

# **Lebenszykluskostenbetrachtung von Einhausungsbauwerken**

FE 15.495/2010/FRB  
im Auftrag des Bundesministeriums für  
Verkehr, Bau und Stadtentwicklung  
vertreten durch die  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Steinauer  
Dipl.-Ing. Thorsten Becher  
Dipl.-Ing. Andreas Klein

Institut für Straßenwesen Aachen  
RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Baltzer  
Dipl.-Ing. Uwe Zimmermann

BUNG Ingenieure AG

**Kurzbericht**  
Juni 2011

## Kurzbericht

### Problemstellung

Zur Gewährleistung eines ausreichenden Schutzes von Anwohnern vor Emissionen des Straßenverkehrs kann in dicht besiedelten Gebieten die Errichtung von Massivbauwerken zur Abschirmung in Frage kommen. Verfügbare Lösungen sind neben Tunneln geschlossene Einhausungen mit und ohne Verglasungen, offene Einhausungen im Deckenbereich sowie offene Einhausungen im Wandbereich (Galerien). Nach dem gegenwärtigen Stand der Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006) sind diese Bauwerke hinsichtlich der betriebstechnischen Ausstattung wie Tunnel zu behandeln. Hieraus resultieren zum einen teilweise hohe Kosten für Ausstattung und Betrieb, zum anderen sind bei Abweichungen vom RABT-Standard Zustimmungen im Einzelfall erforderlich. Hinsichtlich der Kosten stehen Fragen über die Erfordernis bzw. den Umfang ergänzender Lüftungs- und Beleuchtungsanlagen im Vordergrund, da sie maßgeblich die Kosten über die Nutzungsdauer beeinflussen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die vergleichende Betrachtung von Lebenszykluskosten, die für Einhausungen und Tunnel in offener Bauweise anfallen. Betrachtet werden Einhausungen, deren betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung anhand einer parallelen risikoanalytischen Untersuchung (FE 15.492/2010/FRB) festgelegt wird und nach RABT 2006 ausgestattete Tunnel. Durch eine detaillierte Kostenanalyse werden die Einflüsse der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausstattung – insbesondere von Lüftungs- und Beleuchtungsanlagen – auf die gesamten Kosten für die Bauwerkserhaltung ermittelt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Kostenermittlung werden anhand von Sensitivitätsuntersuchungen Standardisierungskonzepte und Empfehlungen für die Umsetzung in das Regelwerk (RABT) erarbeitet.

### Untersuchungsmethodik

Der Untersuchungsansatz dieser Arbeit sah eine vergleichende Betrachtung der Lebenszykluskosten für die Erhaltung (Erneuerung und Unterhaltung) von Tunneln und verschiedenen Einhausungsarten vor. Hierzu wurde zunächst eine Analyse der Kosten für Bau, Ausstattung und Unterhaltung von realen Tunneln in offener Bauweise und Einhausungen vorgenommen. In einem weiteren Arbeitsschritt wurden daraus mittlere Kostensätze für die einzelnen Gewerke und Ausstattungselemente bestimmt.

Der Vergleich der Lebenszykluskosten erfolgte für die Bauwerkstypen

- offene Einhausung im Deckenbereich,
- offene Einhausung im Wandbereich (Galerie),
- geschlossene Einhausung mit Verglasung im Decken- und/oder Wandbereich sowie
- Tunnel in offener Bauweise als Referenzobjekt.

Anhand der ermittelten Kostensätze wurde der Vergleich an fiktiven Bauwerken mit einer Länge zwischen 100 und 6.000 Metern durchgeführt. Vorab wurde daher zum einen die bauliche Gestaltung (Geometrie), zum anderen die betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung der Bauwerke festgelegt. Diese Festlegung erfolgte in Abstimmung mit dem parallel durchgeführten Forschungsvorhaben „Risikoanalytische Untersuchungen zum Sicherheitsniveau offener Einhausungen“ (FE 15.492/2010/FRB). Ziel dieses Vorhabens war die Ableitung von bau- und betriebs-technischen Mindestanforderungen für die verschiedenen Einhausungsarten, die zur Einhaltung des nach den RABT 2006 geforderten Sicherheitsniveaus vorzusehen sind. Die Schnittstelle beider Forschungsvorhaben lag in der Verwendung einheitlicher Bauwerkstypen und einem nach Risikoanalyse festgelegten Ausstattungsumfang. Das in der parallelen Risikoanalyse für bestimmte bauliche Gestaltungsvarianten ermittelte Sicherheitsniveau ermöglichte den Verzicht auf die Ausstattung seitlich und oben offener Einhausungen mit Lüftungssystemen und Sicherheitseinrichtungen wie z. B. Notausgängen und Sperrschranken. Die betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung der Referenztunnel wurde nach den RABT 2006 festgelegt.

Um Aussagen über die im Verlauf eines Lebenszyklus anfallenden Kosten treffen zu können, bezog der durchgeführte Kostenvergleich sowohl die reinen Baukosten als auch die aufzuwendenden Unterhaltungskosten mit ein. Als Berechnungsmodell wurde hierzu die Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung (ABBV) verwendet, welche über den Ansatz von Nutzungsdauern und pauschalen Kostensätzen für die einzelnen Gewerke die Berechnung von kapitalisierten Erhaltungskosten ermöglichte, die zur dauerhaften Erneuerung und Unterhaltung der Bauwerke aufzuwenden sind. Zum Kostenvergleich wurde zum einen die Differenz der Erhaltungskosten der verschiedenen Einhausungsarten und des jeweiligen Referenztunnels gebildet, welche nach der ABBV den aufzuwendenden Ablösebetrag darstellt. Zum anderen wurde der prozentuale Anteil der Erhal-

tungskosten von Einhausungen an den Erhaltungskosten des Referenztunnels ermittelt.

Basierend auf den ermittelten Kostensätzen und dem Berechnungsmodell der ABBV wurde ein Softwaretool erstellt, das einen Variantenvergleich zwischen den verschiedenen Bauwerkstypen erlaubt und die zu erwartenden Kostendifferenzen ausgibt. Auf dieser Grundlage kann in einer frühen Planungsphase somit der Bauwerkstyp ausgewählt werden, der wirtschaftliche Vorteile erwarten lässt und gleichzeitig ein angemessenes Sicherheitsniveau gewährleistet.

Dieses Bewertungstool wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens zusätzlich zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen eingesetzt, um die Kostenwirksamkeit der Ausführung von Beleuchtungsanlagen zu untersuchen.

Die Ergebnisse der Kostenvergleiche zwischen den Bauwerkstypen und der Sensitivitätsanalyse werden unter Berücksichtigung von (sicherheits-) technischen und wirtschaftlichen Aspekten zur Erarbeitung von Standardisierungskonzepten und Empfehlungen für das Regelwerk verwendet.

### Untersuchungsergebnisse

Als Ergebnis der Vergleichsrechnungen zeigte sich, dass seitlich und oben offene Einhausungen über ihre Lebensdauer insgesamt mit wesentlich geringeren Kosten verbunden sind als Tunnellösungen. Die höchsten Einsparpotentiale ergaben sich bei Bauwerkslängen von über 1.200 m (Gegenverkehr) bzw. über 3.000 m (Richtungsverkehr), da keine Rauchabsaugung über eine Zwischendecke im Brandfall wie in Tunneln angesetzt werden musste.

Länge [m]	geschl. Einhausung	seitl. offene Einhausung	oben offene Einhausung
400	-11 %	-38 %	-33 %
1.200	-18 %	-46 %	-42 %
3.000	-16 %	-45 %	-40 %

Tab. 1: Relative Differenz der kapitalisierten Erhaltungskosten von Einhausungen zum Referenztunnel für ausgewählte Bauwerkslängen (Gegenverkehr)

Für seitlich offene Einhausungen wurden je nach Bauwerkslänge um 35 bis 45 % (Tab. 1 und Tab. 2) geringere Erhaltungskosten ermittelt. Die Kostenvorteile ergaben sich zum größten Teil aus den geringeren Kosten für die Ausstattung der Bauwerke mit Betriebs- und Sicherheitstechnik und der damit verbundenen Unterhaltung, wobei sich insbesondere der Verzicht auf aufwändige Fluchttreppenhäuser auswirkte. Die reduzierte Ausstattung hatte

gleichzeitig auch einen deutlich geringeren Energiebedarf zur Folge, der zu entsprechend niedrigeren Stromkosten führte. Darüber hinaus war die angenommene konstruktive Ausbildung ebenfalls mit geringeren Investitionskosten für den Bau verbunden.

Für oben offene Einhausungen variierte die Kostendifferenz gegenüber Tunneln je nach Betriebsform. Für Gegenverkehrsbauwerke wiesen oben offene Einhausungen um ca. 30 bis 40 % geringere Erhaltungskosten auf, wobei sich der Unterschied zu seitlich offenen Einhausungen aus den im Vergleich höheren Baukosten ergab. Im Fall von Richtungsverkehr wurden bis zu einer Bauwerkslänge von 3.000 m 15 bis 20 % geringere Erhaltungskosten, über 3.000 m bis zu 25 % geringere Erhaltungskosten ermittelt.

Länge [m]	geschl. Einhausung	seitl. offene Einhausung	oben offene Einhausung
400	-11 %	-37 %	-19 %
1.200	-11 %	-37 %	-17 %
3.000	-15 %	-45 %	-25 %

Tab. 2: Relative Differenz der kapitalisierten Erhaltungskosten von Einhausungen zum Referenztunnel für ausgewählte Bauwerkslängen (Richtungsverkehr)

Für geschlossene verglaste Einhausungen ergaben sich je nach Bauwerkslänge und Betriebsform um 10 bis 20 % geringere Erhaltungskosten. Wesentliche Unterschiede zum Referenztunnel ergaben sich durch die Ausführung der Lüftung. Es wurde angenommen, dass für die Einhausung ab 1.200 m bzw. 3.000 m die Rauchabsaugung mit Absaugklappen durch eine natürliche Rauchabsaugung (NRA) über zu öffnende Fenster ersetzt werden kann. Die Gegenüberstellung ergab, dass eine NRA mit geringeren Zusatzkosten verbunden ist. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass sich dieser Kostenvorteil der NRA trotz hoher angesetzter jährlicher Wartungskosten ergeben hat. Die reinen Baukosten geschlossener Einhausungen waren für Gegenverkehrsbauwerke aufgrund der Verglasung höher als für Tunnel; für Richtungsverkehrsbauwerke traf dies erst ab einer Bauwerkslänge von 3.000 m zu.

Zur Ermittlung des Kosteneinflusses der Beleuchtung auf die Erhaltungskosten oben und seitlich offener Einhausungen wurde eine Sensitivitätsuntersuchung durchgeführt. Hierbei wurden Szenarien mit und ohne Einfahrtsbeleuchtung und mit Variation der installierten Lichtleistung der Durchfahrtsbeleuchtung aufgestellt und die resultierenden Strom- und Wartungskosten berechnet. Durch eine Erhöhung der Lichtleistung auf 200 % bzw. 300 %

gegenüber dem Ausgangsfall sollte berücksichtigt werden, dass infolge der Öffnungen eine Kompensation von Schlagschatten erforderlich sein kann.

Als Ergebnis der Sensitivitätsuntersuchung ergab sich, dass die Ausführung der Durchfahrtsbeleuchtung auf die Erhaltungskosten nur einen geringen Einfluss ausübt. Für Einfahrtsbeleuchtungen wurde für kurze Bauwerkslängen (250 m) ein Anstieg der Erhaltungskosten gegenüber unbeleuchteten Einhausungen um ca. 5 % ermittelt. Im Fall oben offener Einhausungen im Richtungsverkehr mit zwei Einfahrtsbeleuchtungen vergrößerte sich der Anstieg auf ca. 11 %. Bei größeren Bauwerkslängen relativierten sich die Kosten einer Einfahrtsbeleuchtung gegenüber den Erhaltungskosten derart, dass ihr Einfluss vernachlässigt werden konnte.

Eine Ermittlung von Kostensätzen für die Unterhaltung der Ausstattungselemente ergab, dass mit zunehmender Bauwerkslänge mit einem überproportionalen Anstieg der Unterhaltungskosten zu rechnen ist. Für Richtungsverkehrstunnel mit einer Länge von 400 bis 3.000 Metern wurden jährliche Kosten in Höhe von bis zu 3,5 % der Erneuerungskosten ermittelt, die deutlich oberhalb des pauschalen Kostensatzes der ABBV von 2,0 % liegen. Oben und seitlich offene Einhausungen wiesen je nach Länge Kosten in Höhe von 0,8 bis 1,4 % der Erneuerungskosten auf. Der Kostensatz zur Unterhaltung geschlossener Einhausungen lag im Gegenverkehrsbetrieb je nach Länge zwischen 0,6 und 2 %, im Richtungsverkehrsbetrieb bis 3.000 m zwischen 0,8 und 2 %.

### **Folgerung für die Praxis**

Aufbauend auf den Ergebnissen der parallelen Risikoanalyse konnte für seitlich und oben offene Einhausungen zusätzlich zum Verzicht auf Lüftungssysteme abgeleitet werden, dass bei Einhaltung von baulichen Mindestanforderungen zur Ausführung der Bauwerksöffnungen auch Sicherheitseinrichtungen wie Notausgänge, Sperrschranken und Videoanlagen entfallen können. In Anlehnung an die derzeitige Regelung der RABT 2006 zur Ausstattung von Tunneln mit Sicherheitsanlagen wurde daher unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Risikoanalyse eine Erweiterung der bestehenden Tabelle 12 um die verschiedenen Einhausungsarten vorgenommen und angepasste Ausstattungen für Einhausungen erarbeitet, die eine Reduzierung gegenüber dem derzeit geforderten Ausstattungsniveau darstellen.

Wie die Berechnung der kapitalisierten Erhaltungskosten im Vergleich zu Tunnellösungen gezeigt hat, kann davon ausgegangen werden, dass die derart ausgestatteten Bauwerke auch volkswirt-

schaftlich günstig sind. Bei Einhaltung der definierten baulichen Mindestanforderungen stellt die erweiterte Tabelle somit einen möglichen Standard für zukünftige Planungen von Einhausungen dar, der keine Beurteilung des Sicherheitsniveaus mit zusätzlichen Risikoanalysen mehr erfordert. Für Konstruktionen, die hinsichtlich der Gestaltung der Öffnungen abweichen, ist die konkrete Ausführung des Bauwerks weiterhin objektspezifisch festzulegen. Aufgrund der ermittelten Kostenvorteile und den Ergebnissen der parallelen Risikoanalyse wird die Aufnahme von Einhausungen im untersuchten Ausstattungsniveau in das Regelwerk mit Verweis auf die zugehörige bauliche Gestaltung empfohlen.

## Summary

### Problem

In order to ensure that residents are protected against traffic emissions, building solid structures for screening purposes in densely built-up areas is worth considering. Apart from tunnels, full encasements with or without glazing, open-roofed encasements and open-sided encasements (galleries) are available solutions. According to the current German guidelines for the equipment and operation of road tunnels (RABT 2006), these structures are to be treated like tunnels with regard to the operational equipment. This results on the one hand in partially high costs for equipment and operation, on the other hand approval is necessary in individual cases if there are deviations from the RABT standard. In terms of costs, the main questions focus on the requirement for and the extent of supplementary ventilation and lighting installations, as they have a considerable effect on the costs throughout their service life.

The aim of this research project was a comparative analysis of the life cycle costs which incur for encasements and tunnels in open-cut construction. Encasements were investigated whose operational and safety-related equipment was determined by means of a parallel risk analysis (FE 15.492/2010/FRB) and tunnels equipped according to RABT 2006. By means of a detailed cost analysis the influences of the operational and safety-related equipment – in particular ventilation and lighting installations – on the entire costs for maintenance of the structure were identified. On the basis of the cost calculation, standardisation concepts and recommendations for implementation in the regulations (RABT) were developed by means of sensitivity analyses.

### Method of investigation

The approach of this research project consisted in a comparative analysis of the life cycle costs for the maintenance (renovation and upkeep) of tunnels and different types of encasements. First of all an analysis of the costs for the building, equipment and maintenance of real tunnels in open-construction and encasements was carried out. In a further step the average cost rates for the individual works and equipment elements were determined.

The comparison of the life cycle costs was carried out for the following types of structure:

- open-roofed encasements,
- open-sided encasements (gallery),

- full encasements with glazing in the roof and/or sides and
- tunnels in open construction as a reference object.

By means of the cost rates determined, the comparison was carried out on fictitious structures with a length between 100 and 6,000 metres. So in advance both the structural design (geometry) and the operational and safety-related equipment of the structures were specified. This specification was carried out in coordination with the research project “Risk analytical investigations on the safety standard of open encasements” (FE 15.492/2010/FRB) conducted in parallel. The aim of this project was to determine the structural and operational minimum requirements for the different types of encasements which are to be fulfilled to comply with the required safety standards according to RABT 2006. The point of intersection of both projects lay in the use of uniform types of structure and a scope of equipment ascertained according to a risk analysis. The safety standard for certain variations of structural design established in the parallel risk analysis made it possible to dispense with equipping open-sided and open-roofed encasements with ventilation systems and safety installations such as emergency exits and security barriers. The operational and safety-related equipment of the reference tunnel was determined according to the RABT 2006.

In order to be able to make statements on the costs which are incurred in the course of a life cycle, the cost comparison which was carried out included both the pure construction costs and the incurring maintenance costs. As a comparison model the German redemption amounts calculation directive (ABBV) was used which, on the basis of duration of use and lump-sum costs for the individual works, enables a calculation of the capitalised maintenance costs to be expended on the long-term renovation and upkeep of the structures. For a cost comparison on the one hand the difference between the maintenance costs of the various types of encasement and the relevant reference tunnel was established, which according to the ABBV represents the amount required to charge the debt. On the other hand the percentage of the maintenance costs of encasements compared to the maintenance costs of the reference tunnel was determined.

Based on the cost rates ascertained and the calculation model of the ABBV a software tool was created which allows the different types of structures to be compared with a reference tunnel and which outputs the expected cost differences. On this ba-

sis the type of structure can be chosen at an earlier planning stage, which can lead to economic advantages and at the same time guarantees an appropriate safety standard.

In the framework of the research project this evaluation tool was also used to carry out sensitivity analyses in order to investigate the cost effectiveness of lighting installations.

The results of the cost comparisons between the types of structure and the sensitivity analysis were used to develop standardisation concepts and recommendations for the regulations taking into account the (safety) technical and economic aspects.

## Results

The comparative calculations yielded the result that open-sided and open-roofed encasements as a whole involve considerably lower costs throughout their service life than tunnels. The greatest saving potentials turned out to be structures of over 1,200m in length (two-way traffic) and over 3,000m (one-way traffic), as no smoke extraction through an intermediate ceiling in the case of fire had to be used as is the case with tunnels.

Length [m]	Full encasements	Open-sided encasements	Open-roofed encasements
400	-11 %	-38 %	-33 %
1.200	-18 %	-46 %	-42 %
3.000	-16 %	-45 %	-40 %

**Table 1: Relative difference of the capitalised maintenance costs for encasements to the reference tunnel for selected lengths (two-way traffic)**

For open-sided encasements 35 to 45 % (Table 1 and Table 2) lower maintenance costs were determined depending on the length of the structure. The cost advantages were mainly due to the lower costs for equipping the structures with operating and safety technology and the maintenance involved, whereby dispensing with costly emergency exit staircases had a considerable effect. At the same time the reduced equipment also resulted in a greatly reduced energy demand which led to correspondingly lower electricity costs. In addition the construction also involved lower investment costs.

The cost difference for open-roofed encasements varied compared to tunnels depending on the type of operation. With regard to two-way structures open-roofed encasements showed around 30 to 40 % lower maintenance costs, whereby the difference to open-sided encasements lay in the comparatively higher construction costs. In the case of

one-way traffic 15 to 20 % lower maintenance costs were ascertained up to a length of 3,000m and over 3,000m up to 25 % lower maintenance costs.

Length [m]	Full encasements	Open-sided encasements	Open-roofed encasements
400	-11 %	-37 %	-19 %
1.200	-11 %	-37 %	-17 %
3.000	-15 %	-45 %	-25 %

**Table 2: Relative difference of the capitalised maintenance costs of encasements to the reference tunnel for selected lengths (one-way traffic)**

For full encasements with glazing there were 10 to 20% lower maintenance costs depending on the length and type of operation. Significant differences to the reference tunnel resulted due to the use of ventilation. It was assumed that for the encasements of 1,200m and 3,000m the smoke extraction with exhaust flaps could be replaced by natural smoke extraction (NSE) by means of opening windows. The comparison showed that NSE involves lower additional costs. It must be pointed out here that this cost advantage of NSE resulted in spite of high annual maintenance costs being set. The pure construction costs of full encasements for two-way traffic were higher than for tunnels due to the glazing; for one-way traffic structures this only applied from a length of 3,000m.

A sensitivity investigation was carried out to determine the influence of lighting on the maintenance costs of open-sided and open-roofed encasements. In order to do this, scenarios were set up with and without entry lighting and with variations on the output of the internal lighting installations and the resulting electricity and maintenance costs were calculated. With an increase in light output of 200 % and 300 % compared to the initial situation it should be taken into account that due to the openings it might be necessary to compensate for dark shadows.

The result of the sensitivity investigation showed that the use of internal lighting had only a small effect on the maintenance costs. For entry lighting an increase in maintenance costs of about 5% compared to unlit encasements was determined for short structures (250m). In the case of open-roofed encasements with one-way traffic with two entry lights the increase rose to about 11 %. Concerning structures of greater lengths, the costs of entry lighting became so relative with regard to the maintenance costs that their influence is negligible.

An investigation of the cost rates for the maintenance of the equipment elements showed that with increasing structural length a disproportionate increase in maintenance costs is to be expected. For one-way tunnels with a length of 400 to 3,000 metres annual costs amounting to up to 3.5 % of the renovation costs were established, which are considerably higher than the lump-sum cost rate of the ABBV of 2.0 %. Open-roofed and open-sided encasements showed, depending on length, costs amounting to 0.8 to 1.4 % of the renovation costs. The cost rate for the maintenance of full encasements was with two-way traffic between 0.6 and 2 % depending on length, with one-way traffic up to 3,000m between 0.8 and 2 %.

### **Conclusions for practical applications**

On the basis of the results of the parallel risk analysis it could be determined with regard to open-sided and open-roofed encasements that in addition to dispensing with ventilation systems, safety installations such as emergency exits, barriers and video installations could also be omitted while still complying with the structural minimum requirements for the design of structure openings. Following the current regulation of the RABT 2006 on the equipping of tunnels with safety installations, an extension to the existing Table 12 to include the different types of encasements was therefore carried out taking into account the results of the risk analysis, and adapted equipment for encasements was developed which represents a reduction in contrast to the currently required standard of equipment.

As the calculation of the capitalised maintenance costs in comparison to tunnels showed, it can be assumed that the structures equipped in this way are also economically advantageous. So while still maintaining the defined structural requirements, the extended table represents a possible standard for the future planning of encasements which no longer requires an assessment of the safety standard with additional risk analyses. For structures which deviate in terms of the design of the openings, the concrete design of the structure is still to be determined object-specifically. On the basis of the cost advantages ascertained and the results of the parallel risk analysis, the inclusion of encasements with a tested standard of equipment in the regulations is recommended with a reference to the related structural design.