



Ergebnisse einer Wirtschaftlichkeits- und Folgekostenuntersuchung zum Einsatz von Brandschutzplatten bei Tunnelbauwerken

Results of a Feasibility and Resultant Cost Study for Applying Fire Protection Boards in Tunnel Structures

- Leucker, Roland, Prof. Dr.-Ing., Geschäftsführer, STUVA e. V., Köln (D)
- von Stieglitz, Christian, Dipl.-Ing., Leiter Projektmanagement Brandschutz International, Aestuver, James Hardie Europe GmbH, Düsseldorf (D)
- Gielnik, Bernd, Dipl.-Ing., Aestuver, James Hardie Europe GmbH, Düsseldorf (D)

Brände in Tunneln können zu großen Schäden am Bauwerk führen, sodass die Tunnel für Sanierungsarbeiten teilweise über mehrere Monate gesperrt werden müssen. Die Sperrung führt dabei stets zu weiteren, oftmals erheblichen negativen Auswirkungen, da Tunnel in der Regel eine besondere Rolle für die umliegende Verkehrsinfrastruktur haben (Nadelöhr). So werden Ausweichstrecken mit nicht dafür vorgesehenem Verkehr überlastet und die Erreichbarkeit von Standorten oder ganzen Regionen eingeschränkt.

Um die Folgen von Brandereignissen zu reduzieren, werden in der Praxis auch Brandschutzplatten auf der Innenschale angeordnet, um letztere vor hohen Temperaturen zu schützen. In der hier vorgestellten Untersuchung werden nicht nur die Investitions- und Folgekosten von Brandschutzplatten betrachtet, sondern auch der dadurch erzielbare Nutzen ermittelt. Für einen Beispieeltunnel wird gezeigt, dass die Anordnung von Brandschutzplatten eine wirtschaftlich vorteilhafte Alternative sein kann.

1 Aufgabenstellung und Ziel der Untersuchung

Brandereignisse in Tunneln können nicht gänzlich verhindert werden. Deshalb werden in der Praxis verschiedene Lösungsansätze für den baulichen und anlagentechnischen Brandschutz verfolgt. Eine mögliche bauliche Schutzmaßnahme für die Innenschale eines Tunnels ist die Anordnung von Brandschutzplatten auf der Oberfläche des Betons, um diesen vor hohen Temperaturen zu schützen. Der Einsatz solcher Brandschutzplatten wird jedoch vielfach nicht in Betracht gezogen, da die Initial- und Folgekosten als zu hoch angesehen werden. Hinzu kommt, dass die Wahrscheinlichkeit eines größeren Brandes in Straßentunneln als sehr gering eingeschätzt wird und deshalb ein hohes Schadensausmaß in Kauf genommen wird.

Bei einer Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Brandschutzplatten werden bei konventionellen Rechnungen vor allem die Initial- und Folgekosten betrachtet, nicht aber die durch Brandschutzplatten vermeidbaren Ausfallzeiten und Kosten, die durch einen Brandfall entstehen. Ziel der hier vorgestellten Untersuchung ist es, auch diese Parameter in der Berechnung zu berücksichtigen.

2 Fallbeispiele Tunnelbrände

In den vergangenen Jahren kam es auch im deutschsprachigem Raum immer wieder zu Fahrzeugbränden in Tunneln. Beispiele dafür sind zwei Brände im „Gleinalmtunnel“, ein Brand im „Tunnel Königshainer Berge“ und einer im „Elbtunnel“.

Im österreichischen Gleinalmtunnel kam es im August 2016 zu einem Brand eines Kleinbusses, der zu größeren Schäden an der Tunnelinnenschale führte (Abbildung 1). Insgesamt musste der Tunnel für die Sanierung für einen Monat vollständig gesperrt werden. Die Gesamtkosten betragen ca. 4,5Mio.€, wobei Kosten für die bauliche Sanierung nur 0,5Mio.€ und die entgangenen Mautentnahmen 3,5 Mio. € ausmachten. Laut Medienberichten sind der Transportwirtschaft zusätzliche Kosten in Höhe von schätzungsweise 2,5Mio.€ entstanden.



Abbildung 1: Schädigung der Tunneldecke des Gleinalmtunnels nach dem Brand eines Kleinbusses in 2016 [4] (Damage to the tunnel ceiling of the Gleinalmtunnel after the fire of a minibus in 2016)

Im Oktober 2018 geriet im gleichen Tunnel ein ca. 80 t schwerer Autokran in Brand bei dem es infolge der hohen Temperaturen zu großflächigen Betonabplatzungen kam (Abbildung 2, [5]). Die Sperrung des Tunnels für die Sanierung dauerte mit etwa zwei Monaten doppelt so lange wie beim ersten Brand und dürfte deshalb zu einem Mautverlust von etwa 7Mio.€ geführt haben [6]. Die Kosten für die Sanierung des Tunnels wurden seitens des Betreibers auf 2,7 bis 3 Mio. € geschätzt.



Abbildung 2: Großflächige Betonabplatzungen bis hinter die Bewehrung nach dem Brand eines Autokrans im Gleinalmtunnel in 2018 [7] (Large-scale concrete spalling up to behind the reinforcement after the fire of a mobile crane in the Gleinalm tunnel in 2018)

In Deutschland fand im Mai 2013 im Tunnel „Königshainer Berge“ ein Lkw aufgrund eines heiß gelaufenen Radlagers in der südlichen Röhre Feuer. Wegen der Brandschäden (Abbildung 3) musste der Tunnel für die Sanierungsarbeiten fünf Monate vollständig gesperrt werden. In dieser Zeit kam es auf den Ausweichstrecken durch die hohe Verkehrsbelastung in Stoßzeiten zu kilometerlangen Staus und zu hohen Folgekosten für die Sanierung der nicht für den Schwerlastverkehr ausgelegten Straßen in Höhe von ca. 6 Mio. € [9]. Die Kosten für die Instandsetzung des Tunnels beliefen sich insgesamt auf nur ca. 2,2 Mio. € [8].



Abbildung 3: Brand eines Lkw im Tunnel Königshainer Berge in 2013 [10] (Fire of a truck in the tunnel Königshainer Berge in 2013)

Im vierröhriigen Hamburger Elbtunnel kam es 2018 zum Brand eines mit Propangasflaschen beladenen Wartungsfahrzeug, bei dem dieses vollständig ausbrannte (Abbildung 4). Infolge des Brandes wurden sowohl die an der Tunnelwand als auch an der Tunneldecke installierten

Brandschutzplatten beschädigt. Die Sperrzeit zum Austausch der beschädigten Brandschutzplatten in der durch den Brand betroffenen Röhre betrug ca. 1,5 Tage.



Abbildung 4: Ausgebranntes Wartungsfahrzeug im Elbtunnel in 2018 [11] (Burnt-out maintenance vehicle in the Elbe Tunnel in 2018)

Über die zuvor aufgeführten Einzelereignisse hinaus zeigt die durch den österreichischen Fernstraßenbetreiber ASFINAG veröffentlichte Tunnelbrandstatistik 2006 bis 2012, dass es in österreichischen Autobahn- und Schnellstraßentunneln im Schnitt zu 6,5 Bränden auf eine Milliarde in Tunneln zurückgelegter Fahrzeugkilometer kommt. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit für Lkw-Brände ($\geq 3,5t$) mit 25 Bränden pro eine Milliarde zurückgelegter Tunnel-Kilometer deutlich höher als bei Pkw (4,2). Statistisch gesehen kommt es also alle 40 Mio. in einem Tunnel zurückgelegten Fahrkilometer zu einem Lkw-Brand [1].

3 Anwendung und Eigenschaften von Brandschutzplatten

Brandschutzplatten werden in Tunneln in erster Linie zum Schutz des Konstruktionsbetons vor Wärmeeinwirkung eingesetzt. Denn bei starker Wärmeeinwirkung auf den Beton – bei insbesondere sehr schnellem Temperaturanstieg auf über 1.000°C – finden in diesem Entwässerungs- und Verdampfungsprozesse statt, wodurch meist wenige Zentimeter unterhalb der Oberfläche des Betons ein hoher Dampfdruck entsteht, durch den es zu Betonabplatzungen kommt. Dadurch wird die Bewehrung erhöhten Temperaturen ausgesetzt und verliert (oberhalb von 300°C) sukzessive an Festigkeit.

Brandschutzplatten bilden eine Möglichkeit, die Temperatur der Betonoberfläche sowie die des im Beton befindlichen Stahls im Brandfall unterhalb kritischer Werte zu halten. Die Plattenwerkstoffe halten den hohen Temperaturen (i.d.R. mindestens bis 1.350°C) stand und reduzieren damit ganz maßgeblich den schnellen Wärmeeintrag in den Beton und verhindern damit seine Schädigung. Damit müssen nach einem Brand normalerweise zwar die betroffenen Brandschutzplatten ausgetauscht werden, der Beton muss jedoch nicht instandgesetzt werden.

Hinsichtlich der Nutzungsdauer von Brandschutzplatten nennt beispielsweise der europäische Verwendbarkeitsnachweis ETA-17/0170 für die Brandschutzplatte „AESTUVER Tx“ einen Wert von mindestens 25 Jahren [16]. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass wie bei (Leicht-) Beton

üblich, wesentlich längere Nutzungsdauern wahrscheinlich sind. Insofern erscheint die vom Hersteller angegebene Lebensdauer von 30 Jahren realistisch.

4 Berechnungsmodell für Lebenszykluskostenanalyse

Entscheidungen für mögliche Varianten bei Bauvorhaben sollten grundsätzlich nicht nur auf Basis der Baukosten gefällt werden, sondern auch die Kosten berücksichtigen, die während der – bei Tunneln normalerweise sehr langen – Nutzungsphase entstehen. Gemäß einer Empfehlung des DAUB soll eine Investitionsentscheidung deshalb auf Basis einer Lebenszykluskostenanalyse erfolgen [12]. Eine solche Analyse berücksichtigt neben den Initialkosten (Herstellung), auch die Folgekosten (Betrieb, Instandhaltung und Instandsetzung). In der Berechnung wird demnach sowohl die Nutzungsdauer einzelner Komponenten und deren Austausch berücksichtigt als auch der Kalkulationszinssatz, mit dem die Beträge auf- oder abgezinst werden.

Da der aktuelle Leitzins (Mitte 2019) von der Europäischen Zentralbank schon seit März 2016 auf dem Rekordtief von 0,0 % gehalten wird und die zukünftige Entwicklung schwer abzuschätzen ist, werden im hier drei Kalkulationszinssätze angenommen: 0,0 %, 1,7 % und 3,0 % p. a. Der Zinssatz von 1,7 % wird im Bundesverkehrswegeplan 2030 [13] als anzunehmender Realzinssatz für Berechnungen von Lebenszykluskosten genannt. Die Zinssätze 0,0 % und 3,0 % zeigen, wie sich eine Veränderung dieses mittleren Zinssatzes auf das Ergebnis auswirkt.

In langen Betrachtungszeiträumen, wie vorliegend von 100 Jahren, hat auch die Inflationsrate einen Einfluss auf die preisliche Entwicklung. Bei einer gleichmäßigen Änderung aller betrachteten Preise muss sie jedoch nicht berücksichtigt werden, da sich eine einheitliche Preisniveauänderung für alle Zahlungsgrößen einstellt. Hinzu kommt, dass die Unsicherheiten durch eine Abschätzung der Inflationsrate größer sind als der zu erwartende Genauigkeitserfolg [14]. Daher wird in der vorliegenden Untersuchung der „Ist-Wert-Ansatz“ verwendet und auf eine Berücksichtigung der Inflation verzichtet.

Die unterschiedlichen Nutzungsdauern (bzw. Re-Investitionsintervalle) verschiedener Bauteile werden bei der Berechnung der Lebenszykluskosten über den Annuitätenfaktor a_f berücksichtigt. Dabei wird der Zinssatz i und die Nutzungsdauer n wie folgt berücksichtigt:

$$a_f = \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}$$

Mit dem Kalkulationszinssatz ($i=1,7\%$) und der Nutzungsdauer der Brandschutzplatten ($n=30$ Jahre) errechnet sich beispielsweise der Annuitätenfaktor für die Beschaffung und Installation von Brandschutzplatten zu $a_f=0,043$. Der Mehraufwand für die Wartung, der ein kürzeres Intervall von 6 Jahren zugrunde gelegt wird, führt zu einem Annuitätenfaktor von $a_f=0,177$. Die Investitionskosten der verschiedenen Bauteile werden mit dem jeweiligen Annuitätenfaktor multipliziert, um die jährlichen Baulastkosten zu ermitteln.

Aus den (gesamten) jährlichen Baulastkosten lässt sich anschließend durch die Multiplikation mit dem Barwertfaktor $b_f = 1/a_f$ für eine beliebige Nutzdauer n der Barwert aller in diesem Zeitraum anzurechnenden Kosten errechnen. Mit dem Kalkulationszinssatz $i=1,7\%$ und einer Nutzungsdauer von 100 Jahren berechnet sich der Barwertfaktor beispielsweise zu $b_f=47,923$.

Im vorliegenden Beitrag steht ausschließlich die Wirtschaftlichkeit von Brandschutzplatten im Fokus. Daher haben bei einem direkten Vergleich zwischen einem Tunnel *mit* und einem Tunnel *ohne* Brandschutzplatten die übrigen Herstellungskosten des Tunnels eine untergeordnete Bedeutung und werden in der folgenden Betrachtung nicht berücksichtigt. Auch die Folgekosten für den Tunnelunterhalt unterscheiden sich bei den beiden Varianten nur marginal. Lediglich der Mehraufwand, der sich bei Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten der Brandschutzplatten ergibt,



muss monetär berücksichtigt werden, da hier die Platten für die Bauwerksprüfung möglicherweise abgenommen und anschließend wieder montiert werden müssen.

5 Schadensszenario und Berechnungsparameter

Die für die Berechnung erforderlichen Berechnungsparameter, die im Folgenden erläutert werden, sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

5.1 Schadensszenario

Als Beispiel für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird ein Gegenverkehrstunnel mit einem Kreisquerschnitt RQ 10,5T und einer Länge von 1.000 Metern betrachtet. Je nach Bauweise des Tunnels (z.B. kreisförmig oder rechteckförmig, mit oder ohne Rauchabzug) beträgt der im Querschnitt zu schützende Umfang zwischen ca. 12m und 19m. Im Rechenbeispiel wird 16,5m angenommen. Der durchschnittliche tägliche Verkehr wurde wie beim Gleinalmtunnel (vgl. Kapitel 2) zu 24.900 Kraftfahrzeugen pro Tag angenommen [2]. Davon hatten 3.700 eine zulässige Gesamtmasse über 3,5t. Am Tag werden somit in dem 1km langen Beispieeltunnel 3.700km von Lkw zurückgelegt; in einem Jahr sind es insgesamt 1.350.500km. Gemäß der Tunnelbrandstatistik der ASFINAG, nach der es durchschnittlich zu 25 Bränden pro 1Mrd. Lkw-km kommt (vgl. Kapitel 2), müsste es in dem betrachteten Beispieeltunnel statistisch etwa alle 30 Jahre zu einem Lkw-Brand kommen. Deshalb wurde angenommen, dass es in der Lebensdauer des Tunnels zu mindestens einem Brand kommt, und dass dieser im ersten Jahr der Betrachtung auftritt. Es wurde ferner unterstellt, dass es sich bei dem Brand um zwei brennende Lkw handelt, die direkt hintereinanderstehen. Infolge dessen entsteht über eine Länge von 80m an 70 % der Oberfläche der Stahlbetoninnenschale ein Schaden der Kategorie 4 (siehe Kapitel 5.3).

5.2 Installationskosten für Brandschutzplatten

Die Lebenszykluskosten der Brandschutzplatten werden hier vereinfachend auf eine Lebensdauer des Tunnels von 100 Jahren betrachtet. Im vorliegenden Beispiel werden für Beschaffung und Entsorgung der Brandschutzplatten (AESTUVER AeTx 30mm dick auf AeT 10mm dicken Hinterlegestreifen mit i. M. 7,4 Befestigungsmitteln je Quadratmeter) 72€/m² sowie für die Installation der Platten 70€/m² angenommen.

Der Mehraufwand für die Wartung des Tunnels wurde auf Basis von Experteninterviews monetär mit 1,5€/m² pro Wartungsintervall bewertet, da die Platten bei einer Hauptprüfung des Tunnels nach DIN 1076 (alle 6 Jahre) stichprobenartig entfernt werden müssen, um die Tunnelinnenschale handnah zu prüfen. Da nicht jede Platte für die Prüfungen entfernt werden muss, wird der Preis pro Quadratmeter niedriger als die Installationskosten angesetzt.

5.3 Instandsetzungskosten

Der Nutzen von Brandschutzplatten besteht in erster Linie aus der Vermeidung von Bauwerksschäden infolge eines Brandes. Daher ist die Betrachtung der potentiellen Wiederherstellungskosten einer geschädigten Innenfläche *mit* und *ohne* Einsatz von Brandschutzplatten notwendig. Für die hier durchgeführten Berechnungen wurden Daten genutzt, die in dem vom Bundesministerium für Bildung



und Forschung (BMBF) geförderten Projekt „Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen“ (SKRIBT [15]) erarbeitet wurden. Zur Beurteilung von Brandschäden wurden dort fünf Schadensstufen definiert (Tabelle 1). Die Schadensstufen 1 bis 3 umfassen vereinzelte bis großflächige Abplatzungen mit Tiefen von 5 bis 50 mm. Schadensstufe 4 ist als großflächige Abplatzung mit freigelegter Bewehrung definiert und bei Schadensstufe 5 kommt es zu großflächigen Abplatzungen bis über die Querschnittsmitte hinaus.

Gemäß dem Schadensszenario wird bei einem Tunnel *ohne* Brandschutzplatten die Schadensstufe 4 angenommen. Für einen Tunnel *mit* Brandschutzplatten werden die in Kapitel 5.2 genannten Kosten verwendet.

Schadensstufe	Hauptpositionen	Flächenabhängige Kosten €/m ²	Fixkosten €
1	Säubern, Spachteln	20	5.000
2	Säubern, Hochdruckstrahlen, Spachteln	70	20.000
3	Säubern, Hochdruckstrahlen, Stemmarbeiten, Spritzbetonsanierung	120	25.000
4	Säubern, Hochdruckstrahlen, Stemmarbeiten, Bewehren, Spritzbetonsanierung, Fugensanierung	230	70.000
5	Abbruch, Bewehren, Schalen, Betonieren	360	80.000

Tabelle 1: Kalkulatorische Kostenansätze für Wiederherstellungskosten [15] (Calculatory cost estimates for recovery costs)

5.4 Zeitbedarf für die Sanierung der Schäden

Für die Sanierung von Schäden an einer Tunnelinnenschale infolge eines Brandes ist normalerweise die Sperrung des Tunnels (bzw. der Tunnelröhre) erforderlich. Als Anhaltspunkt für die Dauer der Sperrung eines Tunnels *ohne* Brandschutzplatten werden die im Projekt SKRIBT genannten Werte um ein Drittel gekürzt, weil sich gezeigt hat, dass die Dauer der Sanierung bei zurückliegenden Tunnelbränden trotz eines hohen Schadens oft kürzer war. Bei der angenommenen Schadensstufe 4 bleibt der Tunnel *ohne* Brandschutzplatten etwa 7,3 Monate für die Sanierung gesperrt. Die Dauer der Sperrung nach einem Brandereignis in Tunneln *mit* Brandschutzplatten wurde aus Erfahrungswerten von Herstellern und Betreibern zu 1,5 Monaten festgelegt und umfasst die Demontage der beschädigten und die Montage der neuen Platten.

Die gesamte Sperrzeit zwischen Brand und Wiedereröffnung ist bei Tunneln *mit* gegenüber Tunneln *ohne* Brandschutzplatten normalerweise nochmals kürzer, da die Zeiten für Planung und Ausschreibung kürzer sind.



5.5 Verkehrssicherungs- und Umleitungskosten

Die für die Sanierung eines Brandschadens nötige Sperrung des Tunnels erfordert eine lokale Verkehrssicherung in der direkten Umgebung des Tunnels. Die in Anlehnung an das Projekt SKRIBT gewählten Kostenansätze sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Zur Abschätzung der Umleitungskosten wird der aus der Umleitung resultierende Mehraufwand der Verkehrsteilnehmer (erhöhter Zeitaufwand, längere Fahrstrecke) in die Berechnung einbezogen. Dabei wird die Anzahl der Kraftfahrzeuge unter/über 3,5t unterschieden sowie die zusätzliche Reisezeit aus der durchschnittlichen Geschwindigkeit auf der Umleitungsstrecke nebst einer möglichen Staudauer berücksichtigt. Die in Anlehnung an das Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030 [14] gewählten die Vorhaltungs- und Betriebskosten von Pkw für geschäftlich und privat veranlasste Fahrten sowie die Kosten für Lkw sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die in der Tabelle ebenfalls genannte durchschnittliche Geschwindigkeit ohne Stau wurde verhältnismäßig hoch angesetzt, was sich positiv auf die Zeit zum Zurücklegen der Umleitungsstrecke auswirkt und somit zu geringeren Kosten führt.

Das Methodenhandbuch [14] gibt für die zeitabhängigen Kosten Werte an, die auf Basis einer Zahlungsbereitschaftsanalyse ermittelt wurden und von der zurückzulegenden Strecke sowie vom Besetzungsgrad des Fahrzeugs abhängen. Vereinfachend wurde in der durchgeführten Untersuchung angenommen, dass Pkw mit nur einer Person besetzt sind und für diese Person der gesetzliche Mindestlohn (2018) von 8,84€ pro Stunde zu berechnen ist. Für in der Regel gewerblich genutzte Lkw (über 3,5t) wurde der Stundensatz für den Fahrer zu 20€ festgelegt.

Die Länge des Umwegs orientiert sich an der Umleitungsstrecke für den Gleinalmtunnel und wurde auf 28km festgelegt. Durch das von einer Autobahn auf Bundes-/Landstraßen verlagerte Verkehrsaufkommen kann es insbesondere in Stoßzeiten zu Stau kommen. Daher wird angenommen, dass 50% der Verkehrsteilnehmer 30 Minuten im Stau stehen.

5.6 Entgangene Maut

Für das Beispiel wurde – wie beim Gleinalmtunnel – eine Sondermaut von 9€ pro Kraftfahrzeug angenommen [3]. Da Tunnel häufig von Fahrzeugen aus der direkten Umgebung des Tunnels genutzt werden, haben die Fahrzeugbesitzer meist Jahreskarten, die im Verhältnis zu einer Einzelfahrt erheblich günstiger sind. Aus diesem Grund werden über die Dauer der Sperrung nur 50% der entgangenen Maut berechnet. Zum Vergleich: In Deutschland kostet beispielsweise die Durchfahrt durch den Warnowtunnel in Rostock für einen Pkw 3,8€ und einen Lkw 16,5€.

5.7 Nicht berücksichtigte Einflussparameter

Neben den zuvor aufgeführten Parametern gibt es weitere Kostenfaktoren, deren monetärer Wert sich jedoch nicht oder nur mit einem erheblichen Aufwand bestimmen lässt. Deshalb wurden in der vorliegenden Untersuchung folgende Einflüsse an den Umleitungsstrecken nicht berücksichtigt: die zusätzlichen Lärmbelastungen und Abgasemissionen, die zusätzlich ausgestoßenen CO₂-Mengen, die Schädigungen der Straßen, die erhöhten Unfallkosten infolge des erhöhten Verkehrsaufkommens sowie weitere Kosten, wie sie durch die Sperrung eines Tunnels für angrenzende und auf die Strecke angewiesene Unternehmen entstehen.

Weitere, materialspezifische Einflüsse werden ebenfalls nicht berücksichtigt. So erreicht Konstruktionsbeton, der wieder instandgesetzt wurde, oft nicht die gleiche Qualität, wie der bei der Herstellung einer Tunnelinnenschale in einem Stück gefertigte Beton. Außerdem sind positive Effekte

von Brandschutzplatten, die einen Einfluss auf die Langlebigkeit des Betons haben, nicht berücksichtigt: Beispielsweise können Brandschutzplatten an sich oder durch spezielle Beschichtungen den Innenschalenbeton vor einem Chlorideintrag schützen, wodurch sich die Haltbarkeit des Betons verbessert.

Tunnel		
Länge des Tunnels	1.000	m
Durchmesser des Tunnels	10,50	m
zu schützende Tunneloberfläche	16.500	m ²
Wartungsintervall	6	Jahre
Brandschutzplatten		
Beschaffung und Entsorgung	72	€/m ²
Kosten (Installation)	70	€/m ²
Mehraufwand Wartung	1,5	€/m ²
Fixkosten (Baustelleneinrichtung)	5.000	€
Nutzungsdauer	30	Jahre
Kalkulationszinssatz		
Kalkulationszinssatz	1,7	%
Schaden am durch Brandereignis		
geschädigte Länge	80	m
prozentuale Schädigung der Oberfläche	70	%
Schadensstufe	4	
Verkehrssicherungskosten		
Fixkosten	103.000	€
Unterhaltung pro Monat	6.500	€
Kraftfahrzeuge ≤ 3,5 t (Pkw)		
Stundensatz für zusätzliche Reisezeit	8,84	€/h
Fahrtkosten	0,30	€/km
Durchschnittliche Geschwindigkeit ohne Stau	80	km/h
Kraftfahrzeuge ≥ 3,5 t (Lkw)		
Stundensatz für zusätzliche Reisezeit	20,00	€/h
Fahrtkosten	0,65	€/km
Durchschnittliche Geschwindigkeit ohne Stau	50	km/h
Umweg und Zeitverlust		
Umweg	28	km
Zeitverlust durch Stau (bei 50 % der Verkehrsteilnehmer)	30	min
Durchschnittlicher täglicher Verkehr		
Kfz gesamt	24.900	Kfz/d
Kfz ≤ 3,5 t	21.200	Kfz/d
Kfz ≥ 3,5 t	3.700	Kfz/d
Entgangene Maut		

Kfz ≤ 3,5 t	9,00 €/Kfz
Kfz ≥ 3,5 t	9,00 €/Kfz
Korrekturbeiwert	0,50

Tabelle 2: Zusammenfassung der Eingangsparameter für die Berechnung der Kosten des Beispieletunnels (Summary of the input parameters for the calculation of the costs of the example tunnel)

6 Ergebnisse

Die Initialkosten für die Installation der Brandschutzplatten betragen insgesamt etwa 2,34 Mio.€. Damit berechnen sich die jährlichen Baulastkosten bei dem gewählten Kalkulationszinssatz von 1,7% zu etwa 105T€. Unter weiterer Berücksichtigung des Mehraufwandes für die Bauwerksprüfung (Wartung) betragen die Lebenszykluskosten über 100 Jahre etwa 5,0 Mio.€. Bei einem Kalkulationszinssatz von 0,0% und 3,0% errechnen sich diese Kosten zu etwa 8,2Mio.€ bzw. 3,9Mio.€ (Abbildung 5). Eine Gegenüberstellung der berechneten Kosten für die Tunnelvarianten *ohne* und *mit* Brandschutzplatten infolge nur *eines* Brandes am Anfang der Nutzungsdauer ist Tabelle 3 zu entnehmen. Die Gesamtkosten, die durch die Brandschutzplatten vermieden werden, betragen rund 88Mio.€ und sind damit etwa 17-mal so hoch wie die Lebenszykluskosten der Brandschutzplatten. Dabei sind die Instandsetzungskosten nach dem Brand und die Verkehrssicherungskosten in beiden Fällen relativ gering. Die Umleitungskosten und der Verlust durch die entgangene Maut machen dagegen den Großteil der Mehrkosten aus.

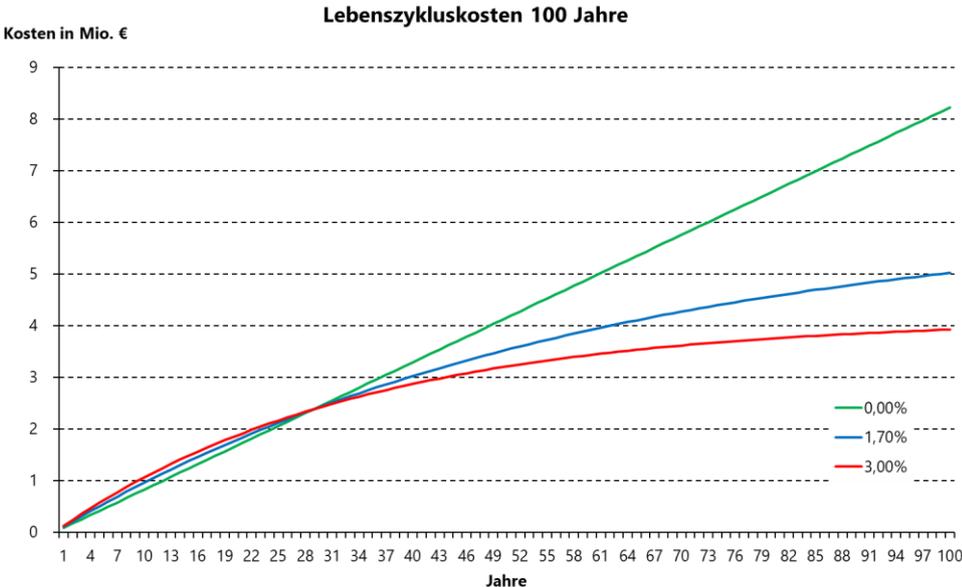


Abbildung 5: Lebenszykluskosten (Initial- und Instandhaltungskosten) von Brandschutzplatten für verschiedene Kalkulationszinssätze (Life cycle costs (initial and maintenance costs) of fire protection boards for different interest rates)



Beim Betreiber des Tunnels werden allein durch die entgangene Maut nach nur *einem* Brandereignis im Tunnel (19,6Mio.€) – wegen der schnelleren Wiedereröffnung – die Lebenszykluskosten der Brandschutzplatten (ca.5Mio.€) mehr als kompensiert. Aus volkswirtschaftlicher Sicht – und damit aus Sicht der Tunnelnutzer – ist die Einsparung infolge nicht entstandener Umleitungskosten bei Installation von Brandschutzplatten – bei nur *einem* Brandereignis – noch größer, sie beträgt rund 73Mio.€. Dabei beträgt die Kostendifferenz für zusätzlich zurückgelegte Kilometer rund 31Mio.€ für Pkw und 12Mio.€ für Lkw, während sich die Kostendifferenz für die zusätzliche Fahrzeit auf etwa 20Mio.€ für Pkw und 10Mio.€ für Lkw belaufen.

Kosten [€]	ohne Brandschutzplatten	mit Brandschutzplatten
Lebenszykluskosten	–	5.016.600
Instandsetzungskosten	282.400	136.200
Verkehrssicherungskosten	150.700	112.800
Umleitungskosten gesamt	91.917.000	18.801.200
davon:		
Fahrtkosten (Pkw)	39.177.600	8.013.600
Fahrtkosten (Lkw)	14.814.800	3.030.300
Zeit für Umweg (Pkw)	14.430.400	2.951.700
Zeit für Umweg (Lkw)	9.116.800	1.864.800
Stauzeit (Pkw)	10.307.400	2.108.300
Stauzeit (Lkw)	4.070.000	832.500
Entgangene Maut	24.651.000	5.042.300
Gesamt	117.001.100	29.109.100

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Kosten infolge eines Brandes in einem Tunnel mit und ohne Brandschutzplatten (Comparison of costs resulting from a fire in a tunnel with and without fire protection boards)

7 Zusammenfassung

Die Ergebnisse für den Beispieltunnel zeigen, dass die Kosten, die aus der Nichtanordnung von Brandschutzplatten resultieren, um ein Vielfaches höher sind, als die Installationskosten. So sind die Verluste bei dem im Beispiel unterstellten Mauttunnel – bei nur einem größeren Brand in 100 Jahren – durch die entgangene Maut bereits viermal so hoch wie die Lebenszykluskosten der Brandschutzplatten im gleichen Zeitraum. Und die Kosten für die zusätzliche Fahrstrecke der umzuleitenden Pkw während der Sperrung für die Sanierung beträgt rund das Sechsfache der Lebenszykluskosten der Brandschutzplatten. Alle relevanten Kosten zusammengenommen führen zu 15- bis 20-mal höheren Schäden im Vergleich zu den Lebenszykluskosten der Brandschutzplatten.



Auch wenn dieses Ergebnis nicht uneingeschränkt auf alle Tunnelbauwerke übertragbar ist, dürften im Allgemeinen die Kosten durch die Installation von Brandschutzplatten im Laufe der Nutzungsdauer wieder eingespart werden, wenn es zu (mindestens) einem größeren Brand während dieser Zeit kommt. Ob es tatsächlich dazu kommt, lässt sich nicht vorhersagen. Die zu diesem Zweck ausgewertete Tunnelbrandstatistik der ASFINAG lässt dies jedoch als sehr wahrscheinlich erscheinen.

Eine Risikoanalyse kann Hinweise geben, ob mit einer erhöhten Brandwahrscheinlichkeit im Tunnel zu rechnen ist. Einen besonderen Einfluss haben diesbezüglich beispielsweise die Lage und Länge des Tunnels, der Anteil des Schwerlastverkehrs sowie das Gefälle vor und im Tunnel. Für Tunnel mit einer hohen Brandwahrscheinlichkeit von Fahrzeugen sind Brandschutzplatten aus wirtschaftlicher Sicht empfehlenswert. Dasselbe gilt für Tunnel, deren Sperrung hohe wirtschaftliche Kosten nach sich ziehen.

8 Literatur

- [1] ASFINAG Tunnelbrandstatistik 2006-2012; ILF beratende Ingenieure, Linz, 2013
- [2] Verkehrsstatistik der ASFINAG 2017; ASFINAG, Linz, 2017
- [3] ASFINAG Streckenmaut Tarife; 12/2018; <https://www.asfinag.at/maut-vignette/streckenmaut/tarife/> [Zugriff 12/2018]
- [4] Kleine Zeitung, 05.08.2016; https://www.kleinezeitung.at/steiermark/5118574/Campingbus-ging-in-Flammen-auf_Brand-im-Gleinalmtunnel-verursachte#image-ad-3. [Zugriff 11/2018]
- [5] Kleine Zeitung; 05.10.2018; https://www.kleinezeitung.at/steiermark/5508433/Kran-brannte-im-Tunnel_Bilder-vom-Grosseinsatz-im-Gleinalmtunnel#image-glein8_1538765679592313. [Zugriff 12/2018]
- [6] Kleine Zeitung; 08.10.2018; https://www.kleinezeitung.at/steiermark/graz/grazumgebung/5509647/Aufwaendige-Sanierung_Nach-Feuer-bleibt-Gleinalmtunnel-zwei-Monate#image-5_1538751955908608. [Zugriff 12/2018]
- [7] Kleine Zeitung; 27.11.2018; https://www.kleinezeitung.at/steiermark/chronik/5536523/Eroeffnung-Mitte-Dezember_49-Millionen-ExtraKilometer-durch#image-FUC_2513_154325379882895. [Zugriff 12/2018]
- [8] LR online; 19.10.2013; https://www.lr-online.de/nachrichten/tunnel-koenigshainer-berge-wieder-frei_aid-2866883. [Zugriff 12/2018]
- [9] MDR; 07.11.2018; <https://www.mdr.de/sachsen/bautzen/goerlitz-weisswasser-zittau/sanierung-autobahn-tunnel-koenigshainer-berge-100.html>. [Zugriff 12/2018]
- [10] Ullmann, R.; 01.09.2015; <https://www.saechsische.de/tunnelbrand-verursacher-vor-gericht-3187221.html> [Zugriff 04/2019]
- [11] Marks, B.; Hannoversche Allgemeine Zeitung; 24.08.2018; <http://www.haz.de/Nachrichten/Der-Norden/Hamburg-Elbtunnel-Roehre-bleibt-nach-Brand-laenger-gesperrt> [Zugriff 04/2019]
- [12] Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel; Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB); Köln; November 2018
- [13] Bundesverkehrswegeplan 2030; Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; Berlin; 2016
- [14] Methodenhandbuch zum Verkehrswegeplan 2030; PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München, 2016
- [15] Wirksamkeitsanalyse von Maßnahmen zum Bauwerksschutz: Tunnel; Öffentliche Fassung des Forschungsberichts zum Verbundprojekt SKRIBT „Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen“, 2013
- [16] Europäische Technische Bewertung ETA-17/0170 „AESTUVER Tx“-Brandschutzplatte vom 28. April 2017, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin