

Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

der

Ruhr-Universität Bochum

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Peter Vogt

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Thewes, Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb

Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Osebold, RWTH Aachen
Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Schwarz, Universität der Bundeswehr München
Institut für Baubetrieb

Tag der Einreichung: 31. Juli 2012
Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2012

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:
Geschäftsführender Direktor des
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2013-1

Peter Vogt

**Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von
Straßentunneln unter Beachtung technischer und
finanzieller Unsicherheiten**

Shaker Verlag
Aachen 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1847-9

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„Ich finde ein kleines Land viel hübscher als ein großes.
Besonders wenn es eine Insel ist“ sagte die Prinzessin.
„Dann ist ja alles in Ordnung“, meinte Jim zufrieden.
„Man könnte ein paar schöne Tunnel bauen“, stellte Lukas fest.
„Quer durch die Terrassen durch. Was meinst Du Jim? Es soll ja Deine Insel werden.“
„Tunnel?“ sagte Jim nachdenklich. „Das wär ’famos.“¹

¹ Ende, Michael: Jim Knopf und Lukas der Lokomotivführer. K. Thienemanns Verlag Stuttgart – Wien, 1960

Vorwort und Dank

Die vorgelegte Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum entstanden. Dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes, danke ich herzlich für die Betreuung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen. Der intensive fachliche Austausch mit meinem Doktorvater hat die Basis dafür geschaffen, sukzessive ein an die tunnelspezifischen Rahmenbedingungen adaptiertes Lebenszykluskonzept zu entwickeln.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. R. Osebold, Prof. Dr.-Ing. J. Schwarz und Prof. Dr.-Ing. J. Geistefeld danke ich für die Erstellung der Gutachten und ihre Mitwirkung in der Promotionskommission.

Zum Gelingen der Arbeit hat die sehr gute Atmosphäre am Lehrstuhl beigetragen. Allen Lehrstuhlangehörigen wünsche ich viel Erfolg und Kraft bei der Erreichung ihrer wissenschaftlichen Ziele. Aus dem Kreise der Lehrstuhlmitarbeiter möchte ich besonders Frau Dipl.-Ing. Anna-Lena Hammer für die bereichernde Zusammenarbeit sowie der studentischen Hilfskraft Frau Bella Agachanjan für ihre gewissenhafte Zuarbeit danken.

Den Ansprechpartnern der Bundesanstalt für Straßenwesen und der Baukonzerne HOCHTIEF und Bilfinger Berger sei dafür gedankt, dass sie für konstruktive Diskussionen zur Praxistauglichkeit der entwickelten Modelle zur Verfügung standen. Äußerst wichtige Aspekte habe ich zudem aus den Gesprächen mit Herstellern von Tunnelausrüstungen gewonnen. Ihnen gebührt ebenfalls ein herzlicher Dank.

Meiner Frau Katja gilt der größte Dank. Sie hat mich jederzeit vorbildlich unterstützt, insbesondere auch dann, wenn sich kein Licht am Ende des Tunnels abzeichnete. Meine Frau und meine drei wunderbaren Kinder mussten an vielen Wochenenden ein Familienleben unter Einschränkungen akzeptieren. Für ihr Verständnis kann ich nicht oft genug danken!

Schließlich danke ich meinen Eltern, Magdalena und Hermann Vogt, die mir in den 1990er Jahren ein Bauingenieurstudium ermöglicht haben. Das Fundament für eine wissenschaftliche Karriere wurde dadurch gelegt.

Meiner Frau und meinem Vater danke ich für die akribische Durchsicht der Konzepte und Texte sowie für viele wertvolle Verbesserungsvorschläge.

Sprockhövel, im Januar 2013

Peter Vogt

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Dank	v
Inhaltsverzeichnis.....	vii
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
Kurzfassung	xix
Abstract.....	xxi
1 Einführung.....	1
1.1 Kosten für den Bau und Betrieb von Straßentunneln.....	1
1.2 Problemstellung	5
1.3 Zielsetzung	7
1.4 Gliederung der Arbeit und wissenschaftliches Vorgehen.....	8
2 Tunnel im Straßennetz.....	11
2.1 Verkehrliche Bedeutung.....	11
2.2 Sicherheit.....	18
2.3 Entwicklung der Investitionen in Deutschland.....	21
2.3.1 Neubauten seit den 1970er Jahren	21
2.3.2 Bewirtschaftung von Straßentunneln.....	23
2.3.3 Zukünftige Herausforderungen hinsichtlich Neubau und Erneuerung von Straßentunneln	29
2.4 Beschreibung des heutigen Vorgehens bei der Investitionsplanung.....	31
2.5 Ansätze zum wirtschaftlichen Handeln in derzeit gültigen Regelwerken.....	34
2.5.1 Einführung	34
2.5.2 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 25/1998: Leitfaden für die Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“	36
2.5.3 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 6/2000: Straßenquerschnitte in Tunneln	37
2.5.4 ZTV-ING, Teil 5 – Tunnelbau, Abschnitt 4.....	39
2.5.5 RI-BWD-TU: Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln	40
2.5.6 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 10/2006: Betriebstechnische Ausstattung von Straßentunneln	41
2.5.7 Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – ABBV.....	45
2.6 Anforderungen an eine zeitgemäße Bewirtschaftungsstrategie.....	47
3 Der Lebenszyklusgedanke – vom Ursprung bis zur Anwendung in der Bau- wirtschaft.....	51
3.1 Begriffsbestimmung	51
3.2 Ausgangsbasis Produktlebenszyklus.....	51
3.3 Anpassung an die bauwirtschaftlichen Rahmenbedingungen.....	53

3.3.1	Der Unikatcharakter eines Bauwerks	53
3.3.2	Der Bauwerkslebenszyklus	55
3.4	Das Abnutzungsverhalten von Baustoffen und Bauteilen	63
3.4.1	Normative Grundlagen	63
3.4.2	Abgrenzung der wirtschaftlichen von der technischen Lebensdauer.....	67
3.4.3	Lebensdauerbegriffe in der Literatur und Einführung der theoretischen Nutzungsdauer	69
3.5	Kosten im Lebenszyklus eines Bauwerks	72
3.5.1	Kosten als Beurteilungskriterium	72
3.5.2	Stand der Forschung	74
3.5.3	Ansätze zur Berechnung der Lebenszykluskosten	79
3.5.4	Der strategische Umgang mit Initial- und Folgekosten	85
3.5.5	Potentiale der lebenszykluskostenbasierten Sichtweise.....	93
4	Kriterien für die Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunnelbauwerken	97
4.1	Beschreibung der Ausgangslage	97
4.2	Anwendungsvoraussetzungen	98
4.2.1	Die Verknüpfung der Initial- und Folgekosten in Abhängigkeit vom Projektstatus.....	98
4.2.2	Einstiegs-Szenarien.....	100
4.3	Die Identifizierung von Kostenverursachern auf Baustoff- und Bauteilebene	103
4.3.1	Erläuterung der gewählten Systematik	103
4.3.2	Innere und äußere Randbedingungen des Planungsprozesses	104
4.3.3	Baustoffe im Tunnelbau – Materialeigenschaften und Abnutzungsverhalten.....	109
4.3.4	Bauteile und technische Betriebskomponenten in einem Straßentunnel.....	114
4.4	Der Umgang mit risikobehafteten Größen	121
4.4.1	Schwankungsbereiche von Initial- und Folgekosten.....	121
4.4.2	Unsicherheit und Unschärfe als risikobestimmende Parameter	124
4.4.3	Unsicherheiten im Zuge der Modellbildung	128
4.4.4	Identifizierung der mit Unsicherheiten behafteten Parameter.....	130
4.4.5	Ableitung parameterspezifischer Lösungsansätze	141
4.4.5.1	Arten von Prognoseverfahren	141
4.4.5.2	Theoretische Bauteilnutzungsdauer.....	142
4.4.5.3	Bauteilkosten und Projekterlöse.....	155
4.4.5.4	Kapitalzinssatz in der Investitionsrechnung	159
5	Entwicklung eines Modells zur Analyse der Lebenszykluskosten	163
5.1	Leitgedanke und Zielstellung	163
5.2	Investitionsrechnung	164
5.2.1	Erforderliche Leistungsfähigkeit	164

5.2.2	Konkretisierung der Methodik.....	165
5.3	Die sukzessive Verknüpfung der Einzelprozesse in Modultabellen	169
5.3.1	Allgemeine Struktur des Berechnungsmodells	169
5.3.2	Erfassung der Bauwerks- und Komponentenparameter in Modultabellen	171
5.3.3	Die Entwicklung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix	177
5.3.4	Berücksichtigung der Preisentwicklung und des Zeitwerts des Geldes	182
5.4	Beschreibung des Analysemodells	187
5.4.1	Programmtechnische Realisierung.....	187
5.4.2	Modulare Modellkonfiguration	188
5.4.3	Anwendungsvoraussetzungen und -möglichkeiten	190
5.5	PTLCC – Preliminary Tunnel Life-Cycle Costs	191
5.5.1	Anwendung	191
5.5.2	Aufbau und Umfang der Dateneingabe	193
5.5.3	Berechnungsergebnisse und deren Interpretation.....	195
5.6	Modul OTLCC – Operational Tunnel Life-Cycle Costs.....	198
5.6.1	Anwendung	198
5.6.2	Aufbau und Umfang der Dateneingabe	199
5.6.3	Berechnungsergebnisse und deren Interpretation.....	202
6	Anwendungsbeispiel: Die Lebenszykluskostenanalyse eines Bestandstunnels	205
6.1	Zielstellung und Vorgehen	205
6.2	Beschreibung des Modelltunnels	206
6.2.1	Allgemeine Angaben	206
6.2.2	Bestand	208
6.2.3	Nachrüstungs- und Sanierungsbedarf.....	210
6.3	Ableitung der modellspezifischen Eingangsparameter	212
6.3.1	Technische Parameter – Bauteile und Komponenten	212
6.3.2	Monetäre Parameter – Kostenhistorie und Fortschreibung	216
6.4	Eingabe in das OTLCC-Analysemodell und Berechnung	222
6.5	Ausgabe und Ergebnis.....	224
7	Fazit.....	229
7.1	Zusammenfassung	229
7.2	Ausblick	231
8	Literaturverzeichnis.....	235
9	Anlagen.....	247
10	Lebenslauf	266

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Tunnel der Bundesfernstraßen – Bestand nach Anzahl und Länge, nach [113]	12
Abbildung 2:	Zweckbestimmung der Tunnel auf Bundesfernstraßen nach Fertigstellung in den angegebenen Zeiträumen, nach [17]	13
Abbildung 3:	DTV-Klassen von Straßentunneln auf Bundesfernstraßen, nach [161], [48]	14
Abbildung 4:	Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs und Länge des Straßennetzes zw. 1991 und 2008, nach [31]	16
Abbildung 5:	Anteil der Aufwendungen für Tunnelneubauten an den Gesamtinvestitionen in das Bundesfernstraßennetz, mit Daten aus [48], [47], [70], [26], [18]	22
Abbildung 6:	Kostenentwicklung für Neu- und Ausbau sowie für Betrieb und Unterhaltung des Bundesfernstraßennetzes zwischen 1975 und 2009, mit Daten aus [48] und [47]	25
Abbildung 7:	Entwicklung des Brutto- und des Netto-Anlagevermögens sowie des Modernitätsgrades der deutschen Straßeninfrastruktur zwischen 1991 und 2008, nach [31]	27
Abbildung 8:	Altersstruktur der Tunnel der Bundesfernstraßen und theoretische Nutzungsdauern, mit Daten aus [113] und [32]	28
Abbildung 9:	Straßenquerschnittstypen bei Richtungsverkehrstunneln, nach [72]	39
Abbildung 10:	Lichttechnische Anforderungen in Abhängigkeit vom Standort im Tunnel, nach [57]	43
Abbildung 11:	Kosten- und Erlöse über die Dauer des Produktlebenszyklus	53
Abbildung 12:	Einflüsse, die ein Bauwerk zu einem Unikat machen	54
Abbildung 13:	Abgrenzung zwischen Rohbau- und Bauteilnutzungsdauer	57
Abbildung 14:	Das Lebenszyklus-Potential in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitpunkt	60
Abbildung 15:	Verknüpfung von Kausalitäten bei der Lebenszyklusplanung von Bauwerken (Szenario 1)	61
Abbildung 16:	Verknüpfung von Kausalitäten bei der Lebenszyklusplanung von Bauwerken (Szenario 2)	63
Abbildung 17:	Einflüsse auf das materielle Abnutzungsverhalten, nach [110]	64
Abbildung 18:	Prinzipien des materiellen Abnutzungsverhaltens, nach [110]	66
Abbildung 19:	Untergliederung der Instandhaltung, nach [55], [107], [77]	66
Abbildung 20:	Untergliederung der Instandhaltung, nach DIN EN 13306 [61]	67
Abbildung 21:	Lebens- und Nutzungsdauern im Bauwerkslebenszyklus, nach [142]	69
Abbildung 22:	Definition der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten theoretischen Nutzungsdauer	72
Abbildung 23:	Das Problem der unübersichtlichen Kosten, nach [67]	74
Abbildung 24:	Verdeutlichung des Barwertkonzeptes	77
Abbildung 25:	Das Bauwerk im Lebenszyklus mit qualitativer Entwicklung der Kosten und Erlöse	78

Abbildung 26: Qualitative Kostenverläufe und Kostenbeeinflussbarkeit, modifiziert nach [147]	89
Abbildung 27: Die Substitution von Folge- durch Folgekosten während der Betriebs- und Unterhaltungsphase	92
Abbildung 28: Wechselseitige Abhängigkeiten bei Tunnelprojekten	99
Abbildung 29: Innere und äußere Randbedingungen bei der Planung von Straßentunneln	105
Abbildung 30: Hierarchie der Ebenen der Tunnelbetriebstechnik	118
Abbildung 31: Schwankungsbereiche für die Planwerte der Initial- und Folgekosten	124
Abbildung 32: Auswirkungen von Unsicherheiten auf das Risiko der Lebenszykluskostenanalyse.....	129
Abbildung 33: Systematik zur Generierung zukünftiger Daten auf Grundlage einer Datenhistorie	130
Abbildung 34: Schema der Initial- und Folgekosten bei der szenarioabhängigen Lebenszykluskostenanalyse.....	132
Abbildung 35: Verknüpfung der Unsicherheiten aus der Bauteillebensdauer und den Kosten zum Austausch des Bauteils j	135
Abbildung 36: Zusammenhang zwischen Ausfallrisiko und Kosten für ein Bauteil.....	136
Abbildung 37: Schematische Darstellung zur Berücksichtigung verschiedener Preisentwicklungen	138
Abbildung 38: Zusammenhang statistischer Funktionen zur Beschreibung des Ausfallverhaltens, nach [8]	143
Abbildung 39: Darstellung der Zusammenhänge von Abnutzungsverhalten und Ausfallwahrscheinlichkeit, nach [115].....	144
Abbildung 40: Charakteristik der Badewannenkurve, nach [8].....	145
Abbildung 41: Darstellungsformen einer zweiparametrischen Weibullverteilung.....	147
Abbildung 42: Systematik zur Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit.....	151
Abbildung 43: Strategien für den Austausch irreparabler Tunnelausstattung und das Risiko für den Betreiber.....	154
Abbildung 44: Entwicklung verschiedener Preisindizes (2000 = 100 %), nach [150]	157
Abbildung 45: Entwicklung der jährlichen Veränderungen p_f [%] einzelner Preisindizes, nach [150]	158
Abbildung 46: Aufbau der Modultabellen	170
Abbildung 47: Durch die Modultabellen abzudeckender Umfang.....	171
Abbildung 48: Grafische Darstellung der Variablen j , d , a_j , s_j und q_j	172
Abbildung 49: Die systematische Verknüpfung der Variablen.....	176
Abbildung 50: Möglichkeiten zur Kombination der Initial- und Folgekosten sowie der Erlöse	182
Abbildung 51: Gruppierung der Ergebnisdarstellung	196
Abbildung 52: Barwertentwicklung für die in der Legende dargestellten Kombinationsmöglichkeiten.....	197

Abbildung 53: Entwicklung der Folgekostenindizes für das in Abbildung 52 gezeigte Beispiel.....	198
Abbildung 54: Grundriss Modelltunnel (nicht maßstäblich)	207
Abbildung 55: Abbildung des Ausfallverhaltens der KOMP.01 durch die Weibull- verteilung.....	214

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Projektspezifische Investitionskosten für Tunnelbauwerke, nach [70].....	2
Tabelle 2:	Projektspezifische Kosten zum Betrieb eines Tunnelbauwerks, nach [70]	4
Tabelle 3:	Jährliche Kosten für Betrieb und Unterhaltung von Straßentunneln, nach [70]	24
Tabelle 4:	In Bau befindliche und geplante Straßentunnel, nach [90], [91]	30
Tabelle 5:	Richtlinien, die wirtschaftliche Aspekte zu Tunnelplanung und -betrieb beinhalten.....	35
Tabelle 6:	Kriterienbewertung, nach [33]	37
Tabelle 7:	Theoretische Nutzungsdauern und Prozentsätze der jährlichen Unterhaltungskosten für Tunnel, nach [32]	47
Tabelle 8:	Zusammenstellung von Bauwerksnutzungsdauern	56
Tabelle 9:	Exemplarischer VoFi für die Investitionsalternative A, modifiziert nach [101]	82
Tabelle 10:	Stufen der Bau- und Baunutzungskostenermittlungen in Abhängigkeit von der HOAI-Leistungsphase, nach [53], [54], [50].....	88
Tabelle 11:	Beispiele für die Anwendung des Substitutionsprinzips	90
Tabelle 12:	Die drei Einstiegs-Szenarien der Lebenszykluskostenanalyse	102
Tabelle 13:	Faktoren, die den Lebenszyklus von Straßentunneln beeinflussen	103
Tabelle 14:	Übersicht der Baustoffe und Baustoffeigenschaften	109
Tabelle 15:	Auswirkungen auf das Baustoffverhalten bei natürlichen Einwirkungen ..	113
Tabelle 16:	Auswirkungen auf das Baustoffverhalten bei anthropogenen Einwirkungen.....	114
Tabelle 17:	Charakteristika der Bauteile in der Rohbauphase	116
Tabelle 18:	Eigenschaften der Bauteile auf Feldebene	120
Tabelle 19:	Stufen der Kostenermittlung mit Angabe von Schwankungsbereichen, nach [53], [50], [39] und mit Daten aus [86], [84], [169], [148].....	122
Tabelle 20:	Beispiele für Unsicherheit und Unschärfe in der Lebenszykluskostenanalyse.....	127
Tabelle 21:	Übersicht der mit Unsicherheit behafteten Eingangsgrößen	133
Tabelle 22:	Empfehlungen für die Abschätzung theoretischer Nutzungsdauern.....	155
Tabelle 23:	Beispiel zur Wahl unterschiedlicher Kapitalzinssätze.....	160
Tabelle 24:	Zusammenfassung der zur Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunnelbauwerken benötigten Variablen	175
Tabelle 25:	Nominale Zeit-/Kostenmatrix	181
Tabelle 26:	Die Ergebnismatrix	187
Tabelle 27:	Bisherig dokumentiertes Ausfallverhalten der KOMP.01.....	213
Tabelle 28:	Ausfallwahrscheinlichkeiten und zugehörige Nutzungsdauern.....	215
Tabelle 29:	Rohbauelemente des Modelltunnels mit Nutzungsdauern	215

Tabelle 30:	Ausstattungskomponenten des Modelltunnels mit Nutzungsdauern	216
Tabelle 31:	Initial- und Instandhaltungskosten für die Rohbaukomponenten auf der Preisbasis 1995	218
Tabelle 32:	Initial- und Instandhaltungskosten für die Ausstattungskomponenten auf der Preisbasis 1995	219
Tabelle 33:	Sekundäre Initialkosten und Folgekostenanteile für Rohbauelemente, Preisbasis 2012.....	220
Tabelle 34:	Sekundäre Initialkosten und Folgekostenanteile für Ausstattungskomponenten, Preisbasis 2012	221
Tabelle 35:	Kapitalwerte der Komponente „Tu-Quer1“ zum Referenzzeitpunkt 1995, über 70 Jahre	225
Tabelle 36:	Kapitalwerte der Komponente „Tu-Quer1“ zum Referenzzeitpunkt 2012, über 53 Jahre	226
Tabelle 37:	Kapitalwerte für alle Komponenten zum Referenzzeitpunkt 1995, über 70 Jahre	227
Tabelle 38:	Kapitalwerte für alle Komponenten zum Referenzzeitpunkt 2012, über 53 Jahre	227

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent	DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
§	Paragraph		
®	Registered Trademark	dyn.	dynamisch
€ / T€	Euro / Tausend Euro	e.V.	eingetragener Verein
A	Autobahn	EDV	elektronische Datenverarbeitung
a	Jahr		
ABBV	Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung	EK	Eigenkapital
		EL	Eigenleistung
AfA	Absetzung für Abnutzung	et al.	und andere
A-Modell	Ausbau-Modell	etc.	et cetera
ARS	Allgemeines Rundschreiben Straßenbau	EU	Europäische Union
		EW	Endwert
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen	FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
BMS	Bauwerks-Management-System	FM	Facility Management
BMV	Bundesministerium für Verkehr	F-Modell	Fernstraßenbauprivatfinanzierungsgesetz-Modell
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	FStrAbG	Fernstraßenausbaugesetz
		FStrG	Bundesfernstraßengesetz
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen	FStrPrivFinG	Fernstraßenbauprivatfinanzierungsgesetz
		FW	frühzeitige Wiederbeschaffung
bspw.	beispielsweise	GE	Geldeinheit
BVWP	Bundesverkehrswegeplan	GEFMA	Deutscher Verband für Facility Management
BW	Barwert		
bzgl.	bezüglich	GG	Grundgesetz
bzw.	beziehungsweise	ggf.	gegebenenfalls
cd	Candela (Leuchtdichte)	GüKG	Güterkraftverkehrsgesetz
d	Tag/Tage	HOAI	Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure)
d.h.	das heißt		
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.		
DM	Deutsche Mark	Hrsg.	Herausgeber
Doppik	Doppelte Buchführung in Konten	i	Zinsfaktor
		i.d.R.	in der Regel

IFK	Initial- und Folgekosten	RV	Rahmenvertrag
IS	Instandsetzung	RZP	Referenzzeitpunkt
ITA	International Tunnel Association	S.	Seite
K	Kelvin (thermodynamische Temperatureinheit)	s.o.	siehe oben
Kfz	Kraftfahrzeug	SFB	Sonderforschungsbereich
km / tkm	Kilometer / Tonnenkilometer	SIVV	Schützen, Instandsetzen, Verbinden und Verstärken von Betonbauteilen
km/h	Kilometer pro Stunde	SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
KW	Kapitalwert	stat.	statisch
KZS	Kapitalzinssatz	STUVA	Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.
Lkw	Lastkraftwagen	t	Zeit/Zeitpunkt/Lebensdauer
m	Meter	TDSCG	Tunnel Design and Safety Consultation Group
max.	maximal	techn.	technisch
Mio	Million	teilw.	teilweise
Mrd	Milliarde	TND	theoretische Nutzungsdauer
MTTF	Mean Time to Failure	TÜV	Technischer Überwachungsverein
MW	Megawatt	u.a.	unter anderem
Nr./No.	Nummer	ÜL	Übergangslösung
NW	Nominalwert	usw.	und so weiter
ÖPP/PPP	Öffentlich Private Partnerschaft/Public Private Partnership	UV	Ultraviolett
OTLCC	Operational Tunnel Life-Cycle Costs	VB	Verbesserung
PIARC	World Road Association	vgl.	vergleiche
Pkw	Personenkraftwagen	VoFi	Vollständiger Finanzplan
PSR	Preissteigerungsrate	z.B.	zum Beispiel
PTLCC	Preliminary Tunnel Life-Cycle Costs	ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten
RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln		
rd.	rund		
RStO 01	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen		

Kurzfassung

Seit den 1970er Jahren werden in Deutschland in zunehmendem Maße Straßentunnel geplant und gebaut, um ungünstige oder unsichere Straßenführungen zu verbessern. Tunnel erfordern in der Regel hohe spezifische Herstell- und Betriebskosten. Insbesondere die später anfallenden Betriebskosten wurden und werden in der Planung jedoch bestenfalls nur grob überschlägig betrachtet.

Eine restriktive Haushaltsführung der öffentlichen Hand macht es heute mehr denn je erforderlich, die Investitionen in neue und bestehende Tunnel vorausschauend zu planen. Die Anforderungen, die an eine nachhaltige Kostenplanung gestellt werden, erfüllt das Lebenszykluskostenkonzept, welches im Rahmen dieser Arbeit an die besonderen Eigenschaften der Tunnelbauwerke angepasst wird. Dabei ist der Fokus darauf ausgerichtet, unter verschiedenen technischen Planungsvarianten die Lösung mit der größten wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit zu ermitteln. Durch diesen Prozess werden die Bau- und die Betriebsphase eines Tunnels zu einer Betrachtungseinheit verknüpft und die notwendigen Voraussetzungen geschaffen, im Zuge von Variantenstudien Folge- durch Erstinvestitionen bzw. Erst- durch Folgeinvestitionen zu substituieren.

Streben Planer und Betreiber an, einen lebenszyklusorientierten Ansatz umzusetzen, so benötigen sie Kenntnisse zu den Nutzungsdauern sowie den Kosten der in einem Tunnelbauwerk vorhandenen Bauteile und Komponenten. Neben den Aufwendungen für die Erstinstallation sind Detailangaben zum Instandhaltungsaufwand, zum Energieverbrauch sowie zur Nutzungsdauer erforderlich.

Die Motivation zur Erstellung dieser Arbeit geht von der Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Ermittlung und Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunneln aus. Komponentenspezifische Erst- und Folgekostenanteile werden dazu ihren genauen Entstehungszeitpunkten zugeordnet. Die Untersuchungen decken zwei praxisrelevante Szenarien ab: Der erste Fall beginnt bereits in einer frühen Phase der Tunnelneuplanung, der zweite Fall verfolgt die Zielstellung, die Lebenszykluskosten für einen Bestandstunnel zunächst zu rekonstruieren und in einem nächsten Schritt konsequent fortzuschreiben. Neben der Implementierung von betriebswirtschaftlichen Ansätzen in die Planungs- und Betriebsphase von Tunneln wird eine Methodik aufgezeigt, das Ausfallverhalten von Bauteilen und Komponenten unter Zuhilfenahme statistischer Verfahren zu interpretieren. Die auf diese Weise gewonnenen Daten tragen dazu bei, die Genauigkeit der Lebenszykluskostenprognose zu erhöhen und eine derzeit in Planungsleitfäden vorhandene Informationslücke zu schließen. Ferner wird ein Lösungsweg entwickelt, technische und ökonomische Größen, die auch über die langen Zeiträume einer Lebenszykluskostenbetrachtung mit Unsicherheiten behaftet sind, durch verschiedene Ansätze schlüssig einzugrenzen. Jede zu berücksichtigende Kostengröße kann dabei in Abhängigkeit ihres spezifischen Unsicherheitsgrades als Intervall ausgedrückt werden, so dass auch das Gesamtergebnis

der Lebenszykluskostenberechnung eine zugehörige Bandbreite aufweist. Parallel zu der Berechnung der Lebenszykluskosten für das gesamte Tunnelbauwerk werden bauteilspezifische Folgekostenindizes ermittelt, die die zeitliche Entwicklung der Folge- im Verhältnis zu den Erstkosten ausdrücken.

Die erarbeiteten Ansätze sind in die Entwicklung eines softwaregestützten Tools zur Berechnung und Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunneln eingegangen. Ein Beispielprojekt dient der Erläuterung der Zusammenhänge und gibt Hilfestellung bei der Interpretation der Berechnungsergebnisse. Zusammenfassend wird Planern und Betreibern von Straßentunneln ein Verfahren zur Verfügung gestellt, die Wirtschaftlichkeit zukünftiger Projekte planungsbegleitend zu analysieren und die Folgekostenstruktur bestehender Tunnelbauwerke zu überprüfen sowie nachhaltig effizienter zu gestalten.

Abstract

Since the mid 1970s, road tunnels in Germany are primarily being planned and constructed in order to improve unfavorable or unsafe routes. Tunnels are characterized by both, high specific construction costs as well as comparatively high expenditures for the operation of the facility. Especially those costs occurring in the operational phase are usually only based on a rough estimate.

A restrictive financial budgeting of the public sector requires today more than in former times to plan investments thoroughly. The life-cycle concept enables to apply a sustainable cost planning scheme. Within the scope of this research work, the life-cycle concept is being adapted to the particular properties of tunnels. At the same time the focus is directed on identifying the most economic solution among a list of feasible technical alternatives. This process merges the construction and the operational phase in order to consider it as one unit. In this way all necessary prerequisites have been established in order to examine different alternatives by substituting follow-up by initial costs and vice versa.

In terms of a life-cycle approach the designer or operator needs to be familiar with useful lives and costs of all structural parts and components in a tunnel. In addition to all expenditures for the initial installation, further indicators are required according to maintenance, energy consumption as well as concerning useful lives of components.

The motivation for this scientific work is based on the development of a systematic approach for the calculation and analysis of the life-cycle costs for road tunnels. Therefore, all costs associated with materials and technical components have to be assigned to their appropriate time of occurrence. The investigations cover two basic cases of application: The first case refers to the phase of a new tunnel design, whereas the second case aims to reconstruct the life-cycle costs of a tunnel in operation, which is followed by the extrapolation. Beside the adaptation of economic approaches into the planning and operational phase of tunnels, a statistical analysis, which is based on a recorded failure history, allows to predict the failure behavior of parts and components. The data obtained will on one side help to increase the accuracy of the life-cycle cost prediction and on the other side to close an information gap which currently exists in design guidelines. In addition, an approach is being derived how to conclusively limit and deal with uncertainties resulting from costs. Each cost increment to be introduced into the tool might be expressed as an interval, mirroring its specific grade of uncertainty. As a consequence, the calculation results are also given in terms of a spectrum. Along with the calculation of the life-cycle costs for the entire tunnel structure, a component-specific cost index expresses the time-dependant development of follow-up costs in relation to the initial costs.

The approach described above has been utilized to develop a software-based tool. In summary, planners and operators of road tunnels are given a method to analyze the prof-

itability of future projects and to check follow-up costs of existing tunnels in order to check as well as to increase the efficiency on a long term basis.