneln ist der Bau eines parallel zum Tunnel verlaufenden Fluchtstollens („Parallelstollen“). Die Notausgänge werden durch Querschläge zwischen dem Fluchtstollen und dem Tunnel realisiert. Hierbei entstehen durch den notwendigen Bau des Rettungsstollens und der Querschläge zusätzliche Kosten. Zukünftig wird vermutlich stattdessen zunehmend der Querschnitt des Straßentunnels vergrößert und der Fluchtweg als gesondertes Bauwerk in den Querschnitt integriert.

Bei zweiröhrigen Tunneln können die Notausgänge über Querschläge zwischen den beiden Röhren gestaltet werden. Bei dieser Lösung entstehen zusätzliche Kosten für Flucht- und Rettungswege lediglich durch die Herstellung der begehbaren oder befahrbaren Querschläge, die die Baukosten eines 300 m langen Tunnelabschnittes um ca. 2 bis 4 % erhöhen.

3.1.4 Pannenbuchten

Die Notwendigkeit von Pannenbuchten wird durch die Tunnellänge und den Tunnelquerschnitt bestimmt. Bei Tunnelquerschnitten ohne Seitenstreifen sind gemäß den RABT [U1] ab einer Tunnellänge von 900 m, bei besonderen Gegebenheiten (z. B. ab 4000 LKW je km und Tag) ab 600 m Länge Pannenbuchten vorzusehen. Der Abstand der Pannenbuchten soll in jeder Fahrtrichtung weniger als 600 m betragen.

Pannenbuchten werden durch Aufweitung des Tunnelquerschnitts hergestellt. Dies bedeutet einen erhöhten Aufwand insbesondere beim Vortrieb und den Rohbauarbeiten. Abhängig von den jeweiligen Baugrundverhältnissen sind für eine ein- bzw. beidseitige, ca. 50 m lange Pannenbucht zusätzliche Baukosten zwischen 100.000 und 500.000 € zu veranschlagen.

Im Allgemeinen erhöhen sich deshalb die Kosten in einem 600 m langen Tunnelabschnitt durch die Herstellung der Pannenbucht um ungefähr 2 bis 4% (eine Pannenbucht je Röhre bei Richtungsverkehr, beidseitige Pannenbucht im Gegenverkehrstunnel). Bei ungünstigen geologischen Verhältnissen (geringe Gebirgsfestigkeit, Lage im Grundwasser o. ä.) steigen die zu veranschlagenden Kosten überproportional an.

3.1.5 Technische Ausstattung

Mit zunehmender Tunnellänge sind steigende Anforderungen an die betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung zu erfüllen. Diese umfassen in Längenintervallen u. a. die Lüftungstechnik, Brandmelde- und Lösch-einrichtungen mit Rückhaltebecken, Kommunikationseinrichtungen wie Notruf, Videoüberwachung, Funk etc., Leittechnik, Verkehrsbeeinflussungseinrichtungen u. v. m. Der erforderliche Mindestumfang der Betriebs-einrichtungen ist entsprechend den RABT [U1] festgelegt.

Die Kosten für technische Ausstattung betragen in Abhängigkeit von den individuellen Randbedingungen ca. 3% bis 12% der Gesamtbaukosten. Im Mittel sind ca. 2.000 bis 4.000 Euro je Meter Tunnelröhre anzunehmen. Für Tunnel mit Längen unter 400 m gilt die angegebene Untergrenze der Kosten.

3

BAUWERKSGEOMETRIE

3.1.6 Betriebskosten

Neben den Rohbaukosten und den Kosten der technischen Ausstattung steigen mit zunehmender Tunnellänge auch die Betriebskosten des späteren Bauwerkes an. Insbesondere sind dies Kosten für Lüftung und Beleuchtung, Datentransfer für die Überwachung und Wartung/Instandhaltung (Tunnelwäsche, ggf. Drängespülen etc.). Die Betriebskosten der technischen Ausstattung korrespondieren mit den entsprechenden vorgenannten Anforderungen an deren Umfang.

Bei den Betriebskosten machen die Kosten für Lüftung und Beleuchtung, insbesondere die Adaptionsbeleuchtung den größten Anteil aus. Als jährliche Betriebskosten können basierend auf vorliegenden Erfahrungen ca. 100 bis 150 € je Meter Tunnelröhre als grobe Schätzung angenommen werden, wobei die Kosten mit zunehmendem Ausstattungsgrad oder durch besondere örtliche Gegebenheiten weiter ansteigen können (vgl. Kap. 4.3.3).

Grundsatz: Tunnellänge und -verlauf

Die Länge des Tunnelbauwerkes sollte so weit als möglich in Bezug auf die Anforderungen für die sicherheitstechnische Ausstattung (nach RABT) optimiert werden.

Gradienten mit gleichbleibender Steigung sind zu bevorzugen, das Längsgefälle sollte 3% nicht überschreiten. Kuppenlagen und insbesondere Wannlagen sind nach Möglichkeit zu vermeiden.

3.2 Steigung des Tunnels

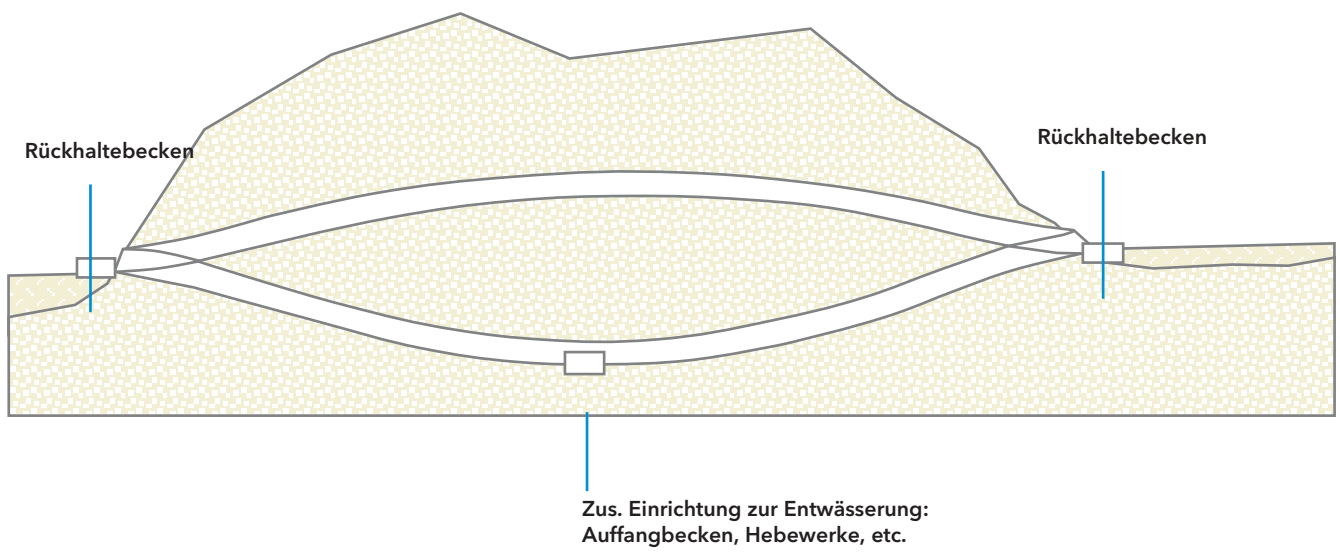
3.2.1 Sicherheitsmaßnahmen

Entsprechend der Vorgaben der EU-Tunnelrichtlinie [U9] ist ein Längsgefälle von mehr als 5 % bei neuen Tunneln nicht zulässig, außer wenn dies aufgrund geographischer Gegebenheiten unvermeidlich ist. Bei Tunneln mit einem Gefälle über 3 % sind ggf. zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen. Solche Maßnahmen können die Kosten für Rohbau und technische Ausstattung z. B. durch Querschnittsvergrößerung, Lüftungsdimensionierung, Flucht- und Überwachungseinrichtungen etc. deutlich erhöhen.

3.2.2 Entwässerung

Zur Fassung von Schleppwasser, Waschwasser und sonstiger Flüssigkeiten ist im Tunnel ein Entwässerungssystem vorzuhalten. Die Ableitung der Flüssigkeiten erfolgt im freien Gefälle zu einem Rückhaltebecken. Günstig hierfür ist ein Verlauf der Tunnelgradienten mit gleich bleibender Steigungsrichtung, da hier das Vorhalten eines Rückhaltebeckens am tiefer gelegenen Portal ausreicht. Tunnel in Kuppenlage benötigen zwei Rückhaltebecken. Tunnel in Wannlagen erfordern das Anlegen eines Rückhalteraaumes am Tunneltiefpunkt durch einen zusätzlichen Ausbruch im Gebirge. Ferner sind entsprechende Hebewerke und Rohrleitungen vorzusehen, um im Betrieb ein regelmäßiges Entleeren des Rückhaltevolumens zu ermöglichen.

Abb. 3-3: Tunnel in Wannens- oder Kuppenlage



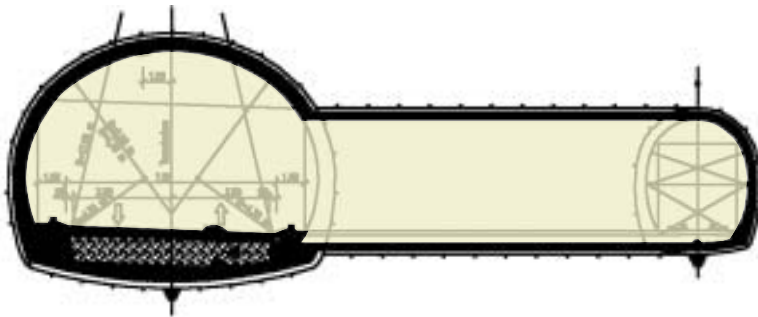
3

BAUWERKSGEOMETRIE

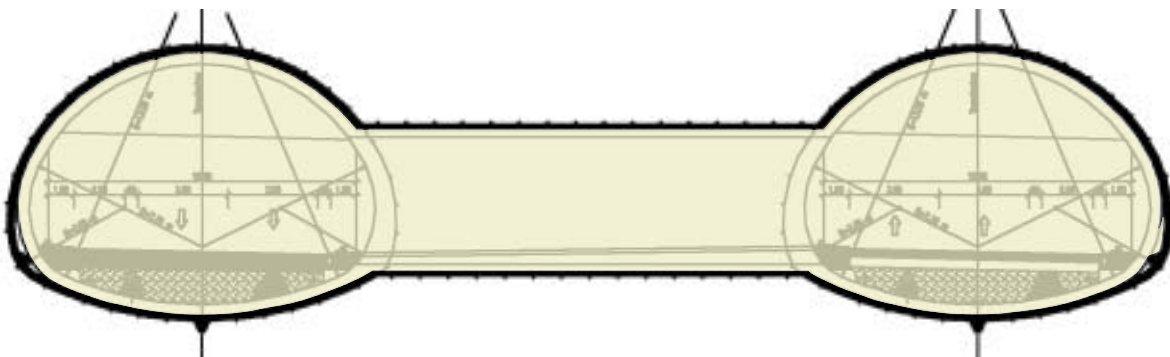
3.3 Tunnelquerschnitt

3.3.1 Regelquerschnitt

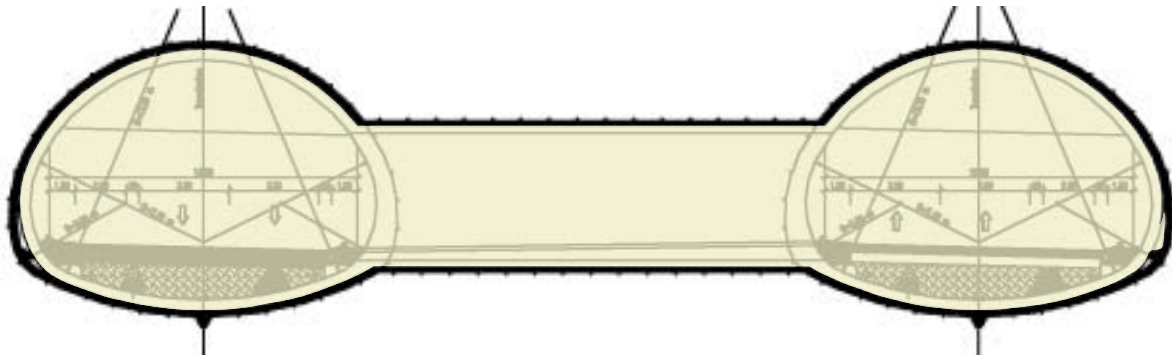
Die Wahl von Anzahl und Breite der Fahrspuren und des im Tunnelquerschnitt freizuhaltenen Lichtraumprofils erfolgt in der Regel nach verkehrstechnischen Aspekten und ist in der ARS Nr. 6/2000, Straßenquerschnitte in Tunneln, Anlage „Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln“ [U4], geregelt. Diese Regelquerschnitte für Tunnel sind auch in den RABT [U1] enthalten. Häufig ausgeführte Tunnelquerschnitte sind beispielhaft in Abb. 3-4 dargestellt.



A Regelquerschnitt RQ 10,5 T (hier mit Rettungsstollen)



B Regelquerschnitt RQ 26 t (hier mit Querschlag)



C Regelquerschnitt RQ 33 t (hier mit Querschlag)

Abb. 3-4: Beispiele für häufig verwendete Tunnelquerschnitte

Die Bandbreite der Baukosten für häufige Tunnelquerschnitte ist in der Abbildung 3-5 zusammengestellt. Dabei sind die unteren Grenzen für Tunnel in „günstigen“ Gebirgsverhältnissen (weitgehend standsicheres Gebirge) und ohne besondere Maßnahmen zur Begrenzung von Setzungen an der Geländeoberfläche anzusetzen. Die oberen Grenzen sind bei „ungünstigen“ Gebirgsverhältnissen (nur kurzzeitig standsicheres Gebirge) und notwendigen Maßnahmen zur Begrenzung von Setzungen an der Geländeoberfläche anzusetzen. In besonderen Fällen, wie z. B. bei der Unterfahrung setzungsempfindlicher Bauwerke können die angegebenen Kosten überschritten werden.

Ein Querschnitt RQ 26 t (ohne Standstreifen) ist ca. 15 % bis 25 % günstiger herzustellen als ein Querschnitt RQ 26 T (mit Standstreifen). Bei den Querschnitten RQ 33 t (ohne Standstreifen) und RQ 33 T (mit Standstreifen) ist der Unterschied mit 20% bis 25% noch stärker ausgeprägt. Die Querschnittstypen mit Standstreifen kommen daher nur bei sehr günstigen bautechnischen Randbedingungen in Betracht, falls gleichzeitig große LKW-Verkehrsstärken bei stärker geneigten Strecken zu erwarten sind (s.a. 3.2.1).

3.3.2 Anzahl der Röhren

Tunnel im Richtungsverkehr, also Tunnelbauwerke mit zwei Röhren, bewirken deutlich höhere Investitionskosten als einröhriige Tunnel im Gegenverkehr. Dies gilt nach neueren Untersuchungen auch für einröhriige Tunnel mit Fluchtstollen.

Neben den Regelungen der RABT [U1] sind bei der Wahl eines ein- oder zweiröhriigen Querschnittstyps die Regelungen der EU-Tunnelrichtlinie [U9] zu berücksichtigen, welche europaweit harmonisierte Mindestanforderungen an Tunnel ab 500 m Länge im transeuropäischen Straßennetz festlegt. Um die dort geforderten vergleichbaren Sicherheitsstandards in Verkehrstunneln des nationalen Straßennetzes umzusetzen, sollen die o.g. Regelungen im Bundesfernstraßenbereich ebenfalls Anwendung finden.

Die EU-Tunnelrichtlinie [U9] fordert, sofern das tägliche Verkehrsaufkommen (laut 15-Jahres-Prognose) 10.000 Fahrzeuge je Fahrstreifen übersteigt (DTV > 20.000), ab diesem Zeitpunkt einen Straßenquerschnitt mit Doppelröhrentunnel.

3

BAUWERKSGEOMETRIE

Abb. 3-5: Baukosten in Abhängigkeit des Tunnelquerschnittes

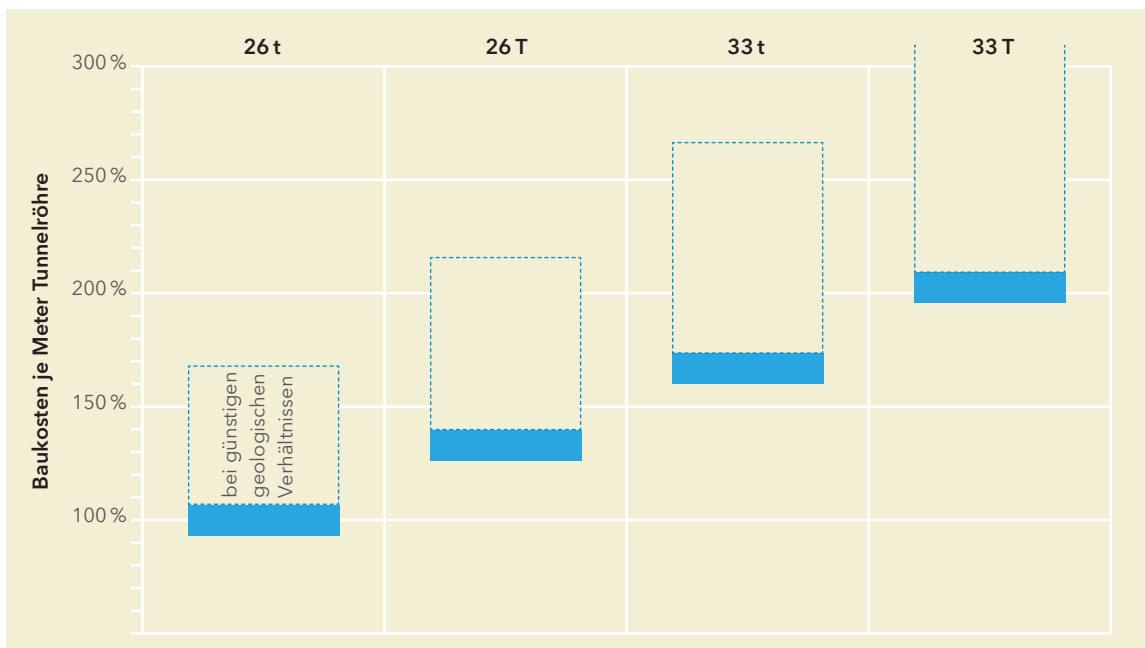
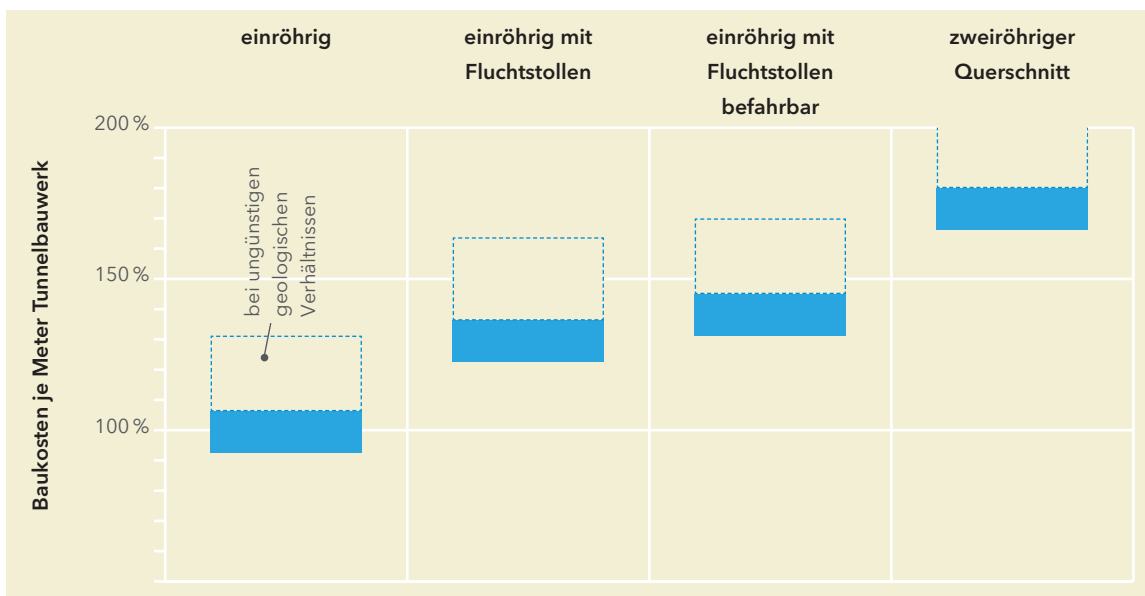


Abb. 3-6: Relative Kosten für ein- und zweiröhrige Querschnitte (Fluchtstollen parallel zur Fahrtröhre)



Hinsichtlich der Rohbaukosten entfällt durch den Bau einer zweiten Röhre die Erfordernis z. B. eines parallelen Fluchtstollens (ab 400 m Länge erforderlich), der trotz oder gerade wegen des kleinen Ausbruchsquerschnitts nur verhältnismäßig unwirtschaftlich zu erstellen ist.

In Bezug auf die Lüftung im Betrieb und besonders im Brandfall lassen sich beim zweiröhriigen Tunnel meist einfachere Lüftungskonzepte umsetzen, welche einen geringeren Aufwand bei der technischen Ausstattung und auch im Rohbau erfordern. Weitere günstige Aspekte ergeben sich durch nur einfach vorzuhaltende Bauteile und Ausstattungen wie z. B. Adaptionsbeleuchtung, Betriebsgebäude, Rückhaltebecken etc.

Demgegenüber zu stellen sind neben den Rohbaukosten für eine zweite Röhre auch die nicht unerheblichen Aufwendungen für doppelte sicherheitstechnische Ausstattung (Videoüberwachung u. a.) und die späteren Betriebskosten.

Das Investitionsvolumen für die zusätzliche technische Ausstattung der zweiten Röhre beträgt in etwa +30 % bis +40 %. Die Abbildung 3-6 zeigt die relative Kostenzunahme je Meter Tunnelbauwerk (Gesamtbaukosten) für ein- und zweiröhriige Querschnitte unter Annahme der Bedingungen des Referenztunnels bei einer Tunnellänge ≥ 400 m.

In Abhängigkeit von der örtlichen Situation und der aktuellen Verkehrsbelastung sowie deren Prognosesicherheit in die Zukunft kann im Einzelfall auch eine Planungsentscheidung zu Gunsten eines doppelröhriigen Ausbaus sinnvoll sein. Gegebenenfalls können auch Sonderquerschnitte zur Anwendung kommen. [U10]

3.3.3 Querschnittsform

Bei vorgegebenem Lichtraumprofil ergibt sich die Querschnittsform des Tunnels (Hufeisenprofil oder sog. Maulprofil, flache oder stark ausgerundete Tunnelsohle etc.) in der Regel nach tunnelstatischen Gesichtspunkten aus den örtlichen Randbedingungen des Baugrundes wie

- Festigkeit des Gebirges
- Grundwasser und Bergwasser

Die Formgebung wird daher maßgebend von den Gebirgs- und Gebirgswasserhältnissen geprägt und ist somit abhängig von Achse und Gradienten des Bauwerkes. Diesbezügliche Aspekte werden im Kapitel 4 berücksichtigt.

Grundsatz: Wahl des Tunnelquerschnitts

Sofern nicht außergewöhnlich günstige Gebirgsverhältnisse vorliegen, steigt der Sicherheitsaufwand zur Herstellung eines bergmännischen Tunnels überproportional mit dem Ausbruchsdurchmesser.

Dementsprechend sollte unter Abwägung des verkehrstechnischen Entscheidungsspielraums stets ein möglichst kleiner Tunnelquerschnitt gewählt werden.

Einröhriige Querschnitte mit Fluchtstollen sind kostengünstiger herstellbar als zweiröhriige Querschnitte. Unter Berücksichtigung der Verkehrsprognose kann dennoch ein zweiröhriiges Bauwerk wirtschaftlich sein.

4

GELÄNDE UND BAUGRUND



4.1 Topographie

4.1.1 Einsatzbereiche alternativer Lösungen

Wegen der wesentlich höheren Baukosten gegenüber der freien Strecke und den zusätzlichen Kosten für Betrieb und Erhaltung ist vorab die Zweckmäßigkeit einer Tunnelbaumaßnahme unter Wirtschaftlichkeitsaspekten anhand des „Leitfaden für die Planungsentscheidung Einschnitt oder Tunnel“ [U2] zu beurteilen. Die wirtschaftliche Grenze für eine Einschnittslösung liegt erfahrungsgemäß bei ca. 30 m Tiefe. Die Machbarkeit verschiedener technischer Lösungen (natürliche Böschungen, Stützwände, Tunnel in Rahmenbauweise, in Deckelbauweise u.a.) ist abhängig von den örtlichen Randbedingungen und im Rahmen der Kostenbetrachtung zu prüfen.

In Abb. 4.1-1 ist zu erkennen, dass die offene Tunnelbauweise bei oberflächennaher Gradienten und damit geringer Firstüberdeckung vergleichsweise kostengünstig ist. Dementsprechend sollte die Möglichkeit einer Realisierung dieser Bauweise stets geprüft werden. Folgende beispielhaft aufgeführte Gründe können auch bei oberflächennaher Gradienten einen Tunnel in offener Bauweise erschweren:

- Vorhandene Bebauung bzw. vorhandene Verkehrswege
- Große Geländeanspruchnahme
- Ökologische Beeinträchtigungen

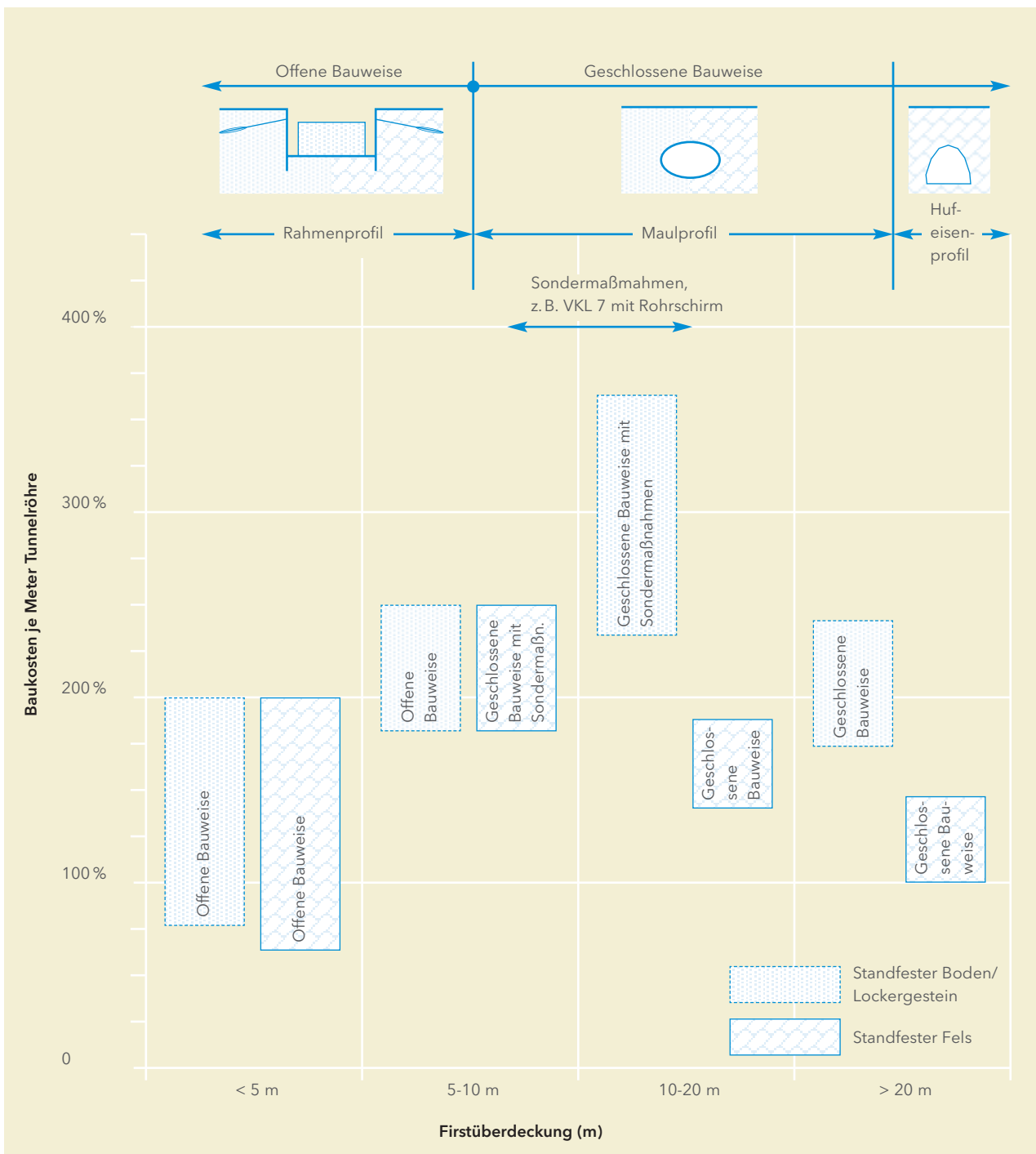
Ferner ist zu beachten, dass tiefe Geländeeinschnitte in der Regel zu verhältnismäßig großen und weit bis hinter die Baugrubenböschung reichenden Horizontalverschiebungen führen, die für seitlich der Trasse bestehende Bebauungen problematisch sein können.

Zur Minimierung des Eingriffs während der Bauphase kann es unter ökologischen Aspekten oder zur Aufrechterhaltung von Verkehrswegen zweckmäßig sein, den Tunnel in Deckelbauweise auszuführen. Hierbei wird nach Ausführung von Erd- und Pfahlbohrarbeiten die Tunneldecke errichtet und wieder übererdet. Im Schutze dieses Deckels erfolgt der spätere Aushub des Bodenmaterials und Ausbau ohne Beeinträchtigungen an der Oberfläche.

Grundsatz: Offene Tunnelbauweise

Bei Firstüberdeckungen von maximal 5 m bis 7 m ist die offene Tunnelbauweise in der Regel vergleichsweise kostengünstig und vorteilhaft auszuführen. Im Nahbereich von Bauungen sind jedoch tiefe Geländeeinschnitte (Baugruben) möglichst zu vermeiden.

Abb. 4.1-1: Vergleich der Tunnelbauweise in Abhängigkeit von der Firstüberdeckung



4

GELÄNDE UND BAUGRUND



4.1.2 Firstüberdeckung im bergmännischen Tunnelbau

Der moderne Tunnelbau setzt voraus, dass sich im Gebirge ein gewölbartiger Tragrings um den Hohlraum herum ausbilden kann. Der Boden bzw. der Fels trägt damit die Eigengewichtslasten im Wesentlichen selbst ab und es wird nur eine verhältnismäßig schwache Unterstützung des Tragsystems durch die Tunnelauskleidung erforderlich. Dieses Gewölbe kann sich allerdings nur bei einer hinreichenden Firstüberdeckung mit hinreichend tragfähigem Boden/Fels ausbilden. Ohne tragfähiges Gebirgsgewölbe sind für den Vortrieb eines Tunnels erhebliche Mehraufwendungen erforderlich. Die Gradientenführung eines Tunnels mit Bezug auf die Geländeoberfläche und den Horizont des gut tragfähigen Untergrundes ist daher einer der wesentlichen kostenbeeinflussenden Faktoren im Tunnelbau.

Grundsatz: Erforderliche Firstüberdeckung

Die Firstüberdeckung eines Tunnels aus hinreichend festem Boden/Fels sollte möglichst so groß sein, dass sich im Gebirge ein vollständiger Tragrings (Traggewölbe) um den Hohlraum herum ausbilden kann. Für erste Projektierungsarbeiten kann davon ausgegangen werden, dass die Firstüberdeckung $H_{\bar{u}}$ im standfesten Boden (z. B. Hang- und Verwitterungslehme, Verwitterungssteine des tieferen Felshorizontes) mindestens dem 1,5- bis 2,0-fachen der Tunnelbreite B entsprechen soll. Im standfesten Fels gilt $H_{\bar{u}} \geq 1,0 B$. Höhere Überdeckungen sind unter Berücksichtigung der in deutschen Mittelgebirgslandschaften vorliegenden morphologischen Randbedingungen in der Regel günstig.

Werden die vorgenannten Überdeckungshöhen unterschritten oder liegen ungünstige Gebirgseigenschaften vor, welche die Ausbildung eines vollständigen Gebirgs-tragrings einschränken (vgl. Kapitel 4.2), können kostenintensive bauliche Zusatzmaßnahmen erforderlich werden. Im Allgemeinen kann von den in Abb. 4.1-1 angegebenen Erfahrungswerten für den Bau von Verkehrstunneln ausgegangen werden. Die Tabelle enthält Angaben zur Wahl eines geeigneten Bauverfahrens in Abhängigkeit von der Firstüberdeckung des Tunnels. Ferner werden empirische Ansätze zu den jeweiligen spezifischen Baukosten auf der Grundlage des eingeführten Bezugtunnels (vgl. Kapitel 2) aufgeführt. Die Angaben gelten für Tunnel oberhalb des Grundwasserspiegels.

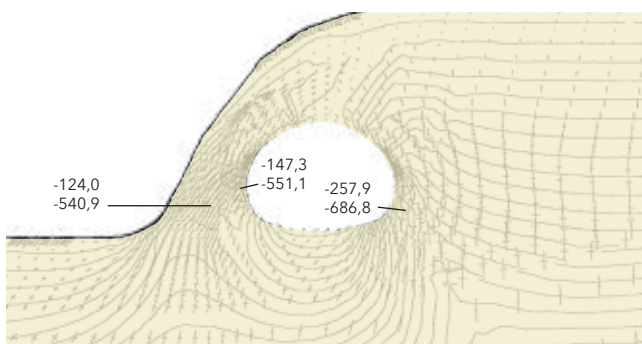
In Bereichen mit verhältnismäßig geringer Firstüberdeckung sind bei der Ausführung eines bergmännischen Tunnels häufig ungünstige Ausbruchsklassen mit zusätzlichen Sicherungen in Form von Rohr- oder Spießschirmen notwendig. Diese Streckenabschnitte sind kostenintensiv. Die Tunneltrasse bzw. die Gradienten sollten daher so gewählt werden, dass diese Streckenabschnitte möglichst kurz sind. Der Sachverhalt ist häufig in Zusammenhang mit der Anordnung des Portals für den bergmännischen Tunnelvortrieb zu entscheiden. So kann mit einem tiefen Voreinschnitt die Länge des ungünstigen Tunnelvortriebs mit niedriger Überdeckungshöhe reduziert werden. Andererseits steigt der Sicherungsaufwand für Voreinschnitte mit der Tiefe überproportional an. Tiefen von mehr als ca. 20 m sind häufig nur noch mit hohem Aufwand realisierbar. Bei der Anordnung des Portals sind ferner ökologische Gesichtspunkte zu berücksichtigen, wie beispielsweise die Inanspruchnahme von verhältnismäßig großen Gelände- und Naturflächen.

Grundsatz: Abgrenzung offene / geschlossene Bauweise

Der An- und Ausfahrtsbereich des bergmännischen Streckenabschnitts ist unter Berücksichtigung von teilweise gegensätzlichen Aspekten so zu optimieren, dass

- der Tunnelabschnitt, der in offener Bauweise errichtet wird, möglichst lang ist
- Tunnelabschnitte der geschlossenen Bauweise mit notwendigen Sondermaßnahmen minimiert werden
- Voreinschnitte mit Firstüberdeckungen von weniger als ca. 7 m bis 8 m nach Möglichkeit vermieden werden, da diese in der Regel unwirtschaftlich herzustellen und tunnelbautechnisch nicht erforderlich sind
- die bauzeitliche Inanspruchnahme von Flächen für die Herstellung des Voreinschnittes den örtlichen Verhältnissen Rechnung trägt.

Abb. 4.1-2: Hauptspannungen und Isolinien der Vertikalspannungen für einen Lehnentunnel (Ergebnis einer Finite-Element-Berechnung)

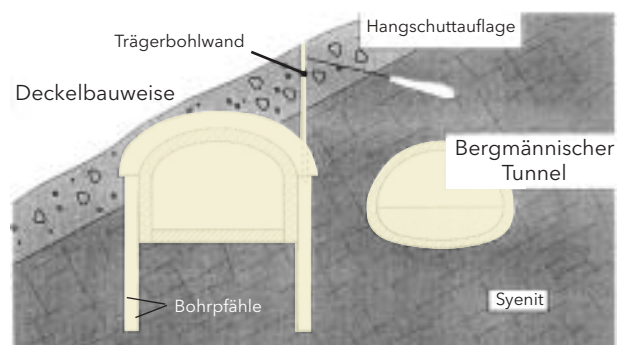


4.1.3 Seitliche Gebirgsüberdeckung

Die notwendige Ausbildung eines Gebirgstragrings erfordert auch seitlich des Tunnels eine hinreichend große Gebirgsüberdeckung. Tunneltrassen, die mit schiefwinkligem Schnitt schiefwinklig in den Berg hinein führen oder gar ungefähr parallel zum Hang verlaufen (Lehnentunnel), können deutlich erhöhten Sicherheitsaufwand erfordern.

In Abb. 4.1-2 sind für einen solchen Fall Hauptspannungen und Isolinien der Vertikalspannungen aus einer FE-Berechnung dargestellt. Die Situation repräsentiert ein aus zwei parallel verlaufenden Autobahntunneln bestehendes Bauwerk, welches schiefwinklig in das Gebirge einstreicht. In dem untersuchten Querschnitt kann der (nicht dargestellte) linke Tunnel noch in offener Bauweise in einer Hangbaugrube errichtet werden, während die rechte Röhre bereits im Berg verläuft. Man erkennt, dass in dem zwischen Tunnel und Böschungshaut verbleibenden Gebirgsriegel eine Spannungskonzentration auftritt. Diese Beanspruchung kann i. A. nur bei sehr hohen Gebirgsqualitäten und günstigem Trennflächengefüge sicher aufgenommen werden.

Abb. 4.1-3: Bauweisen im Hangbereich für ein aus 2 Röhren bestehendes Tunnelbauwerk



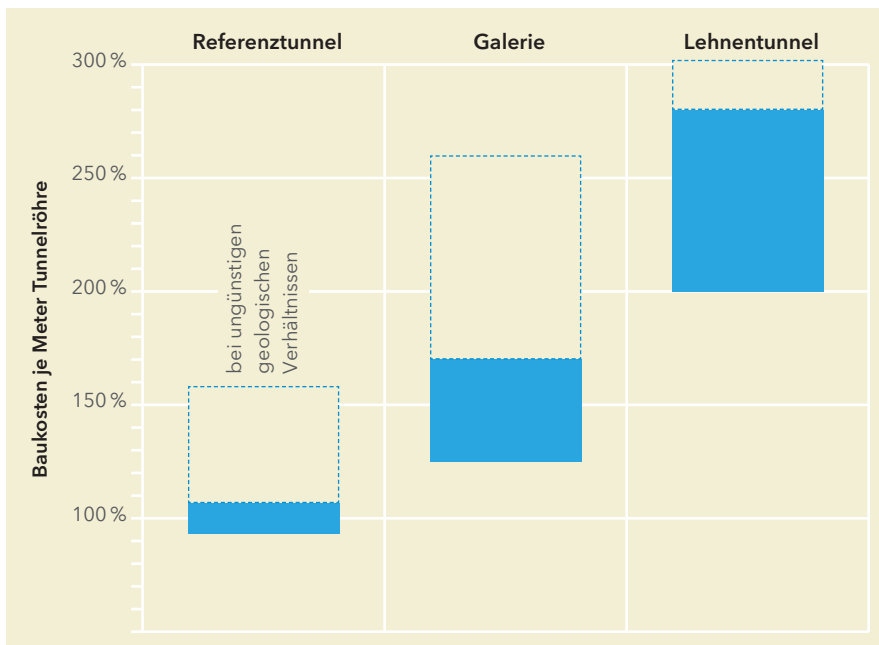
4

GELÄNDE UND BAUGRUND

In der Abb. 4.1-3 ist ein Querschnitt dieses Tunnelbauwerks dargestellt. Die äußere Tunnelröhre verläuft hier im Übergang zwischen Hangschuttauflage und Festgestein. Für solche Situationen ist zu berücksichtigen, dass der Hangschutt vielfach in einem labilen Gleichgewicht ansteht. Ein auch örtlich begrenzter Anschnitt dieser Deckschicht kann zu einer Destabilisierung führen und erfordert dementsprechende Sicherungsmaßnahmen. Die Tunnelröhre wird unsymmetrisch durch den Hangschub beansprucht. Ein Tunnelvortrieb

nach der Spritzbetonbauweise ist nicht möglich. Vielmehr werden Sonderbauweisen notwendig, wie sie in Bild 4.1-3 beispielhaft skizziert sind. Die spezifischen Baukosten können dabei das mehrfache der Kosten für den Referenztunnel erreichen. Insbesondere die zusätzlichen Baukosten für Sondermaßnahmen wie die Herstellung von Pfählen oder von künstlichen Traggewölben sowie Kosten für Baustelleneinrichtung und -logistik wirken sich bei solchen Bauvorhaben ungünstig aus.

Abb. 4.1-4: Baukosten in Abhängigkeit von der seitlichen Gebirgsüberdeckung



Baumaßnahmen im Bereich einer (instabilen) Hangschuttauflage sind stets ausgeprägt kostenintensiv. Eine seitlich in den tragfähigen Fels verschobene Trassenführung mit bergmännischer Bauweise kann zu deutlichen Einsparungen führen.

Die konstruktive Variante des Baus einer Galerie anstelle eines bergmännischen Tunnels kann - in Abhängigkeit von den örtlichen Randbedingungen - ebenfalls deutliche Mehrkosten verursachen. Sind allerdings die geologischen Verhältnisse ungünstig für einen bergmännischen Vortrieb (s. Kap. 4.2), kann der Bau einer Galerie die wirtschaftlichere Variante darstellen.

Hinsichtlich der Sicherheitseinrichtungen und der technischen Ausstattung sind die Anforderungen an Galerien geringer, da an diese bezüglich der technischen Ausstattung geringere Anforderungen als an Tunnelbauwerke gestellt werden. Ferner sind i. A. die Rettungswege vergleichsweise einfach zu realisieren.

Die Abbildung 4.1-4 verdeutlicht die relativen Baukosten der unterschiedlichen Varianten, die aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen starken Streuungen unterliegen und daher im Einzelfall deutlich abweichen können.

Grundsatz: Seitliche Gebirgsüberdeckung

Tunnelbauwerke sollen seitlich stets eine hinreichend große Überdeckung aus tragfähigem Gebirge aufweisen. Wirtschaftlich günstig ist i. d. R. eine Trassenführung möglichst „weit im Berg“, da hier das Gebirge i. d. R. höhere Festigkeiten aufweist.

Der mindestens verbleibende Gebirgspfeiler sollte im Lockergestein der 2- bis 3-fachen Tunnelbreite entsprechen und im Festgestein bei sehr guter Felsqualität mindestens der 1-fachen Tunnelbreite, wobei hier die i. d. R. als Folge von Verwitterung und Hangzerreißung vorhandene Auflockerung des Gebirges zu berücksichtigen ist. Eine ausreichende Firstüberdeckung ist dabei einzuhalten.

Lehntunnel (ungefähr parallel zum Hang verlaufende Tunnel), sowohl in offener als auch in geschlossener Bauweise, sind infolge der vergleichsweise hohen Baukosten möglichst zu vermeiden. Tunnelbau im Bereich einer instabilen Hangschuttauflage ist in jedem Fall zu vermeiden.

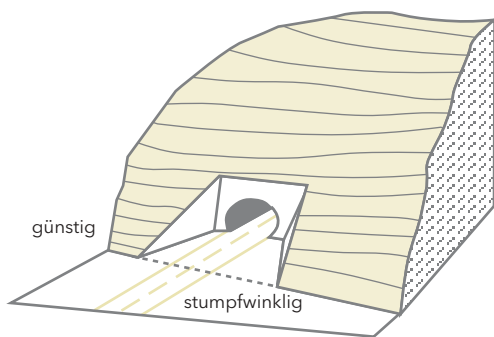
4.1.4 Portallage

Im Falle eines schleifenden Schnitts treten im Gebirge um den Tunnel herum ungünstige Spannungszustände infolge des Hangschubes auf (Abb. 4.1-5B). Ferner ergeben sich auf der Bergseite große Einschnittstiefen. Die beiden Sachverhalte überlagern sich in ungünstiger Weise. Zur Sicherung der Portalwände wird ein hoher Aufwand erforderlich. Unter ungünstigen Randbedingungen kann ein standsicherer Hohlraum mit vertretbarem Aufwand nicht hergestellt werden.

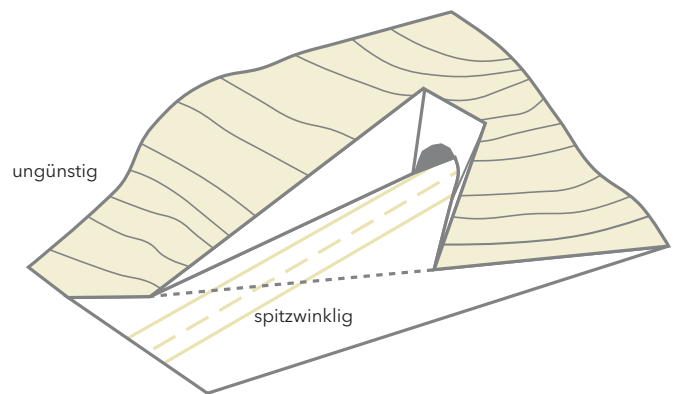
4

GELÄNDE UND BAUGRUND

Abb. 4.1-5: Günstige (A) und ungünstige (B) Anordnung des Tunnelportals



A: Günstige Anordnung des Tunnelportals



B: Ungünstige Anordnung des Tunnelportals

Grundsatz: Tunnelportale

Die Tunneltrasse soll stets so gewählt werden, dass sich im Bereich der Tunnelportale ein möglichst rechtwinkliger Schnitt zwischen Streckenachse und dem Streichen des Geländes (Richtung der Höhenschichtlinien) ergibt.

4.2 Gebirgseigenschaften

4.2.1 Gebirgsfestigkeit

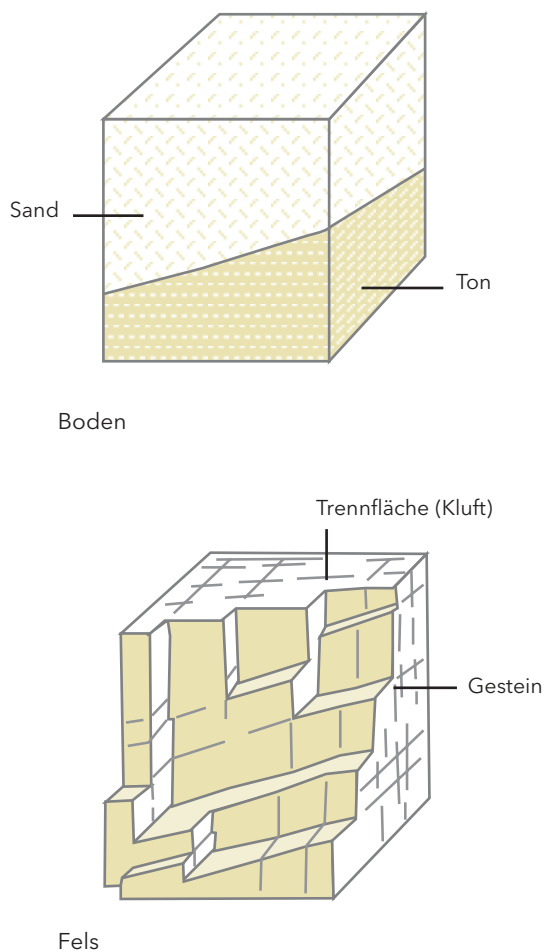
Von den zahlreichen, die Tunnelbaukosten beeinflussenden Faktoren haben im Allgemeinen die Gebirgseigenschaften den größten Einfluss. Die Baukosten können im Lockergestein oder im ungünstig ausgebildeten Fels ein Mehrfaches des bei günstigen geotechnischen Randbedingungen erforderlichen Betrages erreichen.

Die tunnelbautechnische Eignung eines Gebirges hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Gebirgsqualität mit dessen Festigkeit zunimmt. Man unterscheidet

- Lockergestein („Boden“) wie z. B. Sand, Lehm,
- Festgestein („Fels“) wie z. B. Sandstein, Kalkstein, Granit,
- Halbfestgestein oder Übergangsgestein, „veränderlich feste Gesteine“, welches Festgesteins- und tlw. auch Lockergesteinscharakter hat, wie z. B. verwitterter Ton- oder Mergelstein.

Die bautechnischen Eigenschaften vom Lockergestein/Boden werden im Wesentlichen von dessen Scherfestigkeit bestimmt. Beim Felsmaterial ist zu berücksichtigen, dass sich dessen Festigkeit aus derjenigen des Grundmaterials (Gestein) und derjenigen der so genannten Trennflächen (Klüfte, Schieferung, Schichtflächen) zusammensetzt (Abb. 4.2-1).

Abb. 4.2-1: Modelle für Boden und Fels



Für den Tunnelbau im Festgestein maßgebend sind in der Regel die auf den Trennflächen wirksamen Festigkeitseigenschaften des Gebirges („Gebirgsfestigkeit“). Diese können auch bei hohen Gesteinsqualitäten („Gesteinsfestigkeit“) lediglich die Größenordnung erreichen, die beispielsweise ein Boden (Lockergestein) aufweist. Die vergleichsweise hohe Gesteinsfestigkeit ist in solchen Fällen von nachgeordneter Bedeutung.

4.2.2 Einfluss des Gebirges auf den Tunnelbau

Der Baustoff des Tunnels ist das Gebirge. Gebirge und Tunnelausbau bilden ein Verbundtragwerk, das Gebirge bestimmt dabei die Tunnelkonstruktion.

Im Festgestein reduzieren sich i. A. die erforderlichen Sicherungsmaßnahmen mit Zunahme der Gebirgsfestigkeit. Allerdings sind auch bei guter Gesteinsqualität, aber ungünstig angelegtem Trennflächengefüge Absonderungen von Felskeilen in Firste und/oder Ulme möglich. In diesen Fällen werden Ankerungen bzw. vorausseilende Spießsicherungen notwendig, die zu einer Anwendung der kostenintensiven Vortriebsklassen 6 oder 7 führen können (Abb. 4.2-2).

Im Locker- und Übergangsgestein können die Festigkeitseigenschaften des Gebirges, insbesondere bei größeren Ausbruchsquerschnitten, unzureichend sein, um einen vollständigen Gebirgstragring um den Tunnel herum auszubilden. In diesen Fällen sind vergleichsweise aufwändigere Vortriebs- und Sicherungsmaßnahmen erforderlich. Mögliche erforderliche Maßnahmen sind die Reduzierung der Abschlaglänge, eine Unterteilung des Ausbruchsquerschnitts in Teilsegmente (z. B. Ulmenstollenvortrieb, Firststollenvortrieb), Anordnung eines Rohrschirms, eines Spießschirms und/oder einer Systemankerung, Einbau einer Kalottensohle beim Ka-

4

GELÄNDE UND BAUGRUND

lottenvortrieb, dickwandige Ausbildung der Spritzbetonschale (vgl. Kap. 1.4). Diese Maßnahmen sind immer mit einer Erhöhung der Baukosten verbunden.

Neben den erforderlichen Sicherungsmaßnahmen beim Vortrieb beeinflussen die Gebirgseigenschaften auch die mögliche Form des Tunnelquerschnittes entscheidend. Diese ist fast ausschließlich von den aus den geologischen bzw. hydrogeologischen Randbedingungen resultierenden statischen Erfordernissen bzw. den Anforderungen hinsichtlich der Bauwerksabdichtung abhängig.

Aus wirtschaftlichen Gründen wird vielfach ein Hufeisenprofil (Profil mit „offener Sohle“) angestrebt, da hier das Verhältnis von Ausbruchsquerschnitt zu verkehrstechnisch nutzbarem Querschnitt i. A. sehr günstig ist (Abb.4.2-3) und der Einbau eines Sohlgewölbes entfällt. Unter statischen Gesichtspunkten ist beim Hufeisenprofil von Nachteil, dass es am Übergang zur Aufstandfläche zu Spannungsspitzen kommt und die Ausbildung eines harmonischen Gebirgstragringes erschwert wird. Das Profil ist dementsprechend nur in ausreichend tragfähigem Gebirge einsetzbar.

Abb. 4.2-2: Absonderung von Felskeilen im Festgestein und erforderliche Sicherungsmaßnahmen

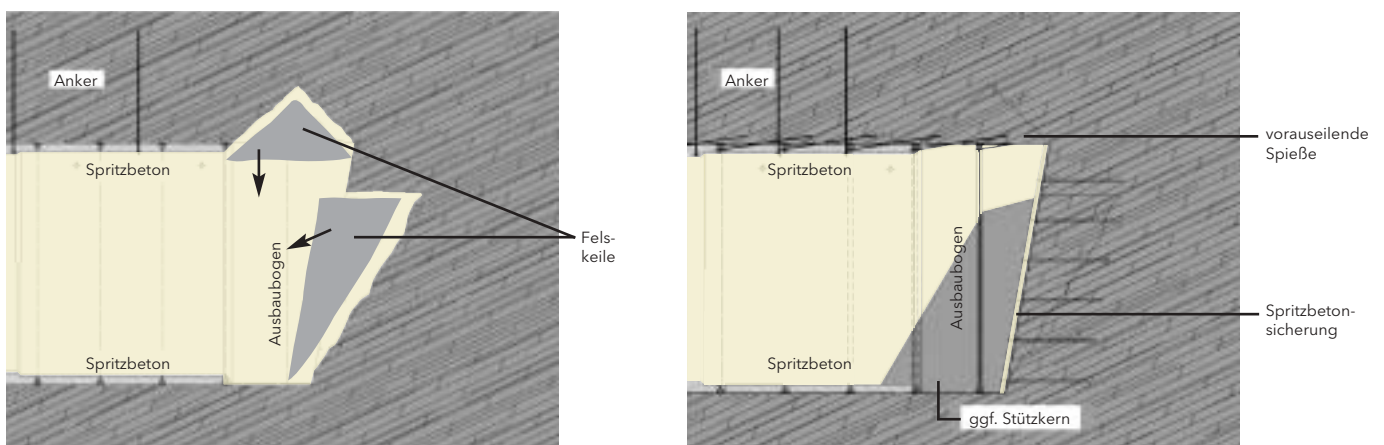
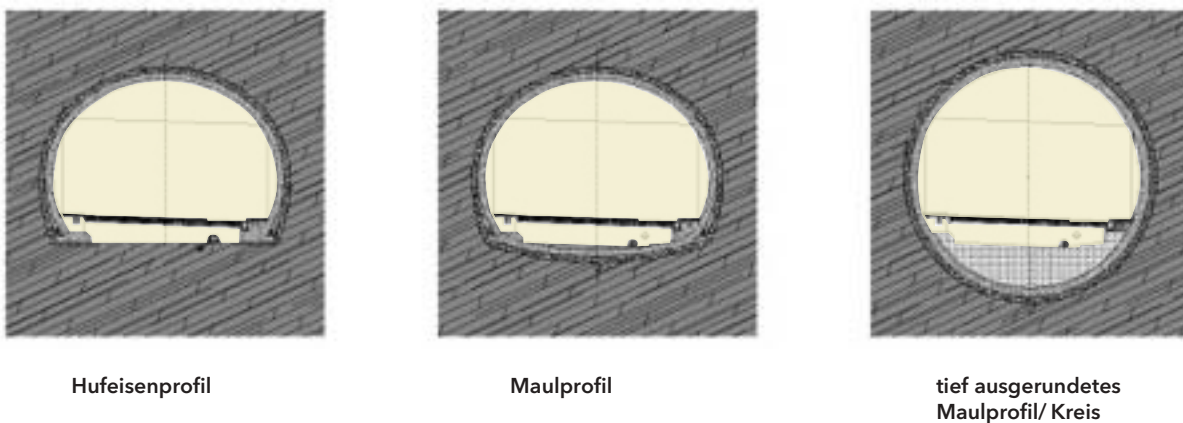


Abb. 4.2-3: Querschnittsformen von Tunnelbauwerken in Abhängigkeit von den Gebirgsverhältnissen



Vergleichsweise ungünstige geologische Randbedingungen erfordern einen Sohlschluss und eine stärkere Ausrundung des Tunnelquerschnitts. Häufig verwendet wird das so genannte Maulprofil, das sich geometrisch im Querschnitt aus mehreren Kreisbögen zusammensetzt („geschlossene Sohle“, „gewölbte Sohle“). Je ungünstiger sich die Gebirgsverhältnisse darstellen, umso stärker ist das Maulprofil auszurunden. Im Grenzfall geht das Maulprofil in einen Kreisquerschnitt über, welcher allerdings nur bei stark druckhaftem und nicht standfestem oder bei quellendem Gebirge erforderlich wird.

Die Querschnittsform und die erforderlichen Vortriebs- bzw. Sicherungsmaßnahmen prägen die Baukosten wesentlich mit. Zur Festlegung sind detaillierte geotechnische Untersuchungen und ingenieurtechnische Berechnungen notwendig, die in der Phase der Linienfindung i. A. noch nicht durchgeführt werden.

Um die notwendigen Planungsentscheidungen zu treffen, sollte daher in einer ersten Phase eine Prognose der Gebirgsverhältnisse anhand von Kartengrundlagen, regionalen Kenntnissen und mittels der meist vorliegenden geotechnischen Gutachten der Streckenplanung erfolgen.

Auf dieser Gebirgsprognose aufbauend kann die Tunnelgradienten optimiert werden, wobei den verschiedenen Gebirgsformationen unterschiedliche Baukosten zugeordnet werden können (Abb. 4.2-5).

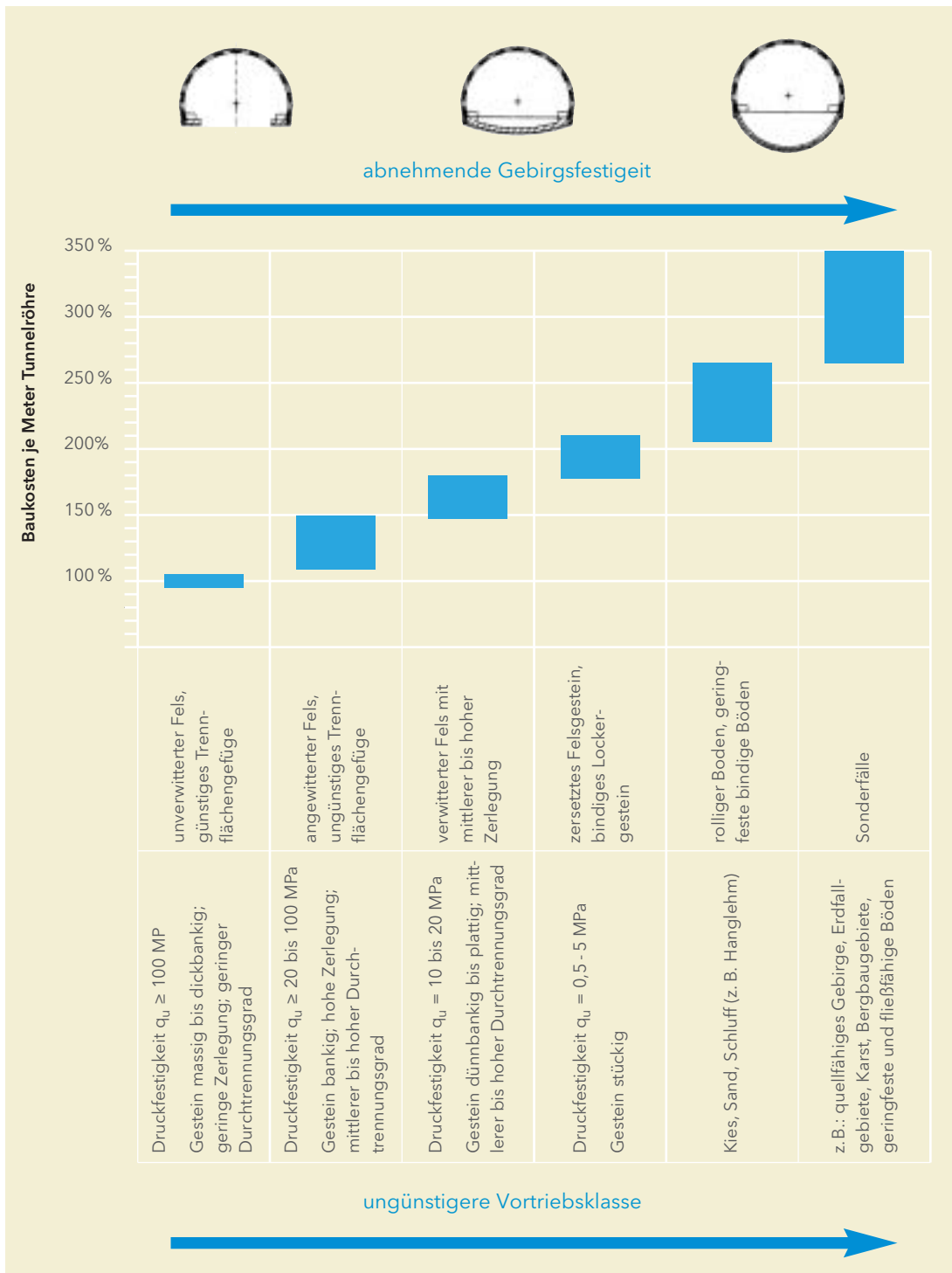
Bei der weiteren Vorplanung des Tunnelbauwerkes im Rahmen des Streckenentwurfs und zur Bearbeitung des späteren Bauwerksentwurfes sind diese Informationen durch geotechnische Erkundungen im Bauwerksbereich zu ergänzen.

Sonderfälle, wie Tunnelbau in quellfähigem Gebirge, in Erdfallgebieten, Karst, (früheren) Bergbaugebieten, aber auch in geringfesten und fließfähigen Böden erfordern stets besondere Untersuchungen, um Aussagen zu den voraussichtlichen Baukosten zu treffen.

4

GELÄNDE UND BAUGRUND

Abb. 4.2-5: Einfluss der Geologie auf die Tunnelbaukosten



Grundsätzlich ist in diesen Gebirgsverhältnissen von deutlich erhöhtem Aufwand zur Realisierung des Bauwerks auszugehen.

Grundsatz: Berücksichtigung der Gebirgseigenschaften

Die Gebirgsverhältnisse sind so weit als möglich bei der Linienfindung zu berücksichtigen. Die Tunneltrasse soll stets so gewählt werden, dass sie in möglichst günstigen tunnelbautechnischen Gebirgseinheiten verläuft. Tunnelbau in geringfesten Böden oder unter besonders schwierigen geologischen/geotechnischen Verhältnissen sollte nach Möglichkeit vermieden werden. In Festgestein können ein ungünstig räumlich angelegtes Trennflächengefüge und ungünstige Festigkeitseigenschaften der Trennflächen umfangreiche Sicherungsmaßnahmen erfordern und somit vergleichsweise hohe Baukosten verursachen.

4.2.3 Wechselnde Gebirgsverhältnisse

Aufgrund der Längenausdehnung von Tunnel als Linienbauwerke werden i.A. im Verlauf des Vortriebes unterschiedliche Gebirgsverhältnisse angetroffen. Aus der Inhomogenität des Gebirges resultieren unterschiedliche konstruktive Ausgestaltungen des Tunnelquerschnitts, welche sich in den verschiedenen Vortriebsklassen und Querschnittsformen bzw. deren Bemessung widerspiegeln.

Die Inhomogenität des Gebirges resultiert aus den

- unterschiedlichen Gesteinsarten
- unterschiedlichen Gebirgsfestigkeiten (beispielsweise durch stark zerlegten Fels oder infolge lokal tief reichender Verwitterung)

Solche Zonen sind verstärkt im Bereich von

- Geländesenken und Talmulden,
- geologischen Störungen und Verwerfungen oder
- Hangbereichen

infolge weitreichender Auflockerung des Festgesteins und Überdeckung mit Hang- bzw. Verwitterungslehm zu erwarten.

Insbesondere Tunnel, die parallel zu Großstörungen verlaufen, verursachen infolge der ungünstigen statischen Belastungssituation erhöhte Baukosten.

Tief reichende Verwitterungszonen können auch in Gebirgsbereichen mit eigentlich günstigen Eigenschaften einen lokalen Festigkeitsverlust bedingen, der einen erhöhten Aufwand an Sicherungsmitteln erfordert.

Grundsatz: Ungleichmäßige Gebirgsverhältnisse

Ein Verlauf der Tunnelachse parallel oder spitzwinklig zu geologischen Störungszonen sollte vermieden werden.

Bei Talunterquerungen oder in Bereichen mit tief reichender Verwitterung oder Auflockerung ist ein erhöhter baulicher Aufwand zu veranschlagen.

Indikatoren für wechselnde, ungünstige Gebirgseigenschaften sind häufig eine bewegte, veränderliche Topographie, Geländesenken, bekannte geologische Inhomogenitäten und (frühere) bergbauliche Aktivitäten. In solchen Abschnitten sollte die Tunnelüberdeckung besonders groß gewählt werden.

4

GELÄNDE UND BAUGRUND

Einen wesentlichen Kostenfaktor im Tunnelbau können schwer prognostizierbare oder unvorhergesehene geologische Randbedingungen darstellen, die während der Bauarbeiten eine Umstellung des Bauverfahrens erfordern. Bild 4.2-6 verdeutlicht eine solche Situation. Für den anstehenden tunnelbautechnisch gleichförmigen devonischen Schiefer wurde als Konzept für einen bergmännischen Tunnel ein Kalottenvortrieb konzipiert. Im Bereich des vulkanischen Schlots muss jedoch mit deutlich entfestigten Gesteinen gerechnet werden, wodurch der Tunnelbau erschwert wird. Örtlich kann dabei eine weitere Unterteilung des Ausbruchsquerschnittes, z. B. in Form eines Ulmenstollenvortriebs notwendig werden. Die Umstellung der Baustellenlogistik vom Kalotten- auf den Ulmenstollenvortrieb ist aufwändig und mit hohen zusätzlichen Kosten verbunden.

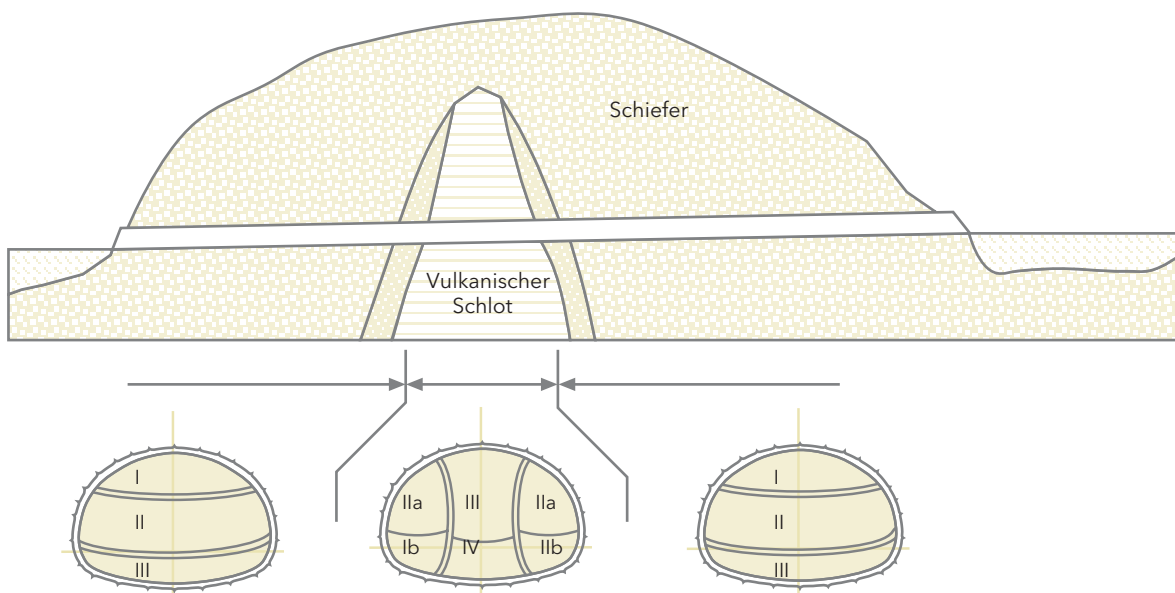
Grundsatz: Unvorhergesehene geologische Besonderheiten

Projektgebiete, die bezüglich nur schwierig zu erkundender geologischer Besonderheiten ein besonders hohes Risiko beinhalten, sollten falls möglich gemieden bzw. umfahren werden. Beispiele hierfür sind

- nicht dokumentierter Altbergbau
- singuläre vulkanische Ausbildungen (Vulkanschlote)
- Karsterscheinungen, Erdfälle, Subrosionssenken, etc.

Andernfalls sind bereits in der Grobkonzeption des Tunnelbaus potenzielle Erschwernisse und vergleichsweise hohe Baukosten zu berücksichtigen.

Abb. 4.2-6: Umstellung des Bauverfahrens infolge unvorhergesehener geologischer Besonderheiten (hier Vulkanschlot)



4.2.4 Umwelttechnische Aspekte

Die Baukosten eines Tunnels werden zunehmend auch von umwelttechnischen Aspekten geprägt. Dies betrifft – außer dem Schutz der Umwelt im Bau und Betrieb – insbesondere die Entsorgung des Ausbruchsmaterials und die Ableitung des Bergwassers (vgl. auch Kap. 4.3) bei vorhandenen Kontaminationen.

In der Vergangenheit war diese Problematik i. A. nur in Voreinschnitten und in Portalnähe bei anthropogenen Ablagerungen (Altlasten etc.) relevant. Einen seltenen Fall stellt die Unterquerung von Deponien und Altlasten dar, der ganz erhebliche Zusatzkosten erfordern kann. Anthropogene Ablagerungen müssen daher als Planungsrandbedingung bekannt sein, um bereits im Linienfindungsverfahren durch eine entsprechende Trassenwahl berücksichtigt werden zu können. Darüber hinaus kann auch eine geogene, d.h. natürliche Hintergrundbelastung des Gebirges von Bedeutung sein.

Grundsatz: Geogene und anthropogene Gebirgsbelastungen

Geogene (natürliche) und anthropogene (künstliche, vom Menschen verursachte) Belastungen des im Tunnelquerschnitt anstehenden Gesteins können erhebliche, häufig nicht übersehbare zusätzliche Kosten im Tunnelvortrieb verursachen. Die Existenz solcher Belastungen ist zu Beginn der Planungsarbeit mit der geologischen Gebirgsprognose bzw. durch Erhebungen bei den zuständigen Umweltbehörden zuverlässig zu klären.

Belastete Gebirgsbereiche sowie die Unterquerung von Altlasten, Altlastenverdachtsflächen und von Deponien sind bei der Trassenplanung möglichst zu vermeiden.

4.2.5 Verwertung von Ausbruchsmaterial

Ein weiterer die Baukosten beeinflussender Faktor ist der Umgang mit dem beim Ausbruch anfallenden Gesteinsmaterial. Dessen Verwendung ist abhängig von den bautechnischen Eigenschaften des Materials. Bei entsprechender Eignung kann aufbereitetes Ausbruchsmaterial für Bauzwecke, z. B. für Tragschichten oder als Betonzuschlag verwendet werden.

Bei einer solchen Nutzung als Zuschlagsstoff oder Verwendung als Material für den Erdbau können die Baukosten reduziert werden. Das Deponieren von Ausbruchsmaterial verursacht dagegen zusätzliche Kosten.

Im Rahmen der Linienfindung kann durch eine geeignete Trassenführung gegebenenfalls eine wirtschaftliche Nutzung des Ausbruchsmaterials ermöglicht werden.

4.2.6 Arbeitssicherheit

Ein kostenrelevanter Aspekt kann sich durch besondere Erfordernisse im Hinblick auf Arbeitsschutzmaßnahmen ergeben, wenn bei der Bearbeitung der Gesteine z. B. im Sprengvortrieb gesundheitsgefährdende Substanzen freigesetzt oder erzeugt werden. In diesem Fall ist mit erheblichen Mehrkosten während des Ausbruchs zu rechnen, was bereits im Rahmen der Linienfindung zu berücksichtigen ist.

4

GELÄNDE UND BAUGRUND



4.3 Grund- und Bergwasser

4.3.1 Allgemeines

Der Tunnelbau und die Unterhaltung von Tunnelbauwerken unterhalb des Grund- bzw. Bergwasserspiegels sind stets mit nennenswerten Erschwernissen und Kosten verbunden. Die zu berücksichtigenden Aspekte sind außerordentlich vielfältig, z. B.

in der Bauphase

- Vortriebsbegleitende Absenkung des Grund-/Bergwasserspiegels
- Setzungen der Geländeoberfläche infolge Grundwasserabsenkung
- Restwasserhaltung im Tunnel
- Standsicherheitsfragen infolge Wasser-/Strömungsdruck
- Standsicherheitsfragen infolge schädlicher Konsistenz-/Festigkeitsveränderung
- Ableitung/Entsorgung des im Tunnel gefassten Wassers

in der Betriebsphase

- Beeinflussung der Vegetation bei dauerhafter Absenkung des Bergwasserspiegels (dränierter Tunnel)
- Wartung dauerhafter Dränagen und Reinigung von Versinterungen
- Wasserzutritte durch schadhafte Dichtelemente oder sich verändernde Bergwasserverhältnisse

Aufgrund der großen Bedeutung des Grund- bzw. Bergwasserspiegels auf den Tunnelbau und die späteren Unterhaltungsmaßnahmen sind die dementsprechenden Randbedingungen bereits im Linienfindungsverfahren zu berücksichtigen. Zur Vermeidung von vergleichsweise hohen Bau- und Unterhaltungskosten sollten Tunnelbauwerke nach Möglichkeit oberhalb des Grundwasserspiegels und falls möglich außerhalb von besonderen Schutzzonen (Wasserschutzzonen, Heilquellenschutzgebiete, Naturschutz- und FFH-Gebiete etc.) verlaufen. Die Forderung nach einer grundwasserfreien Tunnelführung widerspricht jedoch häufig dem tunnelbautechnischen Grundsatz, wonach die Tunnelgradienten aus Standsicherheitsgründen möglichst tief unter dem Gelände verlaufen sollte. In der Planungsarbeit sind diese gegensätzlichen Forderungen planerisch in einem Gesamtkonzept zu optimieren. Zur Klärung des Sachverhaltes sind Grundlagenerhebungen vorzunehmen, wobei folgende Grundsätze gelten:

Grundsatz: Einfluss von Grund- und Bergwasser

Die Gradienten des Tunnels sollte, wo immer möglich, oberhalb des Grund- bzw. Bergwasserspiegels geplant werden. Der Bemessungswasserspiegel ist unter Berücksichtigung der natürlichen Schwankungsbreite abzuschätzen.

Grundsatz: Wasserschutzzonen

Tunnelbau in Wasserschutzzonen ist aufgrund genehmigungsrechtlicher Belange und der im Allgemeinen erforderlichen umfangreichen technischen Schutzvorkehrungen grundsätzlich zu vermeiden. Zur planerischen Berücksichtigung dieser Vorgabe sind zu Beginn der Planungsarbeiten das Vorhandensein von Wasserschutzzonen und Zonen des Heilquellenschutzes zu überprüfen.

Grundsatz: Grundwasserchemie

Aggressive Grundwässer und insbesondere Mineralwässer erfordern aufwändige Maßnahmen zum Schutz des Tunnelbauwerks. Dementsprechend ist der chemische Angriffsgrad der anstehenden Wässer abzuschätzen.

Grundsatz: Belastete Gebirgswässer

Altlasten, Altlastenverdachtsflächen, Deponien etc. können eine chemische Belastung des Grundwassers bewirken, die sowohl während des Tunnelvortriebs als auch zum dauerhaften Schutz des endgültigen Bauwerks erhebliche zusätzliche Kosten erfordern können. Dies betrifft die Entsorgung des im Tunnel gefassten Bergwassers, die Arbeitssicherheit des Personals im Tunnel und die Abdichtung der Innenschale. Ferner kann ein hoher chemischer Angriffsgrad die Beständigkeit und somit die Nutzungsdauer des Tunnelbauwerks nennenswert herabsetzen. Belastete Gebirgsbereiche sowie die Unterquerung von Altlasten, Altlastenverdachtsflächen und von Deponien sind bei der Trassenplanung zu vermeiden.

4.3.2 Einfluss in der Bauphase

Die Sicherung des Ausbruchsquerschnittes mit Spritzbeton wird in der Regel nicht wasserdruckhaltend konzipiert. Die Spritzbetonschale wird dementsprechend nicht gegen Wasserdruck bemessen. In wasserführenden Gebirgsbereichen wird das anfallende Wasser mit Hilfe von Abschlauungen drucklos abgeführt.

Die Wasserhaltung bei dem noch nicht mit der Innenschale ausgekleideten Tunnel führt entlang der Tunnelachse zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels, welche bis zur Ausbruchsohle reichen kann. Diese tritt, unabhängig von einer etwaigen Abdichtung der später einzubauenden Innenschale, unter den genannten Randbedingungen stets auf und ist daher genehmigungsrelevant. Die temporäre Absenkung des Bergwasserspiegels ist im Bereich der Ortsbrust darüber hinaus auch Voraussetzung zur Durchführung der NÖT, da sich der frische Spritzbeton i.A. nicht gegen den Strömungsdruck aufbringen lässt.

Hinsichtlich des Einflusses von Grund- und Bergwasser auf die Durchführung von Tunnelvortrieben ist zu unterscheiden, ob die Baumaßnahmen im Lockergestein (Boden) oder im Fels durchgeführt werden.

Beim Vortrieb im Festgestein sind Maßnahmen zur Fassung und Ableitung des an der Ortsbrust und lokal an der Tunnelwandung zutretenden Bergwassers meist ausreichend.

Im Allgemeinen ist es nicht erforderlich, den Bergwasserspiegel für die Durchführung eines Tunnelvortriebs vauseilend abzusenken. Wegen der vergleichsweise geringen Durchlässigkeit von klüftigem Festgestein sind die anfallenden Wassermengen in der Regel beherrschbar, i.d.R. sind Maßnahmen zur Fassung und Ableitung des an der Ortsbrust und lokal an der Tunnelwandung zutretenden Bergwassers ausreichend.

4

GELÄNDE UND BAUGRUND

Der an der Ortsbrust wirksame Strömungsdruck führt infolge der vergleichsweise hohen Gebirgsfestigkeit normaler Weise zu keinen Standsicherheitsproblemen. Dennoch kann auch im Fels in Sonderfällen, z.B. bei stark wasserführenden Störungen eine gezielte voraus-eilende Absenkung des Bergwasserspiegels sinnvoll bzw. notwendig sein. Solche Maßnahmen sind technisch und wirtschaftlich aufwändig. Dementsprechend ist das Risiko ungünstiger Randbedingungen frühzeitig zu prüfen.

Steht im Tunnelquerschnitt Boden oder zersetzter Fels mit lockergesteinsähnlichen Eigenschaften an, ist in der Regel eine voraus-eilende Grundwasserabsenkung erforderlich, da die notwendige Standsicherheit der Ortsbrust unter Berücksichtigung des bei hohem Wasser-

stand wirkenden Strömungsdrucks im Allgemeinen nicht zu gewährleisten ist. Diese Absenkung erfolgt in der Regel mit Hilfe von Brunnen, die von der Geländeoberfläche aus gebohrt und hergestellt werden.

Sofern eine solche Grundwasserabsenkung in Erwägung gezogen wird, ist zunächst deren Genehmigungsfähigkeit und Ausführbarkeit zu prüfen und zu klären. Insbesondere bei anstehenden Sanden und Kiesen kann die anfallende Wassermenge für eine machbare Bewirtschaftung zu groß werden (Abb. 4.3-1).

Bei abgesenktem Grundwasserspiegel erfolgt der Tunnelvortrieb unbehindert von den geohydraulischen Verhältnissen. Allerdings muss im Tunnel mit Restwässern gerechnet werden, die zu fassen und abzuleiten sind. Hierfür sind technische Einrichtungen und Aufstellflächen einzuplanen.

In jedem Fall erschwert anstehendes Bergwasser den Tunnelvortrieb, da zusätzliche bauliche Maßnahmen, wie die Fassung des an der Ortsbrust anfallenden Wassers, Einbau und Pflege der Abschlachungen etc. anfallen. Die hieraus resultierende Erhöhung der Baukosten (ohne Berücksichtigung von Abdichtungen/Dränagen im Zusammenhang mit der Ausbildung der Innenschale) sind im Vergleich mit den Maßnahmen zur Abdichtung oder Dränung jedoch verhältnismäßig gering.

In Abb. 4-3.2 sind die Mehrkosten eines Tunnelvortriebs im Falle einer erforderlichen Grundwasserabsenkung einschließlich der ergänzenden Wasserhaltung im Vortriebsbereich für vereinfachte Verhältnisse aufgetragen. Die Angaben beinhalten **nicht** die Kosten für eine dauerhafte Abdichtung bzw. Dränung des Bauwerks (s. Kap. 4.3.3).

Abb. 4.3-1: Abschätzung der bei einer Grundwasserabsenkung anfallenden täglichen Wassermenge (Baumaßnahme: L= 500 m, B= 25 m; Absenkung des GW-Spiegels: 10 m bzw. 20 m)

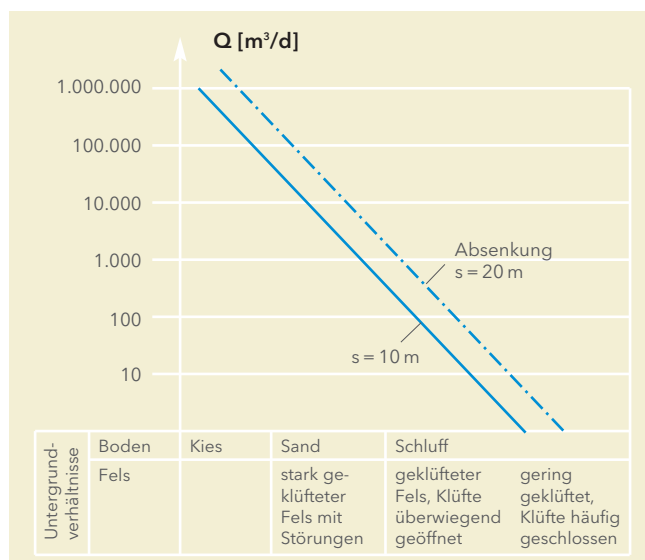
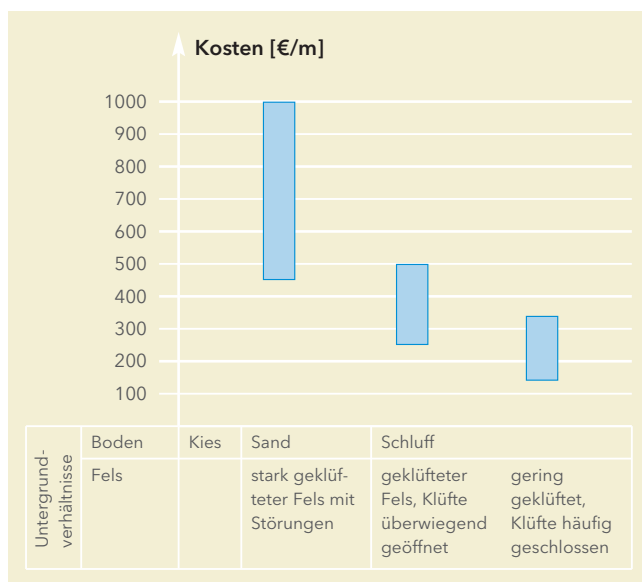


Abb. 4.3-2: Abschätzung der Zusatzkosten im Tunnelvortrieb infolge Wasserhaltung



Tunnelvortriebe sollten sowohl im Locker- als auch im Festgestein steigend ausgeführt werden, d. h. die Gradiente steigt, ausgehend vom bergmännischen Tunnelanschlag an. Diese Konzeption erleichtert die Entwässerung des Bauwerks, da die Ableitung der anfallenden (Rest-)Wässer unter Nutzung der Gefälleverhältnisse ohne Pumpen vorgenommen werden kann. Ferner entwässert der standsicherheitsempfindliche Bereich der Ortsbrust ohne technische Hilfsmittel. Der Ausfall der Wasserhaltung oder betriebliche Versäumnisse führen somit nicht zwangsläufig zu Standsicherheitsproblemen. Das beschriebene Konzept erfordert jedoch, dass die Baustelleneinrichtungsfläche für den Tunnelvortrieb am tiefer gelegenen Portal des Tunnels angeordnet wird. Der hierfür notwendige Platzbedarf ist frühzeitig zu klären, da er ggf. die Gefälleverhältnisse und somit auch die Gradienten des Tunnels beeinflusst.

Grundsatz: Bauzeitliche Wasserhaltung

Der Tunnelvortrieb sollte möglichst steigend erfolgen. Dies ist bei der Lage der Baustelleneinrichtungsflächen und der Aufstellflächen für die Wasserbehandlung und -einleitung zu beachten. Mögliche Auswirkungen der erforderlichen Grundwasserabsenkung sind zu berücksichtigen.

4.3.3 Einfluss auf Bauwerkskonstruktion und die Betriebsphase

Neben den vorgenannten Einflüssen des Grundwassers auf den Tunnelvortrieb sind auch die dauerhaften Auswirkungen auf das Bauwerk in der Betriebsphase zu beachten. Hier ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob nach Durchführung der Vortriebsarbeiten die natürlichen Grundwasserverhältnisse wieder anzustreben sind oder alternativ eine dauerhafte Absenkung des Bergwassers vorgenommen wird.

Sofern eine dauerhafte Absenkung des Wasserspiegels überhaupt genehmigungsfähig und ökologisch vertretbar ist, sind die Ausführungsvarianten unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Aspekte zu bewerten.

Im Falle einer möglichen Grundwasserabsenkung wird bei der Bemessung der Tunnelinnenschale in der Regel kein Wasserdruck angesetzt. Diese Annahme der statischen Berechnung ist technisch mit Hilfe einer Drainage dauerhaft sicherzustellen. Neben den vergleichsweise geringen Investitionskosten für die Drainagemaßnahmen sind die Kosten für den Betrieb, Wartung und die Erhaltung der Anlage zu berücksichtigen. So ist infolge von Inkrustierungen (u. a. infolge Ausfällung von karbonathaltigen Verbindungen, natürlichem Eisen oder

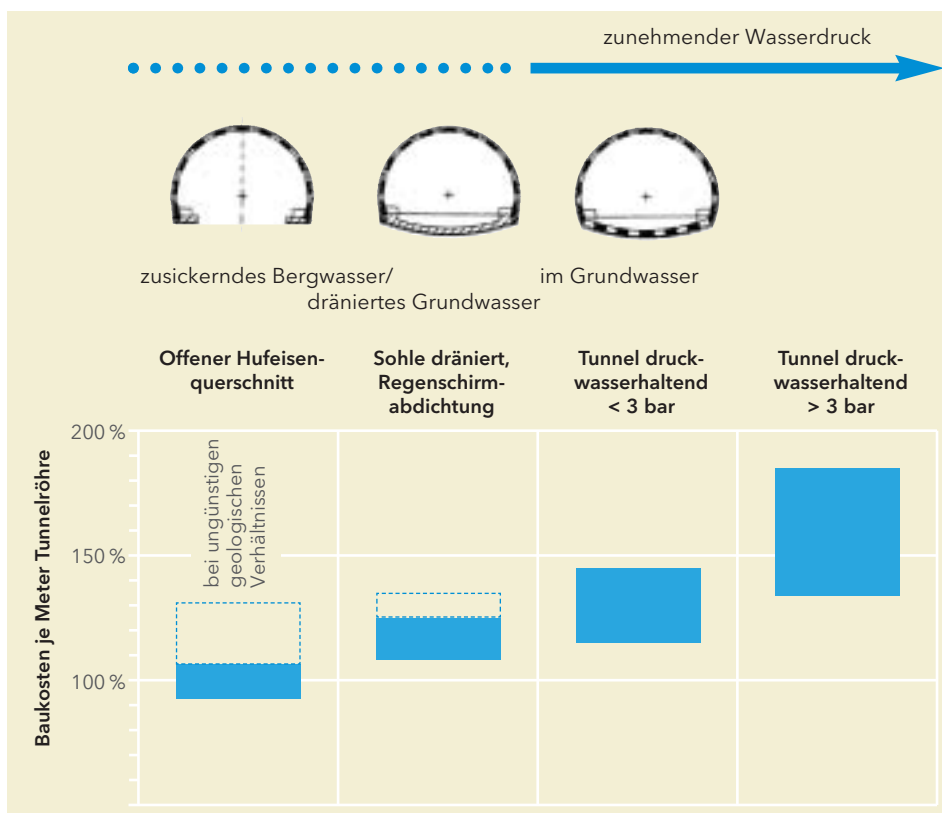
4

GELÄNDE UND BAUGRUND

Mangan) von einer im Laufe der Zeit stark verringerten Leistungsfähigkeit der Dränung auszugehen. Dementsprechend werden Wartungs- und Erhaltungsmaßnahmen notwendig, die einen nennenswerten Kostenaufwand verursachen und für die Zeit der Wartungsarbeiten eine Einschränkung der Nutzung des Tunnels bedingen. Nach vorliegenden Erfahrungen können die jährlichen Kosten zur Wartung von Tunneldränagen erhebliche Schwankungsbreiten aufweisen. Die zu veranschlagenden Wartungskosten liegen je nach örtlichen Verhältnissen zwischen 5 € und 30 € je Tunnelmeter und können, falls Instandhaltungsarbeiten an Rohrleitungen erforderlich werden, weiter ansteigen.

In der Regel erfolgt die Ableitung des Dränagewassers mit dem natürlichen Gefälle der entsprechenden Gradientensteigung. Erfolgt die Trassenführung in einer Wannelage, sind zusätzliche Baukosten für ein Auffangbecken und ein Pumpenbauwerk sowie in der Betriebsphase weitere Betriebskosten für die Förderung des Wassers sowie Wartungsarbeiten erforderlich. Im Falle, dass eine dauerhafte Absenkung des Bergwasserspiegels nicht vorgenommen werden soll, ist die Innenschale wasserdruckhaltend auszuführen. Die entsprechenden Hinweise zur Abdichtung von Straßentunneln sind in der ZTV-ING Teil 5, Tunnelbau [U7] enthalten. Die Abdichtung erfolgt mit Kunststoffdichtungs-

Abb. 4.3-3: Einfluss des Entwässerungs-/Abdichtungskonzeptes auf die Baukosten



bahnen (KDB), die zwischen Spritzbeton und Innenschale auf einer separat einzubauenden Ausgleichsschicht und auf Trägermaterial angeordnet wird. Bei hohen Wasserdrücken (>30 m) werden zusätzliche Maßnahmen wie z. B. doppelagige KDB-Abdichtungen oder Kombination mit WU-Beton erforderlich. Die Abdichtung des Tunnels allein mit wasserundurchlässigem Beton (WU-Beton) wird bei Straßentunneln wegen der vorhandenen betonietechnischen Schwierigkeiten, insbesondere im Firstbereich, in der Regel nicht eingesetzt. Das Bergwasser darf bei Einsatz von WU-Beton höchstens „chemisch mäßig angreifend“ sein.

Die Herstellung eines abgedichteten Tunnels führt im Vergleich zur drainierten Ausführung zu höheren Baukosten. Die Zusatzkosten alleine für die Abdichtung können überschlägig der Abb. 4.3-3 entnommen werden. Weitere Kosten können im Einzelfall durch die notwendige Anpassung des Tunnelquerschnittes an das Abdichtungskonzept entstehen. So kann beispielsweise ein bei günstigen Gebirgsverhältnissen aus statischen Aspekten ausreichender offener Hufeisenquerschnitt unter Bergwasser nicht gewählt werden, da zur Abdichtung in der Regel ein geschlossenes, möglichst kontinuierlich gekrümmtes Profil erforderlich ist.

Nennenswerte Betriebskosten zur Pflege und Wartung von abgedichteten Tunnelbauwerken fallen im Allgemeinen nicht an.

In besonderen Fällen kann eine Kombination von Abdichtung und Teilentspannung zur Reduzierung der hydraulischen Druckhöhe sinnvoll sein. Die Entscheidung hierüber erfordert eine große planerische Bearbeitungstiefe, die im Allgemeinen erst in späteren Planungsphasen erreicht wird.

Neben den vorgenannten konstruktiven Ausführungen können weitere einzelfallbezogene Lösungen in der Praxis umgesetzt werden [U3]. Abhängig von den jeweiligen Gebirgs- und Bergwasserverhältnissen entlang der Tunneltrasse ist durch eine Kombination der Systeme je nach Gebirgsabschnitt eine Kostenoptimierung anzustreben.

Grundsatz: Lage zum Grundwasser

Querschnitte mit offener Sohle (Hufeisenprofil) sind kostengünstig herstellbar, sofern es die Lage der Gradienten zum Grundwasserspiegel und die Festigkeit des Gebirges zulassen.

Drainierte Tunnel in Wannenlage sind zu vermeiden, sofern nicht der zu erwartende Wasseranfall sehr gering ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Grund- und Bergwässer die Bau- und Betriebskosten in erheblicher Größenordnung beeinflussen können. Nach Möglichkeit sollten Tunnel deshalb oberhalb des Bergwasserspiegels angeordnet werden. Dieser Grundsatz lässt sich allerdings in der Praxis häufig nicht oder nur bedingt umsetzen. Insbesondere ist aus Gründen der Standsicherheit vielfach eine eher tiefe Anordnung des Tunnels anzustreben, die aber häufig auch gleichbedeutend mit einer Einbindung in den Grundwasserhorizont ist. Es wird empfohlen, unter Berücksichtigung der in dieser Arbeitshilfe aufgeführten Aspekte bereits in einer frühen Planungsphase die Tiefenlage des Tunnels zu optimieren.

5

UMFELDFAKTOREN

Die Umfeldfaktoren können insbesondere beim Tunnelbau im innerstädtischen Bereich zu erheblichen Auswirkungen auf die Baukosten führen. Neben den höheren Kosten für den Grunderwerb stellt insbesondere der Schutz der bestehenden Bebauung große Anforderungen an das Bauverfahren.

5.1 Gebäude und Verkehrswege

5.1.1 Setzungen

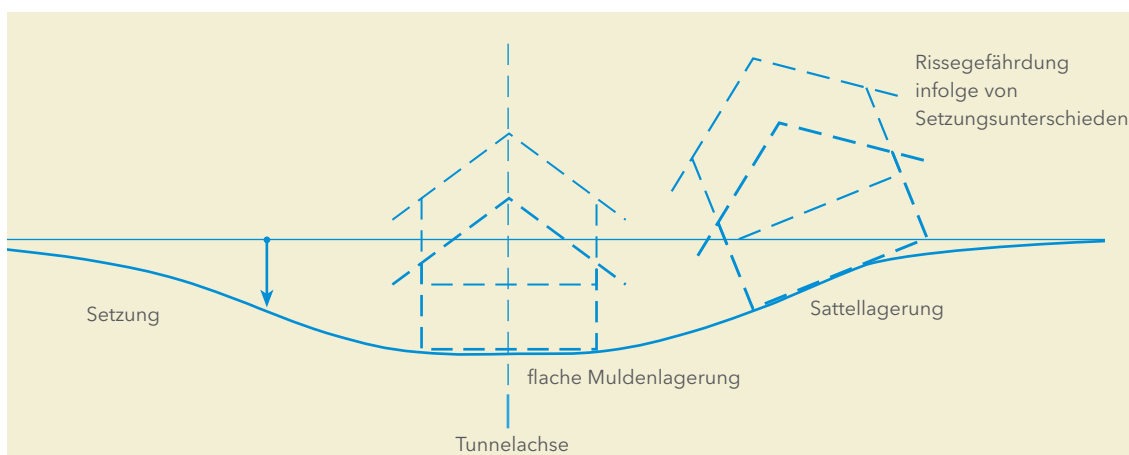
Tunnelvortriebe führen stets zu einer Veränderung der im Boden/Gebirge wirksamen Spannungszustände und somit auch zu Formänderungen. Diese wiederum bewirken an der Geländeoberfläche Setzungen, die sich Gebäuden, Anlagen und Verkehrswegen mitteilen. Die Größe der Setzungen hängt im Wesentlichen von der Verformbarkeit des Untergrundes, der Überlagerungshöhe des Tunnels, der Größe des Ausbruchsquerschnitts und dem Bauverfahren/Vortriebskonzept ab.

Setzungen und insbesondere Setzungsunterschiede können bei bestehenden Häusern, aber auch bei Straßen und Eisenbahnlinien zu unverträglichen Einwirkungen führen. Die Folge sind Risses Schäden, Beeinträchtigung der Gebrauchsfähigkeit und unter ungünstigen Umständen der Standsicherheit.

Die Frage, wie groß die für ein Gebäude oder einen Verkehrsweg zulässigen Setzungen sind, muss projektspezifisch untersucht werden. Insbesondere ist dabei auch die Form der Setzungsmulde zu berücksichtigen (Abb. 5-1). So kann beispielsweise eine vergleichsweise große, gleichmäßige Setzung unmittelbar in der Tunnelachse für ein Gebäude noch verträglich sein, wogegen bei seitlich versetzter Anordnung die geringere Setzung in Verbindung mit der dort auftretenden Schiefstellung zu Schäden führen kann.

Für Vorplanungen kann mit genügender Genauigkeit angenommen werden, dass vortriebsbedingte Setzungen keine signifikanten Schäden an Gebäuden und Ver-

Abb. 5-1: Vortriebsbedingte Setzungsmulde



kehrswegen verursachen, wenn diese auf eine Größenordnung von wenigen Zentimetern begrenzt werden. Diese Voraussetzung wird erfüllt, wenn

- a.) der Tunnel hinreichend tief angeordnet wird und das über der Firste anstehende Gebirge eine hinreichend geringe Verformbarkeit besitzt und/oder
- b.) der Tunnel einen hinreichend großen seitlichen Abstand von bestehenden Gebäuden und Anlagen hat.

Die unter a.) aufgeführte Bedingung wird im Allgemeinen bei Tunnelbauwerken mit den Abmessungen des Bezugstunnels erfüllt, wenn die in Abb. 5-2 skizzierten Anforderungen an die Firstüberlagerung gegeben sind. Die Angaben gelten für flach und geländenah gegründete bauliche Anlagen (keine Pfahlgründungen). Ein hinreichend großer seitlicher Abstand (b.) ist im Allgemeinen gegeben, wenn dieser mindestens der 3-fachen Tunnelbreite entspricht.

Ferner sind ggf. Setzungen infolge einer vortriebsbedingten Absenkung des Berg- bzw. Grundwasserspiegels zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 4.3). Eine temporäre Grundwasserabsenkung führt zu einer Erhöhung der wirksamen Vertikalspannungen im Untergrund und dementsprechend in Lockergesteinen zu Setzungen der Geländeoberfläche. Bei hoher Verformbarkeit des Untergrundes können die Formänderungen für eine etwaige Bebauung unverträglich groß werden. Vergleichbare Fragestellungen bekommen insbesondere dann Bedeutung, wenn als Untergrund schlufftonige Böden anstehen (s. Abb. 5-3 und 5-4).

Abb. 5-2: Überschlägige Anforderungen an die Firstüberlagerung von Tunnelvortrieben zur Vermeidung von setzungsbedingten Gebäudeschäden

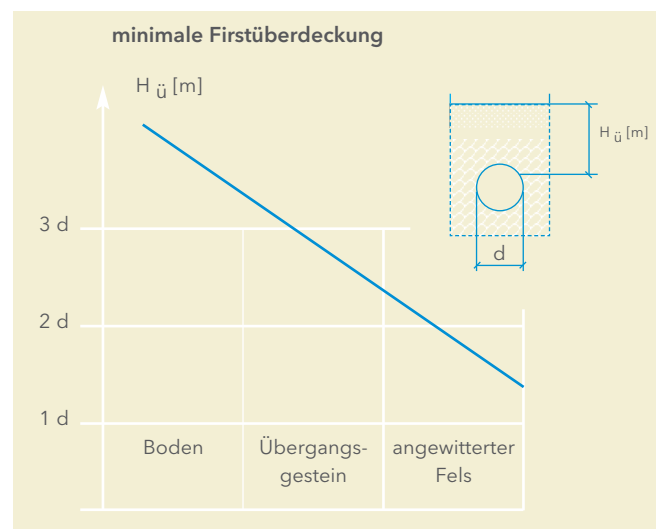
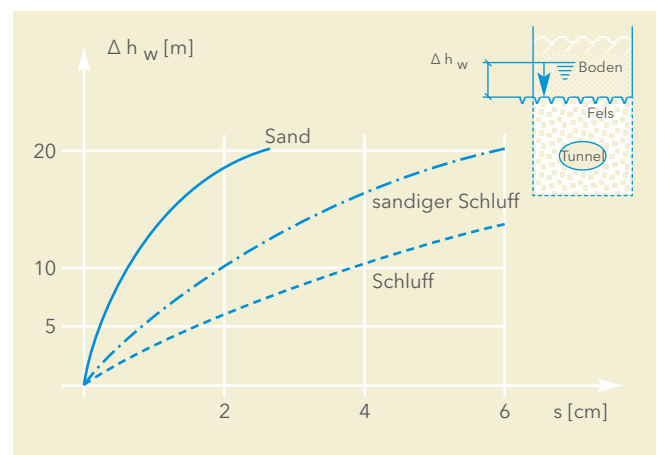


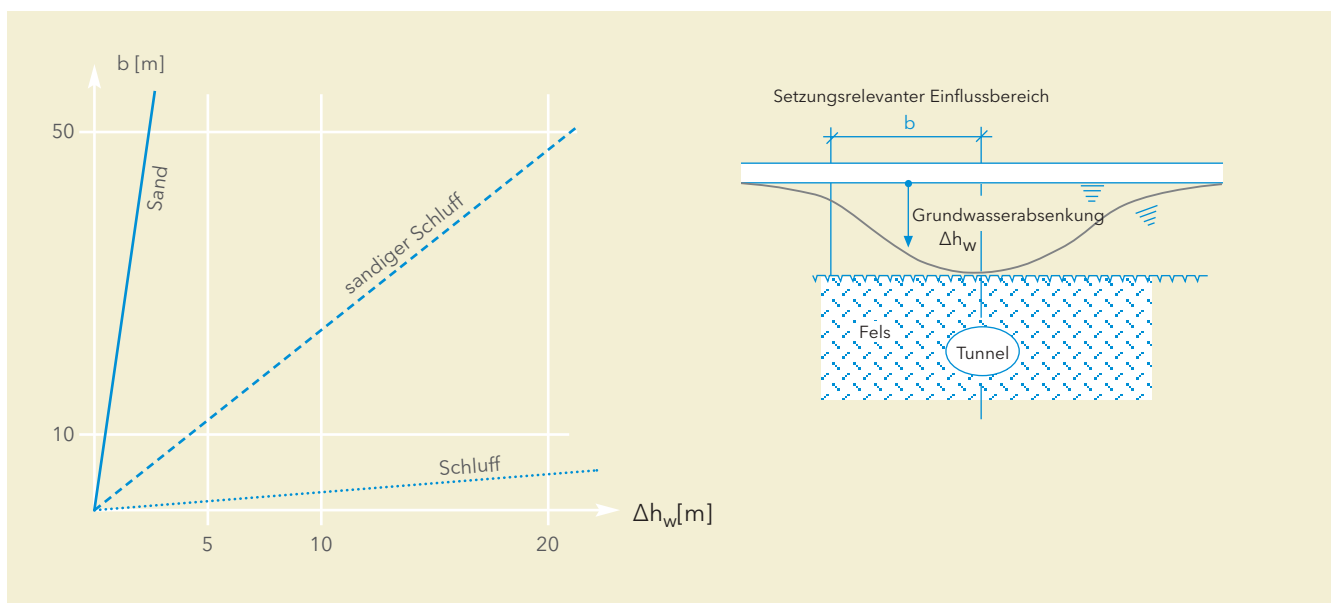
Abb. 5-3: Abschätzung der bei einer Grundwasserabsenkung zu erwartenden Setzungen der Geländeoberfläche



5

UMFELDFAKTOREN

Abb. 5-4: Abschätzung der setzungsrelevanten Reichweite einer Grundwasserabsenkung



5.1.2 Gebäudeunterfahrung

Ist infolge des Tunnelvortriebs mit größeren Setzungen zu rechnen, sind in der Regel Sicherungsmaßnahmen an bestehenden Häusern und Anlagen oder eine Sanierung notwendig. Hieraus sind zusätzliche Baukosten zu erwarten, die eine sehr wesentliche Größenordnung (z. B. für Rohrschirme, Unterfangungen) erreichen können. Aus diesem Grund sollte die Tunneltrasse nach Möglichkeit stets außerhalb des Einflussbereiches von bestehenden Gebäuden geführt werden.

Einen Anhaltspunkt über die anzunehmenden Mehrkosten bei der Unterfahrung von Gebäuden gibt Abbildung 5-5. Die Höhe der tatsächlichen Mehrkosten ist jedoch nur im Einzelfall zu beurteilen, diese können deutlich über die hier angegebenen Größenordnungen hinausgehen.

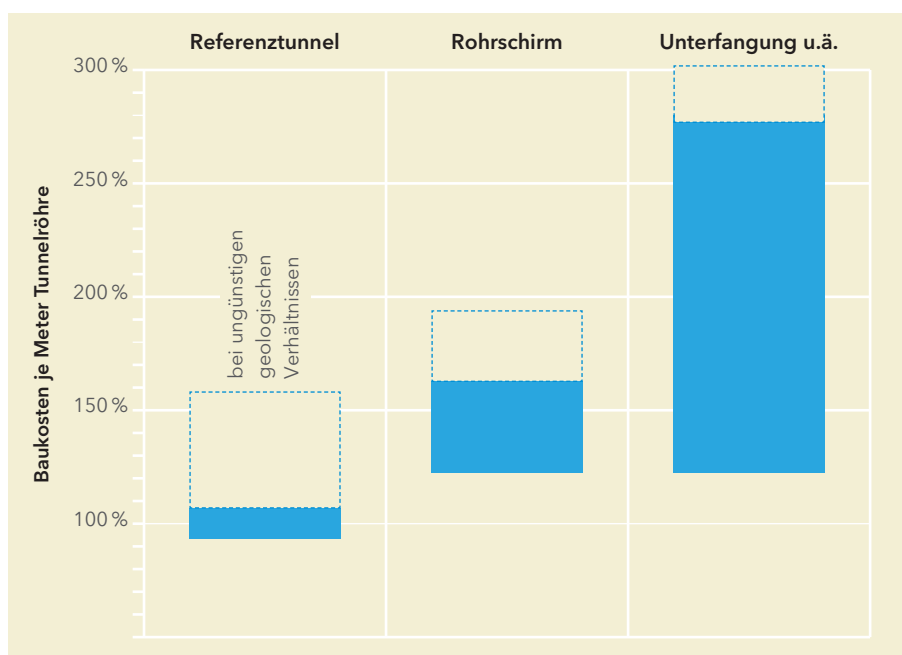
Grundsatz: Unterfahrung von bestehenden Bauwerken

Die Trasse des Tunnels sollte stets in möglichst großer Entfernung von Bauwerken und Verkehrswegen geführt werden. Unterfahrungen von baulichen Anlagen sind zu vermeiden. Ist eine bebauungsferne Trassenführung nicht möglich, fallen zusätzliche Kosten für Maßnahmen zur Setzungsminderung an.

5.1.3 Randbebauung

Baugruben bei Tunneln in offener Bauweise und Voreinschnitte (für die Strecken in offener Bauweise vor Beginn der eigentlichen bergmännischen Tunnelstrecke) stellen tiefe Geländeeinschnitte dar, die in der Regel zu verhältnismäßig großen und weit bis hinter die Baugrubenböschung reichenden Horizontalverschiebungen führen können. Diese können für seitlich der Trasse bestehende Bebauungen problematisch sein (Abb. 5-6). Bei Baugruben und Voreinschnitten nahe der Bebauung können daher umfangreiche und kostenintensive Sicherungsmaßnahmen erforderlich werden.

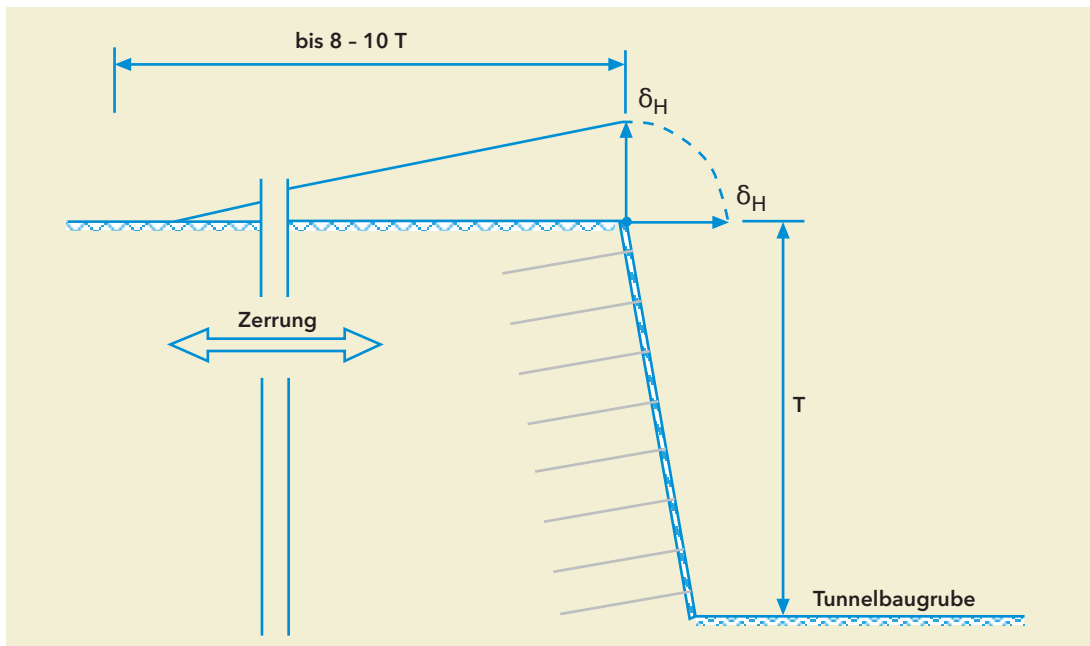
Abb. 5-5: Erhöhung der Baukosten durch Sicherungsmaßnahmen bei der Unterfahrung von Gebäuden



5

UMFELDFAKTOREN

Abb. 5-6: Horizontale Geländeverschiebungen bei der Herstellung tiefer Einschnitte



5.1.4 Aufrechterhaltung von Verkehrswegen

Die bisherigen Ausführungen gelten grundsätzlich auch für kreuzende Verkehrswege. Zur Aufrechterhaltung von Straßen oder Bahnstrecken können im Bauverlauf umfangreiche Maßnahmen für Zwischenzustände wie Streckenumlegungen, Hilfsbrücken u. a. erforderlich werden. Die zu erwartenden Kosten hierfür sind nur im Einzelfall ermittelbar.

Grundsatz: Kreuzen von Verkehrswegen

Das Kreuzen von Verkehrswegen ist möglichst zu vermeiden, anderenfalls werden meist umfangreiche Sicherungsmaßnahmen in der Bauzeit erforderlich.

5.2 Nachbarbebauung, Lärm und Erschütterungen

Außer dem Aspekt der vortriebsbedingten Setzungen sind bei der Unterfahrung von bewohntem Gelände auch Immissionen infolge der Vortriebsarbeiten zu beachten. Bei in der Tunnelstrecke anstehendem Festgestein wird das Gebirge häufig mit Hilfe von Sprengungen gelöst. Dabei entstehen Erschütterungen, die zu Schäden an der Bebauung führen können und von den Anliegern als störend wahrgenommen werden.

In Anlehnung an die Regelungen der DIN 4150 (Erschütterungen im Bauwesen) werden die an den Bauwerken zu messenden Schwinggeschwindigkeiten infolge eines Sprengvortriebs häufig auf eine Größenordnung von 2 mm/s bis 10 mm/s begrenzt. Um dieses Kriterium einzuhalten, sind im Allgemeinen verhältnismäßig große Abstände zwischen Vortrieb und Bebauung erforderlich. Als Mindestentfernung kann zunächst von etwa 100 m bis 150 m ausgegangen werden. Bei geringerer Entfernung sind projektspezifische Untersuchungen erforderlich. Zur Vermeidung unzulässig großer Erschütterungen muss gegebenenfalls der Sprengmitteleinsatz minimiert und damit die entsprechende Abschlagslänge verringert werden. Dies verursacht höhere Kosten für den Vortrieb und eine kostenrelevante Bauzeitverlängerung sowie ggf. ein kostenintensives Beweissicherungsverfahren.

Unabhängig von den Erschütterungen werden Sprengungen, aber auch andere Baustellentätigkeiten, wie beispielsweise Baggerarbeiten, Schrämarbeiten (bei Einsatz einer Teilschnittmaschine) und logistische Arbeiten (Ver- und Entsorgung der Baustelle, Schutterung (Abfuhr des gelösten Aushubmaterials)) von den Anwohnern infolge der Geräuschentwicklung meist als störend empfunden. Dies gilt insbesondere für die Nachtstunden.

Bei der geplanten Unterquerung von Wohngebieten muss daher mit Einschränkungen hinsichtlich der Arbeitszeiten gerechnet werden. So kann beispielsweise der im Tunnelbau übliche Durchlaufbetrieb genehmigungsrechtlich untersagt werden. Dies führt zu einer Verlängerung der Bauzeit und dementsprechend zu

höheren Baukosten. Unter schwierigen geotechnischen Randbedingungen kann infolge der standsicherheitskritischen täglichen Unterbrechungen sogar die technische Machbarkeit der Tunnelbaumaßnahme eingeschränkt werden.

Dementsprechend sind die aufgeführten Überlegungen bereits bei der Wahl der Tunneltrasse zu berücksichtigen und die Anwendungsmöglichkeit für lärmmindernde Maßnahmen wie z. B. die Ausrichtung des Tunnelmundes in unbebauter Richtung o. ä. zu prüfen. Behördliche Auflagen und die erforderlichen Maßnahmen zur Vermeidung von Lärm und Erschütterungen können zu Kostenmehrungen von mehreren Prozent der Gesamtbausumme führen.

Grundsatz: Lärm und Erschütterungen

Der Tunnelvortrieb sollte möglichst ohne große Unterbrechung erfolgen. Die Trasse ist daher möglichst fern von lärmempfindlichen Einrichtungen zu planen.

Den örtlichen Gegebenheiten ist i. d. R. durch Bauzeitbeschränkungen Rechnung zu tragen. Beschränkungen der Arbeitszeit und Verringerung des Sprengmitteleinsatzes verlängern die Bauzeit und erhöhen die Baukosten.



6

ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Planungshilfe werden die verschiedenen kostenrelevanten Faktoren bei Tunnelbauwerken erläutert und die Auswirkungen von planerischen Entscheidungen auf die späteren Bau- und Betriebskosten exemplarisch dargestellt.

Ausgehend von einer als Referenz definierten Ausgangssituation, einem konstruktiv einfachen Tunnel in günstigen Gebirgsverhältnissen, werden jeweils einzelne Einflussfaktoren der Bereiche

- Bauwerksgeometrie,
- Baugrund und
- Umfeldsituation

variiert und die relative Kostenveränderung als Funktion dieses Einflussfaktors aufgezeigt.

Hierdurch wird eine Optimierung der Trassenführung und des Bauwerks unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bereits in frühen Planungsphasen ermöglicht.

Bei einem Vergleich mehrerer Varianten können in einer ersten Näherung die Baukosten abgeschätzt werden.

Ferner können Mehrkosten transparent gemacht werden, die aus einer Veränderung einer Trasse im Rahmen des weiteren Planungsfortschritts resultieren.

- [U1] FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen):
Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), Ausgabe 2003
- [U2] BMV (Bundesministerium für Verkehr):
Leitfaden für die Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“, Verkehrsblatt-Verlag, Ausgabe 1998, Verkehrsblatt Dokument Nr. B 5004
- [U3] BMVBW (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen):
Abdichtungs- und Entwässerungssysteme bei Verkehrstunnelbauwerken, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 773, Bonn 1999
- [U4] BMVBW (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen):
Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln, Anlage ARS Nr. 6/2000 „Straßenquerschnitte in Tunneln“
- [U5] STUVA (Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.):
Straßenquerschnitte in Tunneln, Ermittlung der Tunnelbaukosten, 1997 (unveröffentlicht)
- [U6] Müller-Salzburg, Leopold:
Der Felsbau, Dritter Band: Tunnelbau, Enke-Verlag, Stuttgart 1978
- [U7] BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen):
Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 5 Tunnelbau, Sammlung Brücken- und Ingenieurbau, Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056, Stand Januar 2003
- [U8] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB), Ausgabe 2002
- [U9] Europäische Union:
Richtlinie 2004/54/ EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29.04.2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz
- [U10] BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen):
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Straßentunneln in Bezug auf die bautechnischen Sicherheitsanforderungen der RABT, Bergisch-Gladbach, Dezember 2004



ANLAGEN

Leitfaden zur Kostenoptimierung von Tunnelbauwerken im Rahmen der Linienfindung

0. Vorkonzeptionierung von Tunneltrasse und Gradiente aufgrund zunächst ausschließlich verkehrstechnischer und raumplanerischer Aspekte

1. Berücksichtigung tunnelbautechnischer/wirtschaftlicher Belange

- Die Firstüberdeckung des Tunnels (Hü) soll i. A. möglichst groß sein, mindestens jedoch dem 1,5- bis 2-fachen der Tunnelbreite (B) entsprechen.
- Der Tunnel soll aus Kostengründen stets möglichst kurz sein (vgl. Kapitel 3). (Ab $L = 400$ m fallen deutlich erhöhte Kosten für Rettungsmaßnahmen, ab $L = 900$ m zusätzlich für Verkehrsicherung (Pannenbuchten etc.) an.
- Bei hohem Verkehrsaufkommen ($DTV > 20.000$ Fz in der 15-Jahres-Prognose) ist die Erfordernis einer 2. Röhre zu prüfen.
- Die Unterfahrung von bebautem Gebiet, Verkehrswegen und von Schutzgebieten ist nach Möglichkeit zu vermeiden. In jedem Fall ist ein möglichst großer Abstand (> 500 m) und bei Unterfahrungen eine Firstüberdeckung $Hü > 3 B$ anzustreben.
- Kuppen und Wannen in der Streckenführung sind zu vermeiden.

Ergebnis:

Entwicklung von Trassenvarianten, für welche jeweils die Streckenführung und Gradiente grob konzipiert werden (jeweils erster Ansatz für Tunnellänge, Steigungs-/Gefälleverhältnisse, Regelquerschnitt, Flucht- und Rettungskonzept).

2. Berücksichtigung der geologischen Gebirgsprognose

- Tunneltrasse/-gradiente stets in tunnelbautechnisch günstige Gebirgseinheiten legen.
- Unterquerung von Senken/Täler i. A. vermeiden.
- Bereiche mit potenziellen geologischen Besonderheiten meiden (z. B. Altbergbau, Großstörungen, Karst, Erdfall).
- Tunnel möglichst oberhalb des Bergwasserspiegels anordnen. Falls dies nicht möglich ist Einbindetiefe in Bergwasser minimieren und bauzeitliche/dauerhafte Maßnahmen zur Beherrschung des Bergwassers vordimensionieren.
- Lehnentunnel vermeiden, dementsprechend seitliche Gebirgsüberdeckung möglichst groß wählen ($> 2-3 B$).

Ergebnis:

Entwicklung von Trassenvarianten, für welche jeweils die Streckenführung und Gradiente entworfen werden, Abdichtungskonzept für Tunnelquerschnitt, grobe Einschätzung der jeweiligen Baukosten unter Berücksichtigung des zu durchfahrenden Gebirges und der Maßnahmen zur Beherrschung des Bergwassers (bauzeitlich/dauerhaft als Abdichtung).

3. Detaillierung der Varianten

- Optimierung der Firstüberdeckung in den Portalbereichen sowie Abgrenzung offene/geschlossene Bauweise.
- Offene Bauweise i. A. möglichst lang.
- Tiefe Voreinschnitte vermeiden.
- Bereiche der geschlossenen Bauweise mit notwendigen Sondermaßnahmen (d.h. geringe Firstüberdeckung/ungünstige Gebirgseigenschaften) minimieren.
- Konzeptionierung des Portalbereichs (möglichst rechteckiger Schnitt zwischen Streckenachse und Streichen des Geländes).
- Grobkonzipierung der erforderlichen betrieblichen Einrichtungen (Lüftung, Beleuchtung, Betriebseinrichtungen etc.), Optimierung des Tunnelquerschnitts und des Rettungskonzeptes.

Ergebnis:

Entwicklung von Trassenvarianten, für welche jeweils die Streckenführung und Gradienten einschließlich der Portalbereiche entworfen werden, Entwicklung eines Rohkonzeptes zu betrieblichen Einrichtungen, Überprüfung des angesetzten Rettungskonzeptes.

4. Kritische Überprüfung der Varianten anhand der folgenden Checkliste:

- Liegt die Tunneltrasse durchgängig in tunnelbautechnisch günstigen Gebirgsabschnitten? (vgl. Gebirgsprognose)
- Werden ungünstige, nur schwierig zu erkundende geologische Besonderheiten (Altbergbau, Karst, Erdfallgebiete, Großstörungen) mit Sicherheit vermieden?
- Ist die Firstüberdeckung des Tunnels durchgängig hinreichend groß? ($Hü > 2-3 \cdot \text{Tunnelbreite}$)
- Ist die seitliche Gebirgsüberdeckung des Tunnels hinreichend groß? ($> 2-3 \cdot \text{Tunnelbreite}$). Lehnentunnel sind insbesondere dann zu vermeiden, wenn der Tunnel in nicht standfestem Fels (d.h. Boden, Hangschutt etc.) liegt.
- Ist die Tunnellänge minimiert?
- Bei gemischter Bauweise (offen/bergmännisch): Ist der Abschnitt der bergmännischen Bauweise (Firstüberdeckung $> 1 \cdot \text{Tunnelbreite}$) minimiert?
- Wurde bei der Wahl der Gradienten auf kuppen- und/oder wannenartige Streckenführungen verzichtet?
- Ist der Tunnelquerschnitt optimiert?
Große Ausbruchsquerschnitte nach Möglichkeit vermeiden!
- Sind die notwendigen Sicherheitseinrichtungen (Rettungskonzept) sowie die betrieblichen Einrichtungen (Lüftung, Beleuchtung, Pannenbuchten, Betriebsräume) berücksichtigt?
- Liegt der Tunnel optimal zum Bergwasserspiegel? (bevorzugt oberhalb des Bergwassers bzw. in minimierter Tiefe unterhalb des Bergwasserspiegels).
- Liegt die Tunneltrasse außerhalb des Einflussbereichs von Bebauung und weiteren Verkehrswegen? Wenn nein, weist der Tunnel in den kritischen Abschnitten eine erhöhte Firstüberdeckung auf, so dass keine Sondermaßnahmen zum Schutz des Bestandes notwendig werden?
- Liegt die Tunneltrasse außerhalb von Wasserschutzgebieten, insbesondere auch von Heilquellenschutzgebieten?
- Wird die Unterfahrung von Gewässern (auch Fischteiche) vermieden?
- Falls der Tunnel in den Bergwasserspiegel eintaucht: Sind für benachbarte Bauwerke schädliche Setzungen infolge bauzeitlicher Bergwasserabsenkung ausgeschlossen?
- Wurde der angenommene Tunnelquerschnitt entsprechend der prognostizierten Gebirgsqualität und dem wirksamen Wasserdruck dimensioniert?
- Wird an den Portalen auf tiefe Einschnitte verzichtet?
- Liegt die Streckenachse an den Portalen nahezu rechtwinklig zum Streichen des Hanges?
- Ermöglicht die Streckenführung an den Portalbereichen eine wirtschaftliche Optimierung des Tunnelbauwerkes? (Die Tunnelabschnitte mit geringer Firstüberdeckung ($< 2 \cdot \text{Tunnelbreite}$) bzw. Überdeckung mit gering tragfähigem Gebirge sind absolut zu minimieren.)

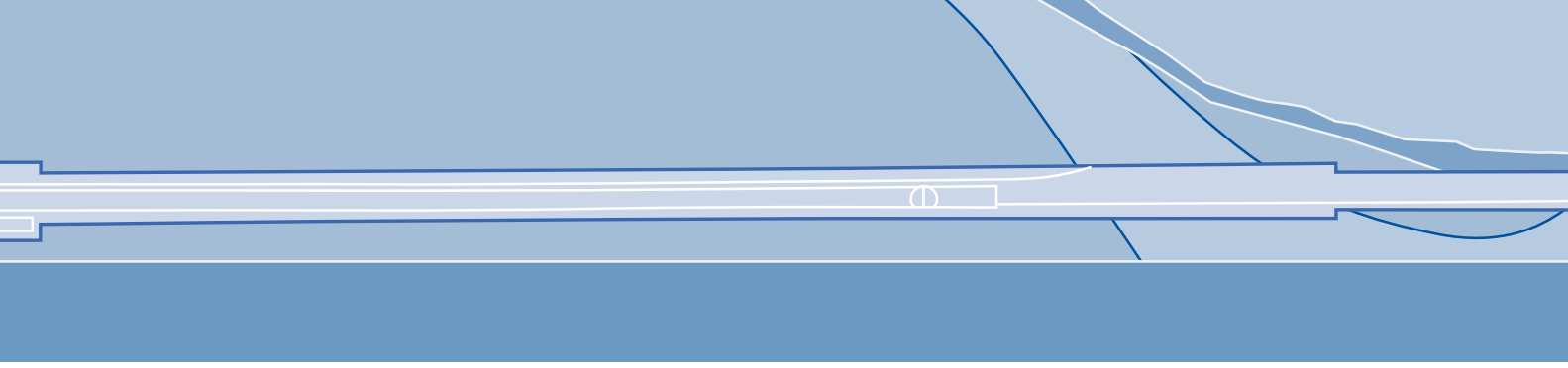
Ergebnis:

Entwicklung von Trassenvarianten als Grundlage für den Vorentwurf.



ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb. 1-1:** Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Kostenentwicklung während der Projektrealisierung eines Tunnelbauwerkes [ergänzt nach Gottschalk 1994]
- Abb. 1-2:** Alte Österreichische Tunnelbauweise (aus [U6])
- Abb. 1-3:** Ausbruch und Sicherung im traditionellen Bergbau (Türstockbauweise) (aus [U6])
- Abb. 1-4:** Tragsystem des Tunnelbaus nach der Spritzbetonbauweise
- Abb. 1-5:** Unterteilung des Ausbruchsquerschnitts
- Abb. 1-6:** Räumliche Ausbruchs- und Sicherungsfolge im Tunnelvortrieb nach der Spritzbetonbauweise (Hier: Kalotte - Strosse - Sohle - Vortrieb)
- Abb. 1-7:** Sicherungsmittel im Tunnelbau
- Abb. 1-8:** Häufig zur Anwendung kommende Vortriebsklassen
- Abb. 2-1:** Einflussfaktoren auf die Kosten von Tunnelbauwerken
- Abb. 2-2:** Längsschnitt des als Vergleichsbasis dienenden Referenztunnels
- Abb. 2-3:** Querschnitt des als Vergleichsbasis dienenden Referenztunnels
- Abb. 3-1:** Bauliche und technische Sicherheitseinrichtungen nach RABT [U1]
- Abb. 3-2:** Spezifische Baukosten und Gesamtbaukosten in Abhängigkeit von der Tunnellänge
- Abb. 3-3:** Tunnel in Wannen- oder Kuppenlage
- Abb. 3-4:** Beispiele für häufig verwendete Tunnelquerschnitte
- Abb. 3-5:** Baukosten in Abhängigkeit des Tunnelquerschnittes
- Abb. 3-6:** Relative Kosten für ein- und zweiröhrige Querschnitte (Fluchtstollen parallel zur Fahrtröhre)
- Abb. 4.1-1:** Vergleich der Tunnelbauweise in Abhängigkeit von der Firstüberdeckung
- Abb. 4.1-2:** Hauptspannungen und Isolinien der Vertikalspannungen für einen Lehnentunnel (Ergebnis einer Finite-Element-Berechnung)
- Abb. 4.1-3:** Bauweisen im Hangbereich für ein aus 2 Röhren bestehendes Tunnelbauwerk
- Abb. 4.1-4:** Baukosten in Abhängigkeit von der seitlichen Gebirgsüberdeckung
- Abb. 4.1-5:** Günstige (A) und ungünstige (B) Anordnung des Tunnelportals
- Abb. 4.2-1:** Modelle für Boden und Fels
- Abb. 4.2-2:** Absonderung von Felskeilen im Festgestein und erforderliche Sicherungsmaßnahmen
- Abb. 4.2-3:** Querschnittsformen von Tunnelbauwerken in Abhängigkeit von den Gebirgsverhältnissen
- Abb. 4.2-5:** Einfluss der Geologie auf die Tunnelbaukosten
- Abb. 4.2-6:** Umstellung des Bauverfahrens infolge unvorhergesehener geologischer Besonderheiten (hier Vulkanschlot)
- Abb. 4.3-1:** Abschätzung der bei einer Grundwasserabsenkung anfallenden täglichen Wassermenge (Baumaßnahme: L= 500 m, B= 25 m; Absenkung des GW-Spiegels: 10 m bzw. 20 m)
- Abb. 4.3-2:** Abschätzung der Zusatzkosten im Tunnelvortrieb infolge Wasserhaltung
- Abb. 4.3-3:** Einfluss des Entwässerungs-/Abdichtungskonzeptes auf die Baukosten
- Abb. 5-1:** Vortriebsbedingte Setzungsmulde
- Abb. 5-2:** Überschlägige Anforderungen an die Firstüberlagerung von Tunnelvortrieben zur Vermeidung von setzungsbedingten Gebäudeschäden
- Abb. 5-3:** Abschätzung der bei einer Grundwasserabsenkung zu erwartenden Setzungen der Geländeoberfläche
- Abb. 5-4:** Abschätzung der setzungsrelevanten Reichweite einer Grundwasserabsenkung
- Abb. 5-5:** Erhöhung der Baukosten durch Sicherungsmaßnahmen bei der Unterfahrung von Gebäuden
- Abb. 5-6:** Horizontale Geländeverschiebungen bei der Herstellung tiefer Einschnitte



HESSEN



**Hessische
Straßen- und Verkehrsverwaltung**

Stabsstelle Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Wilhelmstraße 10
65183 Wiesbaden
www.verkehr.hessen.de

Kompetenz aus einer Hand