

Einflussfaktoren für die Sicherheit von Strassentunnels

*Markus Hubacher & Ueli Salvisberg
Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu*

Einleitung

Dem Unfallgeschehen in Strassentunnels wurde bis vor kurzem relativ wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Der Grund hierfür ist, dass Tunnels relativ sichere Anlagen darstellen; in ihnen sind pro 100 km Netzlänge weniger Verletzte und Getötete zu verzeichnen als auf der freien Strecke. Auch absolut betrachtet fallen Tunnelanlagen nicht gross ins Gewicht, weil der Anteil der verunfallten Personen nur etwa 9% aller auf Autobahnen und Autostrassen verunfallten Personen beträgt.

Mit den Grossereignissen im Montblanc-Tunnel, im Tauern-Tunnel und im Gotthard-Strassentunnel mit vielen Toten ist die Tunnelproblematik wieder aufgekommen. Es stellte sich die Frage, welches die Probleme beim Befahren eines Tunnels sind und wie die Sicherheit erhöht werden kann.

Mögliche Einflussfaktoren für die Sicherheit

Generell lässt sich sagen, dass das Befahren von Tunnels keine grossen kognitiven Fähigkeiten erfordert, weil kaum komplexe Situationen zu bewältigen sind wie das etwa im dichten Agglomerationsverkehr der Fall ist. Jedoch werden an die Wahrnehmung und deren Verarbeitung andere Anforderungen gestellt als auf freier Strecke. Nachfolgend sind beispielhaft einige aufzeigt:

Hell-Dunkel-Adaptation:	Anpassung der Augen von der Helligkeit an die Dunkelheit bei der Einfahrt in den Tunnel. Während einer gewissen Zeit besteht die Gefahr nichts zu sehen. Bei Tunnelausfahrt umgekehrt auch möglich; die Dunkel-Hell-Adaptation verläuft jedoch schneller.
Sichtbedingungen:	Beleuchtungsstärke im Tunnel. Ist es eher dunkel oder eher hell.
Optische Führung:	Hat man Fixationspunkte, an denen man sich orientieren und seine Position überprüfen kann? Ist oft das Problem von runden Tunneldecken ohne Kanten; zudem ist möglicherweise alles eintönig grau und bietet keine Fixationspunkte.
Antizipation:	Distanz der Vorausschaubarkeit. Durch die Tunnelwände wird in Kurven das Vorausschauen eingeschränkt.
Aufmerksamkeit:	Monotone Umgebung verleitet zu Unaufmerksamkeit; beeinflusst z. B. die Reaktionszeit negativ; ist wohl erst bei langen Tunnels bedeutsam
Angstgefühle:	Enge kann Platzangst auslösen; es könnten Fluchtreaktionen auftreten, d.h. das Gefühl, den Tunnel so schnell wie möglich verlassen zu wollen, was wiederum zu höheren Geschwindigkeiten führen kann. Wohl auch erst bei langen Tunnels bedeutsam
Spurhalten:	Kann schwieriger sein, wenn die optische Führung schlecht ist und Fixationspunkte fehlen. Auch der seitliche Abstand zur Tunnelwand hat einen Einfluss auf das Spurhalten.

Untersuchungen bezüglich der Bedeutung oben erwähnter Probleme auf die Sicherheit in Tunnels liegen nur wenige vor:

- Hinsichtlich der Beleuchtung werden sowohl positive als auch negative Einflüsse auf das Unfallgeschehen berichtet

- Beim Spurhalten wurde festgestellt, dass eine Tendenz zur Fahrbahnmitte hin festzustellen ist, wenn der Abstand von der Fahrbahn zur Tunnelwand klein ist. Der gleiche Effekt wird auch erwartet, wenn in der Ferne das Tunnelende zu sehen ist und deshalb der Blick auf das Tunnelende fixiert wird. Es wird deshalb auch vorgeschlagen, Tunnels bewusst kurvig zu gestalten.

Das Fahrverhalten im Tunnel wird natürlich sehr stark von der Umgebung beeinflusst, also von der Tunnelinfrastruktur, d. h. von der Tunnelgeometrie und –ausrüstung. Weitere Faktoren, die für das Fahrverhalten eine Rolle spielen, die aber mit der Tunnelgeometrie oder der Ausrüstung nichts zu tun haben, sind z. B. die Verkehrsmenge (beeinflusst das Abstands- und Geschwindigkeitsverhalten), der Anteil des Schwerverkehrs (beeinflusst ebenfalls das Abstands- und Geschwindigkeitsverhalten, auch z. B. den seitlichen Abstand beim Überholen) oder die Röhrigkeit, d. h., ob 1 oder 2 Tunnelröhren vorhanden sind. 1-röhrige Anlagen sind in der Regel nicht richtungstrennend, 2-röhrige jedoch schon.

Untersuchung der Einflussfaktoren für die Sicherheit in Strassentunnels

Mit Hilfe einer umfangreichen Studie sollte untersucht werden, welche Faktoren für die Tunnelsicherheit von Bedeutung sind. Das Augenmerk wurde ausschliesslich auf anlage- und betriebstechnische Merkmale gelegt, weil davon ausgegangen wird, dass die Tunnelinfrastruktur das Fahrverhalten zu einem gewissen Teil determiniert.

Für die Untersuchung wurden bei sämtlichen Betreibern (kantonale oder städtische Behörden) von Autobahn- und Autostrassentunnels in der Schweiz Daten zur Tunnelinfrastruktur und zum Betrieb erhoben (das Untersuchungskollektiv geht aus Tabelle 1 hervor; es waren praktisch alle Schweizerischen Tunnels mit einer Länge > 20 m vertreten).

Tabelle 1:
Untersuchungskollektiv (absolute Anzahlen)

Länge	mit Gegenverkehr (1 Röhre)	ohne Gegenverkehr (2 Röhren)	Total
< 0.6 km	25	69	94
0.6 – 2.0 km	12	31	43
2.001 – 4.0 km	6	7	13
> 4.0 km	4	2	6
Total	47	109	156

Folgende Merkmale wurden erfasst (Tabelle 2):

- Bei den Unfallmerkmalen die Zahl der Verunfallten in der 5-Jahresperiode von 1995-1999
- bei den Anlage- und Ausrüstungsmerkmalen das Lichtraumprofil (d. h. die befahrbare Höhe und Breite), die Fahrstreifenbreite, Höhe und Breite des Banketts, die Kurvigkeit (Summe der Winkeländerungen über die Tunnellänge), die Längsneigung, die Röhrigkeit, (1 oder 2 Röhren) sowie die Länge des Tunnels
- bei den Merkmalen des Betriebs wurden Daten gesammelt zur Verkehrsmenge als durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV), zum Anteil Schwerverkehr, zur vorgeschriebenen Geschwindigkeit sowie zur Beleuchtungsichte (Einfahrt und Durchfahrt).

Fahrverhaltensvariablen wurden keine erhoben, weil es enorm aufwändig und dementsprechend teuer wäre, hieraus einen Zusammenhang mit dem Unfallgeschehen herzuleiten.

Tabelle 2:

Erfasste Merkmale der Unfallereignisse, der Tunnelinfrastruktur und des Tunnelbetriebs

Unfallereignisse	Anlage/Ausrüstung	Betrieb
<ul style="list-style-type: none"> • Verunfallte 	<ul style="list-style-type: none"> • Lichtraumprofil • Fahrstreifenbreite • Bankett • Kurvigkeit • Längsneigung • Anzahl Röhren • Länge 	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsmenge (DTV) • Anteil Schwerverkehr • sign. Geschwindigkeit • Beleuchtungsichte

Analysemethode

Das Ziel der Untersuchung war, Merkmale der Tunnelinfrastruktur in Zusammenhang mit den Unfallereignissen zu stellen, um hieraus unfallrelevante Verhaltensweisen zu erschliessen.

In einem ersten Schritt wurde untersucht, welche Merkmale einen Zusammenhang mit dem Verunfalltengeschehen aufweisen. Das geschah mit relativ einfachen bivariaten Korrelationsberechnungen oder anderen geeigneten Verfahren, um 2-er Beziehungen zwischen abhängiger und unabhängigen Variablen darzustellen (auf die detaillierten Ergebnisse wird im Folgenden nicht eingegangen). Hierbei wurde festgestellt, dass sich zwischen der Zahl der Tunnelröhren und den Verunfallten kein eindeutiger Zusammenhang ergab, obwohl es aus Österreich und Deutschland Untersuchungen gibt, die solche Zusammenhänge aufzeigen, mal in der einen, mal in der anderen Richtung.

In der Schweiz wurden betreffend die Röhrigkeit folgende Kennwerte gefunden (Tabelle 3):

- Die mittlere Zahl der jährlich Verunfallten ist in Tunnels mit 2 Röhren (ohne Gegenverkehr) höher als in 1-röhrigen Anlagen (mit Gegenverkehr)
- es zeigt sich aber, dass Anlagen mit 2 Röhren mehr Verkehr aufweisen (DTV), d. h., die höhere Verunfalltenzahl könnte auch ein reiner Expositionseffekt sein
- hingegen sind Tunnels mit nur 1 Röhre im Mittel einiges länger als Tunnels mit 2 Röhren; das dürfte ein systematischer Effekt sein, weil längere Tunnels wohl primär aus Kostengründen mit nur 1 Röhre gebaut werden
- wenn das Risiko zu verunfallen expositionsbezogen dargestellt wird, so zeigt sich beim Bezug auf die Verkehrsmenge, dass 2-röhrige Anlagen plötzlich sicherer sind als 1-röhrige Tunnels
- beim Bezug auf die Tunnellänge hingegen erweisen sich die 2-röhrigen Anlagen wiederum als sehr viel unsicherer als Anlagen mit nur 1 Röhre
- und wenn schliesslich beide Masse berücksichtigt werden (d. h. Verkehrsmenge und Tunnellänge), was wohl das beste ist, so erweisen sich 2-röhrige Anlagen etwa 20% sicherer als 1-röhrige Tunnels. Das dürfte auch am ehesten unserer Intuition entsprechen.

Tabelle 3:

Tunnelkennwerte (Mittelwerte)

Merkmale	1-röhrig	2-röhrig
Verunfallte	1.13	1.76
Verkehrsmenge (DTV)	9'200	29'500
Länge in km	1.480	0.920
Verunfallte pro 10'000 Fahrzeuge	1.23	0.59
Verunfallte pro 1 km Länge	0.76	1.91
Verunfallte pro 100 Mio Fahrzeugkilometer	22.7	17.8

Am Beispiel der Röhrigkeit konnte gezeigt werden, dass systematische Effekte vorliegen, die sich unterschiedlich auswirken. Das kann auch bei anderen Tunnelmerkmalen der Fall sein, weshalb kreuztabellarische Auswertungen von abhängiger mit unabhängigen Variablen nicht ausreichen, um die verschiedenen Einflüsse von Tunnelmerkmalen voneinander trennen zu können.

Für die Analyse solcher Problematiken ist die Regressionsrechnung geeignet, bei der die Einflüsse verschiedener Merkmale gleichzeitig geprüft werden. Im vorliegenden Fall konnte die Poisson-Regression verwendet werden, weil mit der Verkehrsmenge Expositionsdaten vorlagen.

Die Regressionsgleichung hat folgende Form, wobei die erwartete Zahl der Unfälle aus einer Linearkombination der verschiedenen Einflussfaktoren berechnet wird:

$$\log \lambda = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k ,$$

wobei: λ = erwartete Zahl der Unfallereignisse
 α = Konstante
 β = Koeffizienten
 x = Einflussfaktoren

In der Folge wurde versucht, mit den Merkmalen der Tunnelinfrastruktur ein Modell zu entwickeln, mit dem die beobachtete Zahl der Unfälle möglichst präzise vorhergesagt werden kann.

Resultate

Das Modell zur Vorhersage der Verunfalltenzahl hat folgendes Aussehen:

$$\text{Mittlere Anzahl Verunfallte} = \exp [-15.6377 + (1.73 * \text{Verkehrsmenge}_{in}) + (- 1.00 * \text{Anzahl Röhren}) + (0.18 * \text{Länge in km}) + (- 0.01 * \text{Kurvigkeit}_{kat}]$$

Aus Tabelle 4 geht hervor, welchen Einfluss die verschiedenen Merkmale auf die Häufigkeit von Verunfallten haben. Hierbei gilt:

- Ein Relatives Risiko > 1 steht für einen unfallerhöhenden Effekt bei zunehmender Ausprägung des Merkmals, ein Wert unter 1 bedeutet sinkende Unfallwahrscheinlichkeit bei zunehmender Ausprägung des Merkmals
- wenn das Konfidenzintervall (CI) den Wert 1 (der für das neutrale Risiko steht) nicht einschliesst, ist der Einfluss des Faktors signifikant.

Es sind lediglich 4 Merkmale, mit denen sich die Zahl der Verunfallten in Tunnels vorhersagen lässt, nämlich die Verkehrsmenge, die Anzahl Röhren, die Länge sowie die Kurvigkeit.

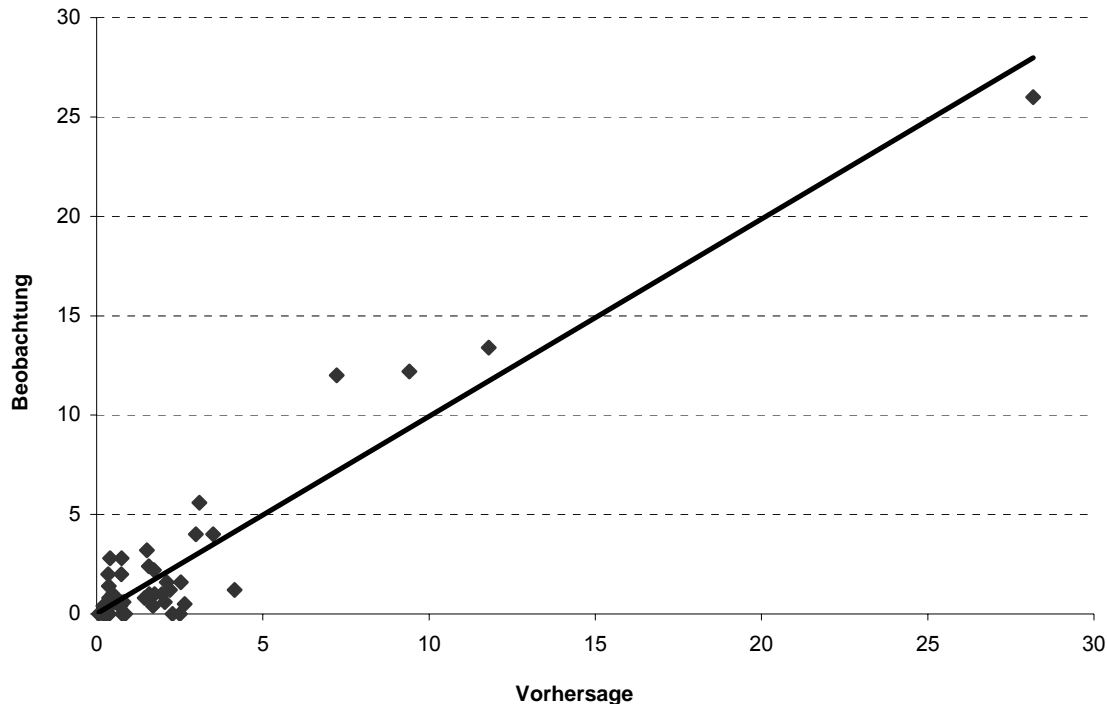
- Einen sehr starken Einfluss übt die Verkehrsmenge aus: Eine Zunahme des Verkehrs um den Faktor e, also um den Faktor 2.7, führt zu einer Zunahme der Verunfallten um den Faktor 5.66, d.h. die Zunahme ist stark überproportional.
- ebenfalls sehr bedeutsam ist die Anzahl der Röhren; der Wert von 0.37 für das Relative Risiko bedeutet, dass 2-röhrige Anlagen gegenüber den 1-röhrigen ein um 63% reduziertes Risiko aufweisen. Anlagen ohne Gegenverkehr sind also sehr viel sicherer als solche mit Gegenverkehr.
- die Tunnellänge wirkt sich so aus, dass pro 1 km Längenzunahme das Verunfalltenrisiko um 20% ansteigt.
- und schliesslich gehört auch die Kurvigkeit zum Modell, obwohl diese keinen signifikanten Einfluss hat; dieses Merkmal verbessert jedoch die Vorhersage und somit die Modellqualität.

Tabelle 4:
Prädiktoren für Verunfalltenhäufigkeit in Tunnels

Merkmal	Relatives Risiko (RR)	95%-CI
Verkehrsmenge ln (DTV)	5.66	3.67 – 8.76
Anzahl Röhren:		
1 Röhre	1	
2 Röhren	0.37	0.17 – 0.81
Länge in km	1.20	1.14 – 1.25
Kurvigkeit (kategorisiert)	0.99	0.48 – 2.05

Mit den durch das Modell vorhergesagten Werten lassen sich 90% der Varianz der tatsächlich beobachteten Zahl an Verunfallten erklären. Das Modell ist somit sehr präzise in seiner Vorhersage, was sich mittels Abbildung 1 veranschaulichen lässt. In dieser Grafik sind die vorhergesagten Werte den tatsächlich beobachteten Werten gegenübergestellt; die Trendgerade verdeutlicht den engen Zusammenhang.

Abbildung 1:
Trendgerade für beobachtete und vorhergesagte Werte für die Zahl der Verunfallten



Schlussfolgerungen

Was lässt sich nun aus diesen Resultaten schliessen?

Auf den ersten Blick ist es vielleicht enttäuschend, dass praktisch keine Merkmale im Modell enthalten sind, die man direkt mit dem Verhalten in Zusammenhang bringen kann. Natürlich kann man auch von der Länge und von der Verkehrsmenge auf Verhalten schliessen, diese Merkmale enthalten aber eine grosse Komponente Exposition, d. h. die Erhöhung der Wahrscheinlichkeit zu verunfallen ist zu einem grossen Teil auf die steigende Kollisionswahrscheinlichkeit allein durch die Zunahme der Verkehrsmenge oder der Fahrdistanz zurückzuführen. Es scheint also, dass die Exposition eine doch relativ bedeutende Rolle für das Unfallgeschehen in Tunneln spielt, was eigentlich auch nicht so sehr verwundert.

In diesem Zusammenhang ist auch zu bedenken, dass es so viele Verhaltenseinflüsse im Tunnel gar nicht geben kann, weil die Freiheitsgrade im Fahrverhalten ziemlich eingeschränkt sind: Es gibt keine Kreuzungen mit Querverkehr, oder in Anlagen mit Gegenverkehr gibt es kein Überholen, es gibt keine Fussgänger und Radfahrer usw. Zudem dürften die Tunnelanlagen in der Schweiz ein ziemlich homogenes Kollektiv darstellen, die sich in ihren Merkmalen nicht derart stark unterscheiden, dass sich bereits kleinste Unterschiede in gewissen Merkmalen unfallrelevant auswirken.

Allerdings ist zu vermuten, dass sich via die erwähnten Merkmale wie Länge, Anzahl Röhren und Verkehrsmenge ein Teil des Fahrverhaltens manifestiert. So kann man davon ausgehen, dass sich mit zunehmender Tunnellänge Einflüsse wie etwa Monotonie oder Angst auswirken, nämlich z. B. in zunehmender Unaufmerksamkeit oder verlängerter Reaktionszeit.

Es gibt genügend Hinweise – zwar nicht unbedingt aus dieser Studie – wie Tunneln gebaut und ausgerüstet werden müssen, damit das Fahrverhalten positiv beeinflusst wird. Dieses Wissen müsste zu den Tunnelplanern und –betreibern gebracht werden, wenn es dort nicht

schon vorhanden ist. Und schliesslich gibt es sicher auch genügend Hinweise, wie man das Fahrverhalten im Tunnel den Gegebenheiten und der Tunnelinfrastruktur anpasst, um sicher zu fahren; somit müsste das sichere Verhalten auch vermehrt in der Fahrausbildung vermittelt werden.