

## Straßenquerschnitte in Tunneln

FA 2.163

Forschungsstelle: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. W. Brilon)  
 Bearbeiter: Lemke, K.  
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bonn  
 Abschluss: Juni 1999

### 1. Aufgabenstellung

Ebenso wie Straßenbrücken stellen Straßentunnel bautechnisch anspruchsvolle Ingenieurbauwerke dar. Zusätzlich erfordern sie eine umfangreiche Betriebsausstattung. Somit bedeutet der Bau eines Tunnels einen um ein Vielfaches höheren Kostenaufwand im Vergleich zu einem Straßenteilstück der freien Strecke. Darüber hinaus resultieren aus der aufwändigen technischen Ausstattung der Tunnel erhöhte Betriebs- und Erhaltungskosten zu Lasten der öffentlichen Haushalte.

Das Ziel dieses Projektes war es, ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe bereits im frühen Planungsstadium die volkswirtschaftlich bewerteten Kosten und Nutzen verschiedener Varianten eines Tunnelprojektes gegenübergestellt werden können. Mit Hilfe dieses Verfahrens soll der unter volkswirtschaftlichen Aspekten günstigste Tunnelquerschnitt einer mehrstreifigen Richtungsfahrbahn für die Realisierung gewählt werden können. Dieses neue Bewertungsverfahren ist als Aktualisierung und Neubearbeitung des „Allgemeine(n) Rundschreiben(s) Straßenbau (ARS) Nr. 16/1985“ des Bundesministers für Verkehr zu verstehen, welches 1996 außer Kraft gesetzt wurde.

### 2. Untersuchungsmethodik

Die Untersuchung gliedert sich in zwei Hauptabschnitte: Die Erfassung und Auswertung empirischen Datenmaterials zur Beschreibung der Besonderheiten von Tunnelstrecken und die eigentliche Entwicklung des Bewertungsverfahrens anhand der Vorgaben einschlägiger Richtlinien sowie anerkannter Verfahren aus der Literatur unter Verwendung der zuvor erfassten Daten.

Zunächst wurde eine Tunneldatenbank mit allen erforderlichen Daten über in Betrieb befindliche Tunnelstrecken in Deutschland aufgebaut. Auf der Basis dieser Datenbank erfolgte die Erhebung und Auswertung umfangreicher empirischer Daten, welche in die folgenden Teilbereiche unterteilt werden können:

- Analyse des Verkehrsablaufs in Straßentunneln anhand von Verkehrsdaten,
- Analyse von Beeinträchtigungen des Verkehrs durch Unfälle, Pannen und Arbeitsstellen,
- Untersuchung der Verkehrssicherheit von Straßentunneln anhand polizeilicher Unfalldaten,
- Ermittlung repräsentativer Baukosten für verschiedene Tunnelquerschnitte.

Je nach Untersuchungsgegenstand wurden unterschiedliche Analyseverfahren eingesetzt:

Zur Beschreibung des Verkehrsablaufs in Straßentunneln wurden insgesamt 16 Messungen durchgeführt, je zur Hälfte im Richtungsverkehr und Gegenverkehr. Durch die Auswahl der Messstellen konnten nahezu alle wesentlichen Tunnelquerschnitte abgedeckt werden. Lediglich aus dem Bereich der 3-streifigen Fahrbahnen konnte auf Grund der geringen Anzahl in Betrieb befindlicher Tunnel nur eine Strecke untersucht werden. Die Ergebnisse der Messungen wurden in Form von q-v-Diagrammen dargestellt. Zur Beschreibung der empirischen Zusammenhänge wurden lineare Modelle im q-v-Diagramm und im k-v-Diagramm durch Regression an die Daten angepasst.

Um ein einheitliches Modell für die Beschreibung des Verkehrsablaufs in den verschiedenen Tunnelstrecken in Abhängigkeit der Einflussparameter Längsneigung, Lkw-Anteil, Tempolimit etc. zu entwickeln, wurde das Verfahren der Varianzanalyse eingesetzt. An den Daten des Elbtunnels wurden verschiedene Modelle für den gebundenen Verkehr sowie das nicht-lineare Modell im k-v-Diagramm nach van Aerde geeicht.

Im Rahmen der Untersuchung des Verkehrsablaufs bei Störfällen wurden aus dem erhobenen empirischen Material sowie aus der Literatur Angaben über Häufigkeit, Dauer und Art der Querschnittseinschränkung durch Störungen wie Unfälle, Pannen und Arbeitsstellen zusammengestellt.

Die Verkehrssicherheit von Straßentunneln wurde auf der Basis einer umfassenden Erhebung polizeilicher Unfalldaten von rd. 80 Tunnelstrecken beurteilt. Mit Hilfe dieses Materials konnten aktuelle Unfallkenngrößen für verschiedene Tunnelquerschnitte ermittelt werden.

Die Ermittlung der Tunnelbaukosten wurde als Unterauftrag an die „Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V.“ (STUVA) in Köln vergeben. Dort wurden die Tunnelrohbaukosten für Tunnelquerschnitte mit und ohne Standstreifen im Zuge 2- und 3-streifiger Fahrbahnen ermittelt. Dabei wurden verschiedene Bauverfahren und Schwierigkeitsklassen zu Grunde gelegt. Die Kosten wurden unter Beteiligung der Bauindustrie auf der Basis von Leistungsverzeichnissen aus Einheitspreisen kalkuliert. Des Weiteren führte die STUVA eine Schätzung zum Kosteneinfluss der Ausstattung auf die Querschnittswahl durch, wobei die Kosten für die Anlage und den Betrieb von Beleuchtung und Lüftung ebenfalls geschätzt wurden.

Die monetäre Bewertung der Baukosten und der verkehrlichen Kenngrößen erfolgte in Anlehnung an das Regelwerk für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (EWS 1997). Als Entscheidungskriterium wurde das Nutzen/Kosten-Verhältnis verwendet. Die Beschreibung des Verkehrsablaufs in Überlastungsfällen wurde entsprechend den Erfordernissen des Bewertungsverfahrens modifiziert. Dabei wurde ein makroskopisches Staumodell nach der Kontinuumstheorie eingesetzt. Die Berechnung der aus dem Verkehrsablauf resultierenden monetären Parameter erfolgte in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussgrößen mit einem speziell für diesen Zweck konzipierten Computerprogramm.

## 3. Untersuchungsergebnisse

Als Ergebnis der Untersuchung des Verkehrsablaufs wurden allgemeine q-v-Modelle für Tunnel angegeben. Auf der Basis der Varianzanalyse ist die Beschreibung des freien und teilgebundenen Verkehrs im Tunnel für verschiedene Einflussfaktoren möglich. Die Kapazitäten der Tunnelstrecken wurden auf Grund fehlender empirischer Daten im Wesentlichen anhand von Angaben aus der Literatur geschätzt.

Ein bei entsprechenden Geschwindigkeitsbeschränkungen generell von der freien Strecke abweichendes Fahrverhalten im Tunnel konnte nicht festgestellt werden. In Einzelfällen sind jedoch besondere Verhaltensweisen nicht auszuschließen, insbesondere sind die Verkehrsteilnehmer im Tunnel eher bereit, bestehende Geschwindigkeitsbegrenzungen zu berücksichtigen.

Bei der Analyse der Verkehrssicherheit von Tunnelstrecken zeigte sich, dass in Tunneln insgesamt mehr leichte Unfälle auftreten als auf freien Strecken. Es wurden mittlere Unfallraten und Unfallkostenraten für die verschiedenen Tunnelquerschnitte angegeben.

Das Unfallgeschehen in Tunneln konnte anhand einer differenzierten Unfalltypen- und Unfallartenbetrachtung beschrieben werden. Die vorherrschenden Unfalltypen in Tunneln sind Fahr-Unfälle, Unfälle im Längsverkehr und sonstige Unfälle. Unfälle infolge ungünstiger Witterungsverhältnisse wie Glatteis, Schnee, Regen, Wind und Nebel sowie Unfälle mit Wild sind nahezu ausgeschlossen. Die generelle Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h oder weniger wirkt sich günstig auf die Folgen der Unfälle aus.

Nur in 8 Fällen (von 1159 Unfällen) wurden Unfälle mit tödlichem Ausgang beobachtet. Alle diese Unfälle waren Fahr-Unfälle.

Die Untersuchung durch die STUVA lieferte die Rohbaugesamtkosten von jeweils zwei mehrstreifigen Tunnelröhren (2- und 3-streifig) an Bundesfernstraßen in Abhängigkeit vom Querschnittstyp, der Bauweise, den Gebirgs- und Grundwasserverhältnissen sowie der Tunnellänge. Es zeigte sich, dass die Mehrkosten für den jeweils größeren Querschnitt mit Standstreifen je nach Bauweise ganz erheblich schwanken. Die Kostenunterschiede betragen für die offene Bauweise und die Spritzbetonbauweise rd. 20 %. Beim Einsatz des maschinellen Vortriebs lagen sie bei über 30 %, wenn der kleinere Querschnitt keine Pannenbuchten benötigt, und bei nur noch 6 % mit Pannenbuchten.

Die Gegenüberstellung der unter den getroffenen Annahmen ermittelten Kosten und des Nutzens des jeweils größeren Querschnitts mit Standstreifen gegenüber dem kleineren Querschnitt

ohne Standstreifen zeigt, dass in vielen Fällen der kleinere Querschnitt unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten ausreicht.

Unter ungünstigen verkehrlichen Bedingungen wie hohen Belastungen, hohen Längsneigungen und Güterverkehrsanteilen sowie bei einfachen Bauweisen kann u. U. auch der größere Querschnitt günstiger sein.

Unabhängig von den verkehrlichen Aspekten ist bei maschinellm Vortrieb im Lockergestein an 4-streifigen Autobahnen i. d. R. der Querschnitt mit einem reduzierten Standstreifen von 1,50 m für den Baulastträger günstiger als ein Querschnitt ohne Standstreifen aber mit mehr als einer Pannenbucht je Röhre.

## 4. Folgerungen für die Praxis

Als Abschluss wurde ein Vorschlag für eine neue Richtlinie zur Ermittlung des wirtschaftlich günstigsten Tunnelquerschnitts vorgelegt. Dieser Vorschlag enthält alle erforderlichen Diagramme für die Anwendung des Verfahrens. Die zusätzlichen jährlichen Kosten des Querschnitts mit Standstreifen gegenüber dem Querschnitt ohne Standstreifen für den Baulastträger können den entsprechenden eingesparten Kosten des Verkehrs gegenübergestellt werden. Dabei werden aus baulicher Sicht verschiedene Tunnellängen, Bauverfahren und Schwierigkeitsklassen berücksichtigt. Aus verkehrlicher Sicht gehen die mittlere Längsneigung, der durchschnittliche tägliche Verkehr und der mittlere Güterverkehrsanteil ein. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist für durchschnittliche Verhältnisse in einem frühen Planungsstadium die Wahl eines Tunnelquerschnitts möglich, der aus einer volkswirtschaftlichen Betrachtungsweise heraus als günstige Lösung anzusehen ist. Im Gegensatz zum bisherigen Verfahren des ARS 16/85 kann hiermit dem Planer ein dem neuesten Stand der Technik und den aktuellen Kostenstrukturen entsprechendes Hilfsmittel zur Verfügung gestellt werden.

Darüber hinaus können Teilergebnisse dieser Untersuchung in verschiedene andere Richtlinien Eingang finden. Die im Rahmen dieses Projektes definierten Regelquerschnitte für Tunnel sollten in den zukünftigen Entwurfsrichtlinien für Autobahnen und für einbahnige Außerortsstraßen dargestellt werden. Bei der Bemessung von Autobahnabschnitten und 2-streifigen Landstraßen können die ermittelten q-v-Beziehungen wertvolle Hinweise über den Verkehrsablauf in Tunneln liefern. Deshalb sollten die entwickelten q-v-Diagramme in das in der Entwicklung befindliche Regelwerk HBS aufgenommen werden.

Schließlich ist anhand der angegebenen mittleren Unfallraten und Unfallkostenraten für verschiedene Tunnelquerschnitte eine explizite Berücksichtigung der Tunnel im Rahmen von Sicherheitsanalysen und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von größeren Straßenabschnitten oder Netzen möglich.