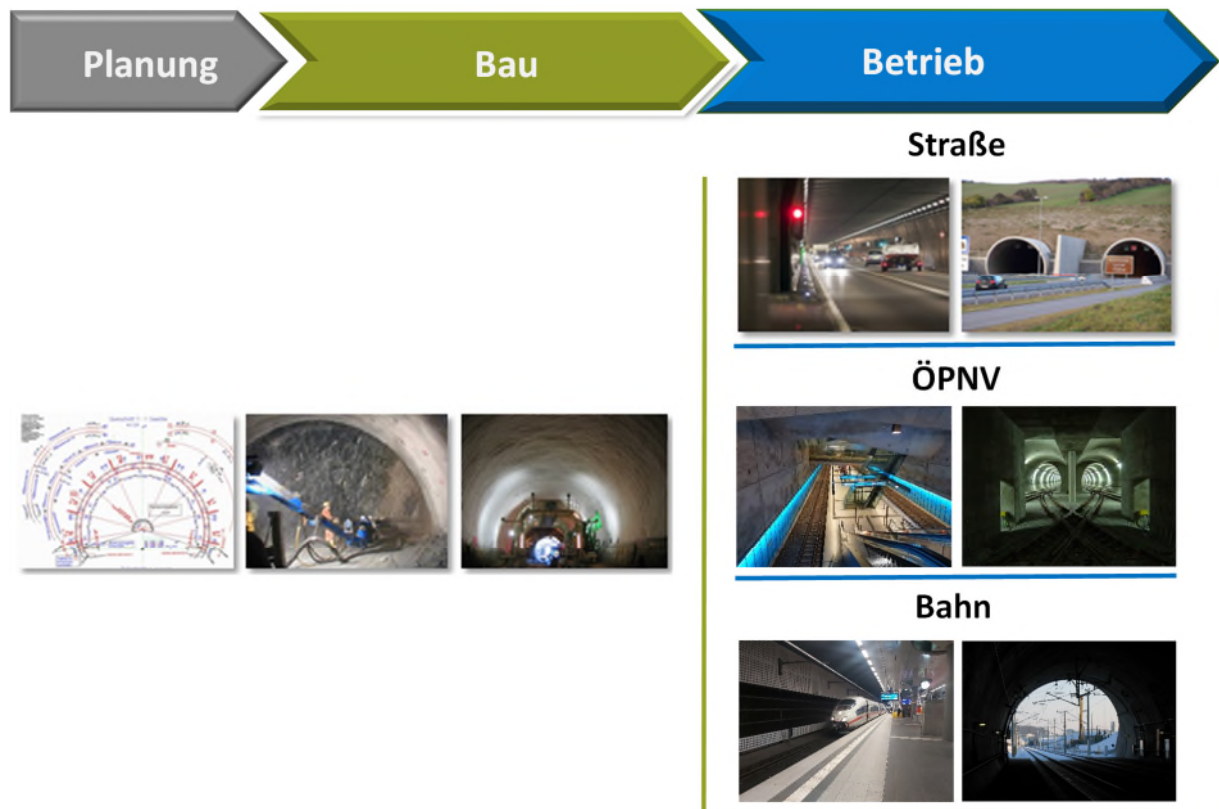


Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Tunnel



Herausgeber:

Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB)

German Tunnelling Committee (ITA-AITES)

Mathias-Brüggen-Str. 41, 50827 Köln

Tel. +49 - 221 - 5 97 95-0

Fax +49 - 221 - 5 97 95-50

E-Mail: info@daub-ita.de

www.daub-ita.de

Erarbeitet von der DAUB Arbeitsgruppe Lebenszykluskosten:

Hans Adden, Ruhr Universität Bochum

Stephan Engelhardt, Hochschule München

Frank Fries, DB Netz AG

Klaus Hofmann, LHS Stuttgart, Tiefbauamt

Anne Lehan, Bundesanstalt für Straßenwesen

Maren Kaiser, ZPP Ingenieure

Karl-Heinz Reikat, Stadt Bochum, Tiefbauamt

Jürgen Schwarz, PJS Consulting, Leiter der Arbeitsgruppe

Ludger Speier, ZPP Ingenieure

Markus Thewes, Ruhr Universität Bochum

Peter Vogt, Hochschule Ruhr-West, Mülheim

März 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation.....	1
1.2	Adressatenkreis.....	1
1.3	Struktur der Empfehlung.....	2
2	Lebenszyklus von Tunnelbauwerken	3
2.1	Lebenszyklusphasen eines Tunnelbauwerks.....	3
2.2	Lebenszyklusphasen der Tunnelausstattung.....	4
2.3	Lebenszyklusansatz und Lebenszykluskosten.....	5
3	Nutzungsdauern	8
3.1	Einflussfaktoren.....	8
3.2	Begriffsdefinitionen.....	9
3.3	Nutzungsdauer.....	10
3.3.1	Technische Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer.....	10
3.3.2	Wirtschaftliche Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer.....	11
3.3.3	Sozio-ökonomische Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer.....	11
3.4	Ansätze für Nutzungsdauern.....	12
3.4.1	Straßentunnel.....	12
3.4.2	ÖPNV-Tunnel.....	16
3.4.3	Nutzungsdauern Bahntunnel.....	17
3.5	Erhaltungs- und Instandhaltungsstrategien.....	17
4	Kapitalwertverfahren	20
4.1	Grundaussagen und -annahmen.....	20
4.2	Analytisches Standardmodell.....	20
4.3	Entscheidungsrelevante Parameter.....	21
4.4	Erweiterungen des Standardmodells.....	23
4.5	Beurteilung der Kapitalwertmethode.....	23
5	Berechnung der Lebenszykluskosten	24
5.1	Schritt I – Ausgangslage.....	25
5.2	Schritt II – Strukturierung des Bauwerks.....	26
5.3	Schritt III – Modulbildung.....	26
5.3.1	Strukturierung der Module.....	27
5.3.2	Beispiele für Module Straßentunnel.....	30
5.3.3	Beispiele für Module ÖPNV-Tunnel.....	31
5.4	Schritt IV – Verfahren der Kostenermittlung.....	33
5.5	Schritt V – Überführung in eine Kostenmatrix.....	34
5.6	Schritt VI – Lebenszykluskosten-Berechnung: Kapitalwertmethode.....	36

5.7	Schritt VII – Variantenvergleich und Interpretation	36
6	Auswertungen und Analysen	39
6.1	Sensitivitätsanalyse.....	39
6.2	Pareto Prinzip.....	40
6.3	Erstellung einer ABC Kategorisierung.....	41
6.4	Risikoanalyse zur Berücksichtigung von Unsicherheiten.....	42
6.5	Benchmarking.....	43
7	Anwendungsbeispiel für Mustertunnel Straße	45
7.1	Einleitung und Projektbeschreibung Mustertunnel.....	45
7.2	Vorgehen	45
7.3	Schritt I: Untersuchungsrahmen	45
7.4	Schritt II: Strukturierung und Schritt III: Modulbildung.....	46
7.5	Schritt IV: Kostenermittlung	46
7.5.1	Initialkosten	46
7.5.2	Folgekosten.....	47
7.5.3	Modulblätter	48
7.6	Schritt V: Überführung in eine Kostenmatrix.....	48
7.7	Schritt VI: LZK-Berechnung mit Anwendung des Kapitalwertverfahrens.....	49
7.8	Schritt VII: Interpretation	49
8	Anwendungsbeispiel für Mustertunnel ÖPNV	52
8.1	Schritt I: Ausgangslage und Projektbeschreibung Mustertunnel	52
8.2	Schritte II, III und IV: Strukturierung, Modulbildung und grundlegende Kosteninformationen.....	53
8.3	Schritt V Überführung in eine Kostenmatrix.....	55
8.4	Schritt VI: LZK-Berechnung mit Anwendung der Kapitalwertmethode	55
8.5	Schritt VII: Variantenvergleich, Interpretation, Detailanalyse.....	56
8.6	Ergebnis	60
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	61
10	Literaturverzeichnis	62

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Die Entwicklung, die Herstellung und das Betreiben von Bauwerken mit dem Ziel der Nachhaltigkeit ist ein allgemeiner Konsens in der Gesellschaft. Nachhaltige Bauwerke sind vorteilhaft in Ökonomie, in Ökologie und in ihrer sozialen Funktion. Trotz dieser allgemein anerkannten Zielsetzung werden Ingenieurbauwerke vorwiegend mit einer Minimierung der Herstellkosten geplant, die Ziele der Nachhaltigkeit spielen keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Ein Grund ist, dass es gegenwärtig für die Nachhaltigkeitsbewertung nur Verfahren für den Hochbau gibt, aber nur erste Ansätze für Ingenieurbauwerke.

Eine wesentliche Säule der Nachhaltigkeit ist die Einschätzung von Lebenszykluskosten, bei denen nicht nur die Herstellungskosten, sondern auch die Kosten für Betrieb, Instandhaltung und Instandsetzung erfasst werden. Hierzu gibt es neue Forschungsarbeiten, in denen für den speziellen Anwendungsfall der Tunnelbauwerke Verfahren zur Prognose der Lebenszykluskosten weiterentwickelt wurden.

Die 2018 veröffentlichte Empfehlung des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB) hat diese Forschungsarbeiten aufgegriffen und praxisnahe Werkzeuge, Daten und Quellen zur Verfügung gestellt. In der vorliegenden Überarbeitung von 2023 werden die Ausführungen für die Straßentunnel aktualisiert. Außerdem wird die Empfehlung für die Anwendung „ÖPNV-Tunnel“ ergänzt. Weiter werden Hinweise für die Anwendung auf Bahntunnel einschließlich Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV) gegeben. Sämtliche Kosten von Tunnelbauwerken im Lebenszyklus fließen in die Berechnung ein. Das sind die Planungs- und Herstellungskosten des Bauwerkes und der Ausstattungen des Tunnels. Bei den Folgekosten über die Lebensdauer (Instandhaltung und Instandsetzung sowie Betriebskosten) ist ein wesentlicher Parameter die Nutzungsdauer jeder Komponente. Für das eigentliche Tunnelbauwerk wird eine Nutzungsdauer von 100 oder mehr Jahren angestrebt. Für die Ausrüstung sind die Nutzungszeiten wesentlich kürzer und erfordern somit einen (mehrfachen) Austausch während der Lebensdauer des Gesamtbauwerks.

Alle erwähnten Arten von Kosten werden in einem Gesamtmodell zur Berechnung der Lebenszykluskosten zusammengefasst. Damit kann die vorteilhafteste Lösung für das gesamte Bauwerk ermittelt werden. Es können in Variantenuntersuchungen auch einzelne Teile und Bauteile verglichen und bewertet werden.

In der vorliegenden Empfehlung wird die Methodik zur Berechnung der Lebenszykluskosten für Tunnel vorgestellt, die nun mit der Anwendung auf Berechnungsbeispielen („Mustertunnel“) für Straße und ÖPNV vorliegt. Für Bahntunnel ist die Anwendung mit der beschriebenen Methodik und den angegebenen Quellen ebenfalls unmittelbar möglich. Die Methodik ist auch allgemein für Infrastrukturbauwerke anwendbar. Für eine verbesserte Prognose von Nutzungsdauern, insbesondere von Ausstattungskomponenten, sowie für eine Erweiterung auf eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

1.2 Adressatenkreis

Die Empfehlung stellt eine Entscheidungshilfe für Bauherrn und Betreiber von Tunneln sowie anderen Infrastrukturobjekten bereit, die ökonomisch vorteilhafteste Variante für Bau, für Betrieb und für Modernisierungen zu finden. Das betrifft in den meisten Fällen die

öffentliche Hand und deren Planer. Bei den ÖPNV-Tunneln können dies auch die Aufgabenträger wie z.B. die Kommunen, Landkreise oder Zweckverbände sein, die in der Regel auch die Besteller der Verkehrsleistung sind. Des Weiteren gehören zu diesem Adressatenkreis kommunale Tochterunternehmen, die selbstständig planen und bauen. Die Empfehlung kann aber auch für die Entscheidungen für ÖPP-Tunnelprojekte objektivieren, denn hier ist eine verbesserte Einschätzung der Lebenszykluskosten neben einer möglichst genauen Prognose der Nutzungszahlen bei Mautsystemen von hoher wirtschaftlicher Bedeutung. Auch können damit bei Bieterverfahren im Wettbewerb Nebenangebote beurteilt werden. Schließlich können Anbieter von Ausrüstungen die Vorteilhaftigkeit von Innovationen prüfen und nachweisen.

1.3 Struktur der Empfehlung

In der Empfehlung werden in den ersten vier Kapiteln alle notwendigen Grundlagen für eine Lebenszykluskostenberechnung erläutert, für eine Vertiefung wird die geeignete Literatur angegeben. Die generelle Methodik ist in Kapitel 5 in sieben Schritten erklärt:

Schritt I – Ausgangslage

Schritt II – Strukturierung des Bauwerks

Schritt III – Modulbildung

Schritt IV – Verfahren der Kostenermittlung

Schritt V – Überführung in eine Kostenmatrix

Schritt VI – Lebenszykluskosten-Berechnung: Kapitalwertmethode

Schritt VII – Variantenvergleich und Interpretation

Für die Ergebnisinterpretation werden in Kapitel 6 Hinweise gegeben. Kapitel 7 enthält ein Berechnungsbeispiel für Straßentunnel, Kapitel 8 für ÖPNV Tunnel; diese Beispiele sollen dazu beitragen, die Einführung der hier vorgestellten Methoden bei zukünftigen Projekten zu erleichtern.

Mit den Erläuterungen und Arbeitshilfen ist es möglich, eine wissenschaftlich und praxisnah begründete Berechnung der Lebenszykluskosten eines Tunnels durchzuführen. Mit der ingenieurmäßigen Interpretation der Ergebnisse erhält der Anwender dann Prognosen und Vergleichswerte zur Entscheidungsfindung bei der Wahl der vorteilhaftesten Variante der Bauaufgabe.

2 Lebenszyklus von Tunnelbauwerken

Die Analyse des Lebenszyklus von Tunnelbauwerken erfordert eine Betrachtung in Phasen. Ausgehend von einer mittleren Gesamtlebensdauer eines Tunnels von 90 bis 130 Jahren¹ besteht der Lebenszyklus eines Bauwerkes nach ISO/FDIS 15686-5² aus allen Phasen, die die bauliche Errichtung, den Betrieb und die Instandhaltung bis zum Ende der Gebrauchstauglichkeit umfassen. Hierfür werden übergeordnet die Phasen Planung, Herstellung, Nutzung und Verwertung unterschieden. Diesen Phasen sind wiederum Prozesse zuzuordnen, die konkrete Tätigkeiten abbilden. Die nachfolgend vorgestellten Prozesseinteilungen sind nicht abschließend, sondern beispielhaft zu verstehen. Die Anlehnung an die in der Praxis zu erfassenden Kostenstellen oder auch andere organisatorische Strukturen können die Anwendung praktikabler gestalten.

Um eine hinreichend genaue Analyse zu ermöglichen, empfiehlt sich eine differenzierte Betrachtung zwischen Tunneltragwerk (Abschnitt 2.1) und der erforderlichen Tunnelausstattung (Abschnitt 2.2).

2.1 Lebenszyklusphasen eines Tunnelbauwerks

Gemäß ASB-ING³ und RI-WI-BRÜ⁴ lassen sich die Phasen für das konstruktiv geprägte Tunnelbauwerk in die Phasen Bau, Erhaltung, Ertüchtigung und Verwertung einteilen. Grundsätzlich sind für eine genaue Kostenermittlung auch die Planungsleistungen hinzuzuziehen.

Abbildung 1 stellt eine detaillierte Aufteilung in Anlehnung an die für Infrastrukturbauwerke geltenden Richtlinien dar. Eine Einteilung in die verschiedenen Phasen ermöglicht die bessere Zuordnung der Kosten, die sich in Initial- und Folgekosten aufgliedern. Die Initialkosten umfassen dabei den Aufwand für die Planung und Realisierung des Rohbaus sowie der Ausstattung. Die Folgekosten resultieren maßgeblich aus den in Abbildung 1 genannten Prozessen im Rahmen der Erhaltung, Ertüchtigung und Verwertung.

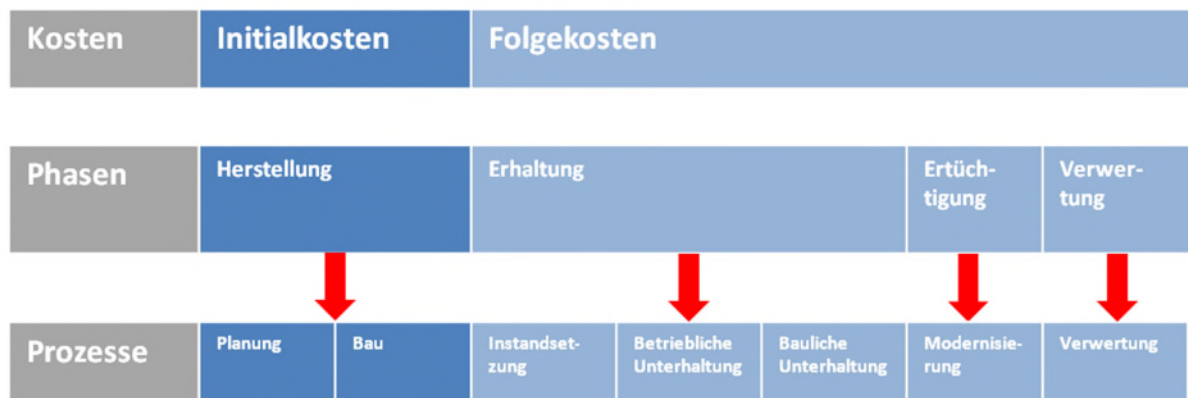


Abbildung 1: Lebenszyklusphasen des Tunnelbauwerks⁵

Die Planungsphase umfasst alle Leistungen, die für die Herstellung der ausführungsfähigen Bauwerksplanung benötigt werden. Die Phase der Herstellung beinhaltet alle Aufwände,

¹ ABBV (2010), S. 865

² ISO (2008)

³ ASB-ING (2013)

⁴ RI-WI-BRÜ (2007)

⁵ Darstellung der relevanten Prozesse für Tunnelbauwerke in Anlehnung an die ASB-ING (2013)

die zur Herstellung des Tunnelbauwerks anfallen. Die längste und damit prägendste Phase stellt die Erhaltung dar und umfasst alle baulichen und betrieblichen Aufwendungen, die während der Nutzung entstehen. Darin eingeschlossen sind die Instandsetzung und die Bauwerksunterhaltung, letztere lässt sich in die bauliche und betriebliche Unterhaltung unterteilen. Während dieses, über mehrere Jahrzehnte dauernden Zeitraumes, müssen Ertüchtigungen (Modernisierungen), ggf. aufgrund sich ändernder Rahmenbedingungen, vorgenommen werden. Sollte das Bauwerk nicht mehr seine Funktion erfüllen, so steht der Rückbau bzw. die Verwertung als letzter Schritt im Lebenszyklus an. Hierunter sind solche Aufwände zu verstehen, die beim Rückbau oder einer Umnutzung entstehen.

2.2 Lebenszyklusphasen der Tunnelausstattung

Damit ein kontinuierlicher und sicherer Tunnelbetrieb möglich ist, weisen das Bauwerk und die Tunnelausstattung vergleichbare Lebenszyklusphasen auf. Jedoch besitzt die Tunnelausstattung grundsätzlich kürzere Nutzungsdauern, sodass eine mehrfache Erneuerung während des Gesamtlebenszyklus des Bauwerks zu berücksichtigen ist. Des Weiteren ist aufgrund des hohen technischen Umfangs bzw. der hohen sicherheitstechnischen Erfordernisse der Tunnelausstattung der betriebstechnische und somit auch kostentechnische Umfang detaillierter zu betrachten.



Abbildung 2: Lebenszyklusphasen der Tunnelausstattung⁶

Abbildung 2 veranschaulicht die entsprechenden Phasen und die zugeordneten Prozesse. Wie beim Tunnelbauwerk, muss auch hier die Planungsphase vorangestellt werden, gefolgt von der baulichen Umsetzung der Ausstattung des Tunnels. Bei der Überführung in den Tunnelbetrieb empfiehlt sich eine Phasenbetrachtung in Anlehnung an DIN 31051⁷ und die RABT⁸, in Verbindung mit den EABT-80/100⁹. Die Betrachtung wird erweitert um den Betrieb, der alle Aktivitäten umfasst, die mit der Nutzung – dem laufenden Tunnelbetrieb – einhergehen. Die Instandhaltung stellt die für die Tunnelausstattung maßgebliche Phase dar und umfasst Wartung und Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung. Es empfiehlt sich, eine Erweiterung im Block „Verbesserung“, um den Prozess der „Erneuerung“ vorzunehmen (Abbildung 2). Die zumeist zyklisch anfallende Erneuerung deckt den kompletten Austausch nach vorgegebener oder entsprechender Nutzungsdauer ab und wird regelmäßig im Zuge der LZK-Betrachtung erfasst. Die Betriebsphase beinhaltet die Tunnelüberwachung, die energetische Versorgung (Strom, Wasser), aber auch die

⁶ Darstellung der relevanten Phasen und Prozesse für die Tunnelausstattung in Anlehnung an DIN 31051 (2012) und RABT (2006)

⁷ Vgl. DIN 31051 (2012)

⁸ Vgl. RABT (2006)

⁹ Vgl. EABT 80/100 (2019)

regelmäßig durchzuführenden Großübungen durch die Einsatzdienste, um die Gefahrenabwehr und Ereignisbewältigung zu trainieren.

Eine Verwertungs- oder Umnutzungsphase analog zum Bauwerk ist nicht zwingend vorzusehen, da üblicherweise nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung der Ausstattung vorgenommen wird und eine Verwertung nicht sinnvoll ist (vgl. Kap. 3).

2.3 Lebenszyklusansatz und Lebenszykluskosten

Wie aus Abbildung 3 ersichtlich wird, markieren zwei mögliche Fälle den Einstieg in die lebenszyklusorientierte Sichtweise für Tunnelbauwerke: Während der erste Fall mit dem Beginn der Planungen für einen Tunnelneubau startet, bezieht sich der zweite Fall auf ein in Betrieb befindliches Tunnelbauwerk.

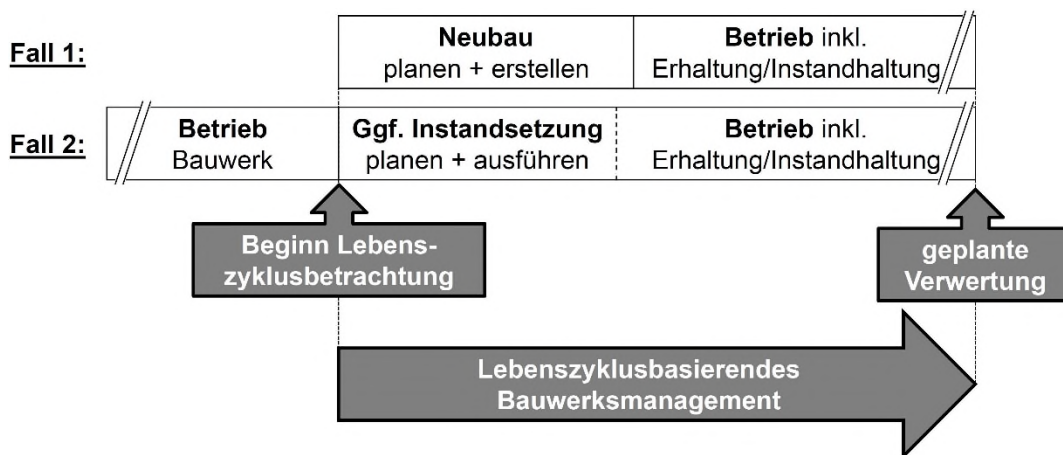


Abbildung 3: Fallbezogener Einstieg in die Lebenszykluskostenbetrachtung¹⁰

Die beiden Fälle stellen sicher, dass sowohl Tunnelneubauten als auch die im Verkehrsnetz vorhandenen Tunnel in das Konzept einbezogen werden. Ist der Neubau (Fall 1) fertiggestellt oder sind die ggf. erforderlichen Instandsetzungsarbeiten an einem Bestandsbauwerk (Fall 2) abgeschlossen, wird in beiden Fällen der anschließende Tunnelbetrieb durch Erhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen dominiert.

Das Leitkriterium zur Beurteilung des Lebenszyklus sind die Kosten¹¹. Die zu bevorzugende Planungsvariante ist – je nach Sichtweise und Zielstellung – diejenige mit der geringsten Summe aus Initial- und Folgekosten, im Folgenden als Lebenszykluskosten bezeichnet. Für das Investitionsgeschehen ist charakteristisch, dass während der Herstellungsphase (vgl. Abbildung 1) hohe Auszahlungen¹² erfolgen und in der Erhaltungs- bzw. Instandhaltungs-/Betriebsphase (vgl. Abbildung 3) wechselnde Aus- und ggf. auch Einzahlungen zu verzeichnen sind. Die in einer Lebenszykluskostenanalyse zu berücksichtigenden Zahlungen weisen bezüglich ihrer Höhe Schwankungen auf und sind nicht notwendigerweise periodisch wiederkehrend. Einzahlungen sind z.B. bei Konzessionsprojekten im Bereich „Straßentunnel“ oder bei der Berücksichtigung von Ticketerlösen bei ÖPNV-Tunneln relevant (vgl. betriebswirtschaftliche Erläuterungen im Kapitel 4).

¹⁰ Vgl. THEWES, VOGT (2014)

¹¹ Im Rahmen dieser -Empfehlung werden die Lebenszykluskosten als ökonomische Säule der Nachhaltigkeit betrachtet. Eine vollständige nachhaltige Lebenszyklusbetrachtung muss ebenso die Ökologie und die soziale Säule bewerten.

¹² Die Initialkosten werden im Sinne des Kapitalwertverfahrens (vgl. Kap. 4) als „Auszahlungen“ bezeichnet.

Jede einzelne Planungsvariante zeichnet sich dadurch aus, dass sie mit anderen Varianten konkurriert. Diese Forderung ist aber nur dann erfüllt, wenn alle Varianten dasselbe Niveau in Bezug auf die übergeordnete Bauwerksfunktion besitzen. Der Fokus einer Lebenszykluskostenanalyse ist darauf ausgerichtet, unter verschiedenen technischen Planungsvarianten diejenige mit der größten Vorteilhaftigkeit zu ermitteln. Hierzu werden die zuvor eingeführten Lebenszyklusphasen zu einer Betrachtungseinheit verknüpft sowie die notwendigen Voraussetzungen geschaffen, im Zuge von Variantenstudien Folge- durch Initialkosten bzw. Initial- durch Folgekosten zu substituieren¹³.

Aus den beschriebenen Rahmenbedingungen lässt sich folgern, dass neben der technischen Durchbildung eines Tunnelbauwerks weiteres Expertenwissen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit benötigt wird. Beide Prozesse – gemeint sind die technische und die monetäre Planung – müssen parallel erfolgen und als Ergebnis einer Bewertung von Alternativen das ökonomische Optimum hervorbringen. Voraussetzung zur Erreichung dieser Zielstellung ist es, den Untersuchungszeitraum des Bauwerks in einem Gesamtmodell abzubilden. Das schrittweise Vorgehen und die verfolgte Zielstellung sind in Abbildung 4 zusammengefasst.

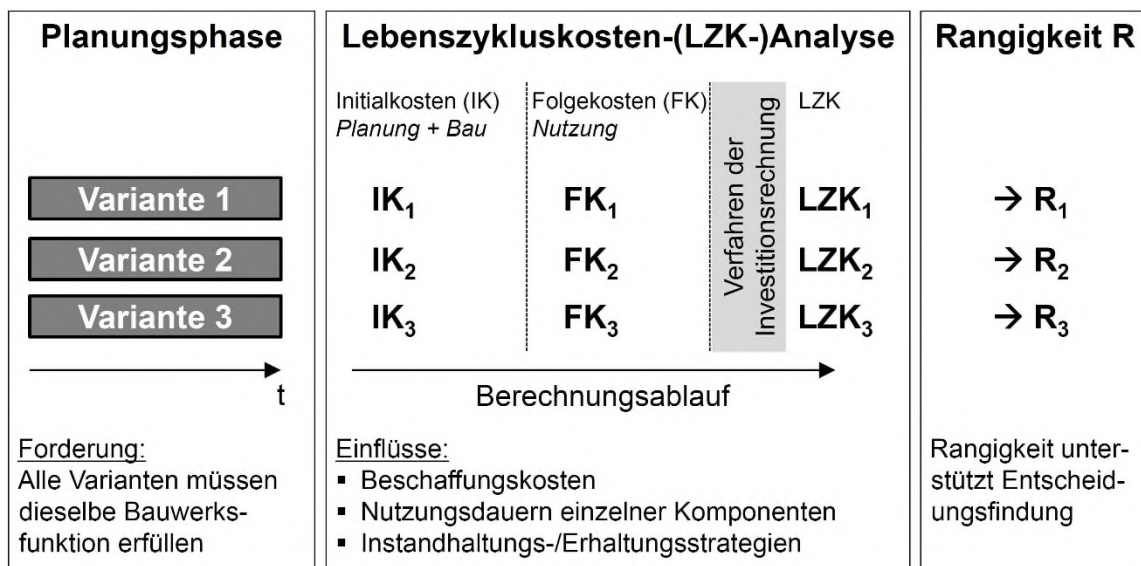


Abbildung 4: Allgemeines Vorgehen und Ziel einer Lebenszykluskostenanalyse

Die Vorgehensweise bei der Analyse und Interpretation der Lebenszykluskosten von Tunneln muss somit die folgenden Merkmale sicherstellen:

- Unterstützung bei der Auswahl der erforderlichen Bauteile und Komponenten (sog. „Module“, vgl. Kapitel 5), sowie Vorgabe rechnerischer (angenommener) Nutzungsdauern und sinnvoller Instandhaltungszyklen (vgl. Kapitel 3),
- Systematik für die statistische Interpretation von bereits erfassten bzw. zukünftig zu dokumentierenden Bauteilausfällen; dabei muss ein Rückschluss auf die Nutzungsdauer von Bauteilen und Komponenten (Module) möglich sein,
- Zeitabhängige Zuordnung der resultierenden Kosten nach Höhe, Art und Entstehungszeitpunkt,

¹³ Vgl. VOGT (2013)

- Festlegung der Parameter, die für die Anwendung der Investitionsrechnungsverfahren benötigt werden (vgl. Kapitel 4),
- Bewertung von Unsicherheiten bzw. Risiken (vgl. Kapitel 6).

Vor dem Hintergrund, dass eine Lebenszykluskostenanalyse gewöhnlich mehrere Jahrzehnte umfasst, wird zur Berechnung ein dynamisches Verfahren der Investitionsrechnung – die Kapitalwertmethode – gewählt. Nähere Erläuterungen zur Kapitalwertmethode sind in Kapitel 4 zu finden.

3 Nutzungsdauern

3.1 Einflussfaktoren

Wie in Kapitel 2.3 ausgeführt, setzen sich die Lebenszykluskosten aus den Initial- und Folgekosten für sämtliche Bauteile, aus denen ein Tunnel besteht, zusammen. Die Prognose der Folgekosten ist eng mit der Einschätzung zutreffender Nutzungsdauern für jedes Bauteil verknüpft.

Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass das gewählte Berechnungsverfahren – die Kapitalwertmethode – ebenfalls Annahmen beinhaltet, die in die Interpretation des Gesamtergebnisses einzubeziehen sind. Eine entsprechende Diskussion ist in Kapitel 4 zu finden.

Bei der Planung von Tunnelbauwerken und der Betrachtung der Lebenszykluskosten als Entscheidungskriterium werden bisher insbesondere bei der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausstattung (Beleuchtung, Lüftung, Sicherheitseinrichtungen, zentrale Anlagen, etc.) Durchschnittswerte angesetzt und von einer theoretischen Nutzungsdauer ausgegangen.

Grundlage bisheriger Ermittlungen von Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken bildet die Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung (ABBV), die als Erfahrungswert eine theoretische Nutzungsdauer von 20 Jahren für die betriebs- und verkehrstechnische Ausstattung vorgibt¹⁴, oder für ÖPNV-Tunnel die „Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr“¹⁵.

Bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten im Zuge der Variantenauswahl – insbesondere für Neubauten – wird aktuell auf die Angaben der ABBV zurückgegriffen, wie auch bei der Gegenüberstellung von zwei oder mehreren möglichen Ausstattungsvarianten (z.B. Kompensationsmaßnahmen im Zuge von Risikoanalysen). Im Zuge tatsächlicher Mittelplanung für die strategische Erhaltungsplanung von z.B. Eigentümern und Betreibern kann solch ein pauschales Verfahren jedoch nur bedingt angewendet werden. Um die Kosten sowie Instandhaltungszyklen annähernd genau zu bestimmen, empfiehlt sich eine differenzierte Betrachtung einzelner Anlagenkomponenten.

Gemäß den Vorgaben der ABBV ist im Zuge der LZK-Betrachtung eine wiederkehrende Zahlungsgröße alle 20 Jahre anzunehmen. Durch die dynamische Investitionsrechnung sind diese Ausgaben abgezinst und unterscheiden sich daher in ihrer Höhe vom Betrachtungszeitpunkt t_0 aus (Abbildung 5). Wird nun unterstellt, dass die durchschnittliche Nutzungsdauer sich entgegen der ABBV-Angabe vermindert, so verschieben sich die erforderlichen Zahlungsströme hin zu einem früheren Zeitpunkt, was sich in der Höhe der benötigten Mittel und deren Vorhaltung auswirkt. Durch kürzere Nutzungsdauern erhöht sich die Anzahl der theoretischen Austausch- und Erneuerungszyklen im gesamten Lebenszyklus. Ein zusätzlicher Austausch ist in der Grafik der Abbildung 5 als exemplarisch schraffierter Bereich dargestellt.

¹⁴ Vgl. ABBV (2010), S. 866

¹⁵ Vgl. INTRAPLAN CONSULT (2017)

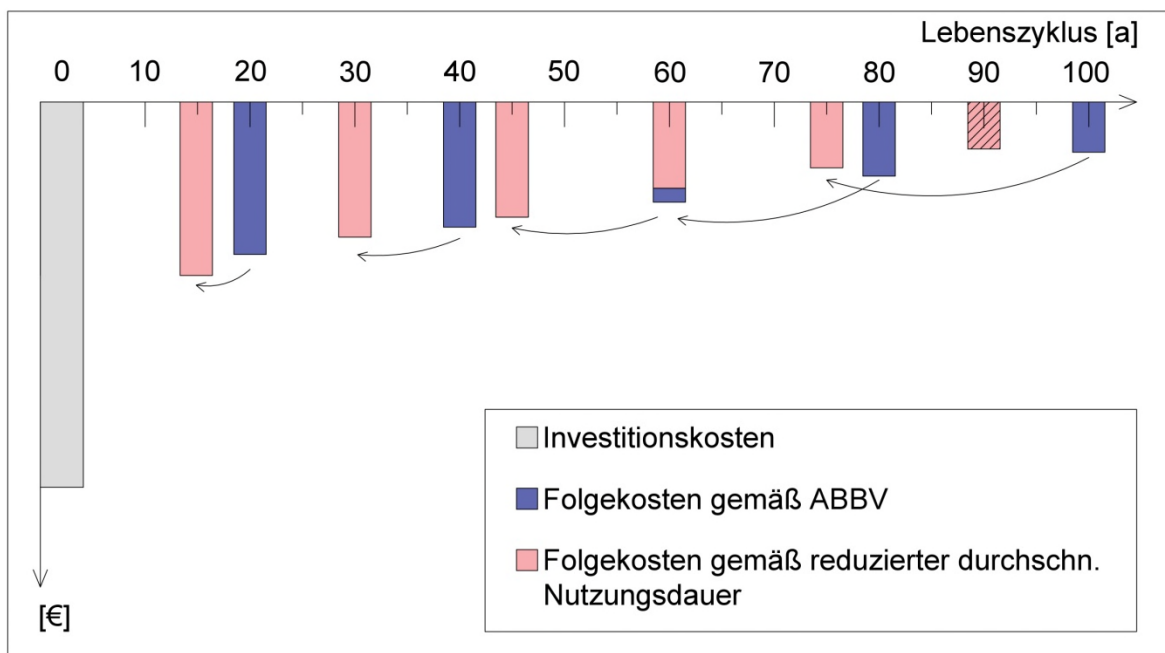


Abbildung 5: Verschiebung von Zahlungsströmen innerhalb des gesamten Lebenszyklus durch verkürzte Nutzungsdauern (exemplarisch)¹⁶

Erst durch eine verbesserte zeitliche Prognose von Kosten und deren Fälligkeit, kann eine strategische Erhaltungsplanung für einzelne Tunnelbauwerke, wie auch für den Gesamtbestand der Tunnelbauwerke abgeleitet werden.

3.2 Begriffsdefinitionen

Unter Nutzungsdauer wird in der Betriebswirtschaft der Zeitraum bezeichnet, in dem eine betriebliche Nutzung eines Anlagenguts unter typischen Eigenschaften möglich ist. Gemäß ABBV beginnt die Nutzungsdauer mit dem Jahr der verkehrsbereiten Fertigstellung der baulichen Anlage. Allerdings wird dort auch explizit darauf hingewiesen, dass es sich bei der Angabe um einen Erfahrungswert für eine mögliche Nutzungsdauer handelt, die unabhängig von der tatsächlichen Nutzungsdauer bei der Ablösungsberechnung anzuwenden ist.¹⁷

Auch unter Berücksichtigung der zunehmenden Anzahl von ÖPP-Projekten sowie einem älter werdenden Bauwerksbestand steigt die Relevanz eines wirtschaftlichen und vor allem planbaren Betriebs über einen langen Zeitraum, bei dem insbesondere die technische Ausstattung hohe Betriebs-, Unterhalts- und Erhaltungsaufwendungen aufweist. Die Kenntnis von Instandhaltungsaufwendungen nach Höhe und insbesondere Zeitpunkt hat somit eine besondere Bedeutung für die Mittelplanung und Mittelvorhaltung.

Daher ist es erforderlich, die tatsächliche Nutzungsdauer zu ermitteln. Dies erfordert eine differenziertere Betrachtung der Nutzungsdauern der einzelnen betriebstechnischen Komponenten unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Lebenszyklusaspekte.

¹⁶ Vgl. ADDEN, THEWES, LEHAN (2016), S. 10

¹⁷ Vgl. ABBV (2010), S. 862

3.3 Nutzungsdauer

Es existieren viele Einflüsse, die die Nutzungsdauer beeinflussen können. Für die betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung von Tunnelbauwerken sind die technischen, die wirtschaftlichen und die sozio-ökonomischen Einflüsse auf die Nutzungsdauer von Relevanz.

3.3.1 Technische Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer

Unter der technischen Nutzungsdauer ist der Zeitraum zu verstehen, in dem das entsprechende Ausstattungsdetail physisch zur Verfügung steht und den geforderten Eigenschaften entspricht. Die DIN 31051 beschreibt diese unvermeidbare Abnutzung als Abbau des Abnutzungsvorrates, hervorgerufen durch chemische und/ oder physikalische Vorgänge.¹⁸ Die betriebs- und sicherheitstechnische Tunnelausstattung hat im Vergleich zum Tunnelbauwerk, welches für Straßentunnel gemäß der ABBV eine Nutzungsdauer von 90 bis 130 Jahren, für ÖPNV-Tunnel 75 Jahre¹⁹, aufweist, eine kurze theoretische Nutzungsdauer von 20 Jahren. Die Tunnelausstattung muss im Rahmen des gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes meist mehrfach ersetzt werden und stellt damit einen wesentlichen Anteil an den Instandhaltungsaufwendungen dar. Die technische Nutzungsdauer ist von vielen Faktoren abhängig. Bei angemessener (und proaktiver) Instandhaltung kann die technische Lebensdauer über die theoretisch nach ABBV angesetzte Nutzungsdauer hinausgehen bzw. von ihr abweichen.

Für den Ansatz der technischen Nutzungsdauer sind zahlreiche Einflüsse zu betrachten, wie z.B.:

- Ausstattungseigenschaften (Materialermüdung, Korrosion),
- Umwelteinflüsse bzw. klimatische Einflüsse (Temperatur/ Wasser/ Chloridbelastung/ Schadstoffeinwirkungen/ Tunnelatmosphäre/ Verkehrseinwirkungen),
- Art und Umfang der Instandhaltung sowie regelmäßige Wartung,
- Planungsfehler/ Einbaufehler (Stand der Technik beachten).

Die wesentlichen Gründe, die zur (vorzeitigen) Erreichung der technischen Nutzungsdauer führen, sind der Verschleiß (Abnutzung), erwarteter und unerwarteter Defekt, (überhöhte oder besonders aufwändige) Reparatur, Ersatzteilproblematik und technische Überholung. Der Aspekt Ersatzteilproblematik rückt zunehmend bei technischen Anlagen in den Vordergrund, da hier aufgrund des schnellen technologischen Fortschritts Ersatzteile für ältere Komponenten nur begrenzt produziert und vorgehalten werden. Dies führt nicht selten dazu, dass ein Ausstattungsgegenstand nicht repariert werden kann und ein Komplettaustausch mit allen zusammenhängenden Komponenten erfolgen muss, da die Anlage ohne diese Komponente nicht weiterbetrieben werden kann – weit vor Ablauf der theoretischen technischen Nutzungsdauer.

Für den Ansatz der technischen Nutzungsdauer in der Lebenszykluskostenermittlung der verschiedenen Ausstattungskomponenten empfiehlt sich die Herstellerangabe unter Einbezug von Erfahrungswerten, wie auch die Berücksichtigung der Einflüsse, denen die Ausstattung unterliegt. Eine Empfehlung für differenzierte Ansätze der tatsächlichen

¹⁸ Vgl. DIN 31051 (2012), S. 7

¹⁹ Vgl. INTRAPLAN CONSULT (2017): Tabelle A1-17

Nutzungsdauer der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausstattung kann der Tabelle 1 entnommen werden.

3.3.2 Wirtschaftliche Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer

Die wirtschaftliche Nutzungsdauer gibt an, wie lange es ökonomisch sinnvoll ist, ein Wirtschaftsgut zu nutzen. Dies lässt sich im Bereich von Infrastrukturen schwer vorhersagen, da hier, anders als z.B. im Hochbau, wo die Anforderungen und Änderung der Nutzung sowie Renditeerwartungen einen höheren Stellenwert aufweisen als bei Infrastrukturbauwerken, die Verfügbarkeit ein wesentliches Kriterium darstellt. Die wirtschaftliche Nutzungsdauer ist kürzer als die technische Nutzungsdauer (maximal gleich).

Zur Ermittlung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer können folgende Einflüsse für die Tunnelausstattung relevant sein:

- Standort und Systemumgebung bzw. Funktion,
- Verfügbare Mittel,
- Verkehrsentwicklung,
- Schnittstellen, Interdependenzen,
- Synergien und Kosteneinsparungen bei der Bündelung von Maßnahmen.

Typische Gründe für das Ende der wirtschaftlichen Nutzungsdauer sind Technologiewechsel, Kompatibilitätsprobleme sowie technische Zwänge, Anpassungen oder Erweiterungen aufgrund von Kapazitätsengpässen oder die ökonomische bzw. energetische Optimierung.

Während sich die technische Nutzungsdauer auf der Basis von Herstellerangaben und Erfahrungswerten sowie unter Berücksichtigung von Einflussgrößen abschätzen lässt, gestaltet sich dies bei der wirtschaftlichen Nutzungsdauer schwieriger. Eine Berechnung auf Basis eines positiven Kapitalwertes ist bei unter Betrieb befindlichen Infrastruktureinrichtungen nicht zielführend, wie eingangs bereits erwähnt. Auch hier sind Erfahrungswerte bzw. ein Rückblick auf genannte Einflussgrößen in den letzten Jahren ein wesentliches Hilfsmittel und sollten lediglich dazu dienen, den Ansatz der gewählten Nutzungsdauer zu verifizieren und anzupassen.

3.3.3 Sozio-ökonomische Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer

Einen weiteren zu berücksichtigenden Aspekt stellen sozio-ökonomische Einflüsse auf die Nutzungsdauer dar. Sie beziehen sich gesellschaftlich auf das geforderte Sicherheitsniveau, welches zur Anpassung von Regelwerken und Normen führt.

Sofern die betriebs- und sicherheitstechnische Tunnelausstattung nicht mehr den Anforderungen genügt, ist sie an die geforderten Bedingungen anzupassen. Änderungen von Sicherheitsauflagen beenden somit ad hoc die Nutzungsdauer der betroffenen Ausstattung. Ein aktuelles Beispiel stellt das sicherheitstechnische Nachrüstungsprogramm dar, welches 2001 nach den vorangegangenen Brandereignissen in europäischen Straßentunneln durch den Bund mit einem Finanzvolumen von insgesamt ca. 1,2 Mrd. Euro²⁰ aufgesetzt und 2018 weitestgehend abgeschlossen wurde. Hier waren die

²⁰ Vgl. KOSTRZEWA (2015), S. 7

Bundesfernstraßentunnel zu klassifizieren und zu priorisieren und an den geänderten Stand der Regelwerke anzupassen. Im Zuge dieser Maßnahme wurden alle Tunnel nachgerüstet, auch neue Tunnel, die nach 2003 erstellt wurden. Solche Einflüsse lassen sich nicht vorhersagen, da sie, wie im genannten Fall, ereignisgetrieben sind.

Bei ÖPNV-Tunneln²¹ lassen sich ebenfalls mehrere Einflüsse identifizieren, die zu Forschungen, neuen Vorschriften und Nachrüstungen geführt haben und in Zukunft noch führen werden.

Durch die Novellierung des Personenbeförderungsgesetzes PBefG von 2013²² wurde die vollständige Barrierefreiheit des ÖPNV bis zum 01.01.2022 vorgeschrieben. Bei U-Bahnanlagen sind dadurch z.B. Nachrüstungen von mobilitätsgerechten Aufzügen, taktilen Leiteinrichtungen und barrierefreien Informationssystemen erforderlich geworden.

Durch die Modifizierung der Technischen Regeln für Brandschutz in unterirdischen Verkehrsanlagen TR Strab BS in 2014²³ muss eine brandschutztechnische Beurteilung des Bestandes erfolgen. In der Regel müssen Brandschutzkonzepte aufgestellt werden und der Nachweis der rechtzeitigen und sicheren Entfluchtung für jeden unterirdischen U-Bahnhof erbracht werden.

Die EU-Verordnung „Ökodesign-Anforderungen an Lichtquellen“ 2019/2020/EU²⁴ und das Verbot von Leuchtstoffröhren ab September 2023 machen die Erneuerung aller Beleuchtungsanlagen in unterirdischen Bahnanlagen und Bahnhöfen erforderlich.

Das gesellschaftlich veränderte Sicherheitsempfinden hat weitreichenden Einfluss auf die Überwachungstechnik in Bahnhöfen durch Videokameras und Aufzeichnungen, den Einsatz von Bewachungspersonal, den Rückbau bzw. Umbau von unübersichtlichen Ecken, Nischen, Säulen, Verkaufseinrichtungen in Bahnhöfen und auf die farbliche Gestaltung und Beleuchtung, um die subjektive Sicherheit zu erhöhen.

3.4 Ansätze für Nutzungsdauern

3.4.1 Straßentunnel

Elementar für eine Berechnung der Lebenszykluskosten ist, dass die Zeitpunkte, zu welchem Kosten entstehen, annähernd bekannt sind. Liegen die Zeitpunkte vor, so lassen sich die Kosten im finanzmathematischen Sinne als Kostenprognose verwenden. Tabelle 1 fasst anzusetzende Nutzungsdauern für die betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung von Straßentunneln aus verschiedenen Literaturquellen zusammen.^{25,26,27,28,29,30,31}

²¹ Gemeint sind alle unterirdischen Infrastrukturbauwerke von Stadtbahnanlagen.

²² PBEFG (2022)

²³ TRSTRABBS (2014)

²⁴ EU (2019)

²⁵ Vgl. ABBV (2010)

²⁶ Vgl. VOGT (2013)

²⁷ Vgl. PIARC (2004)

²⁸ Vgl. SIA (2004)

²⁹ Vgl. WELTE (2004)

³⁰ Vgl. FSV (2014)

³¹ Vgl. DMRB (1999)

Tabelle 1: Darstellung verschiedener Quellen zu Nutzungsdauern für die betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung von Straßentunneln³²

Nutzungsdauerangaben für die Ausstattung von Straßentunneln		Quellen						
		DE		PIARC	CH		AT	UK
		ABBV	Vogt		SN	Welte	RVS	DMRB
Tunnelausstattung	Modul							
	Beleuchtung	20		11,2	0-5			
	Einfahrtsbeleuchtung					20		
	Innenstreckenbeleuchtung	20				20		
	Leuchten			25-30			18	
	Vorschaltgeräte			15-20				
	Beleuchtung Querschläge/ Fluchtwege	20				20		
	Steuerung/ Regelung/ Messwerterfassung	12		10-15		15		
	Leuchtdichtemessung						15	
	 Lüftung	20		16,2	15-20			
	mechanische Längslüftung							
	Strahlventilatoren	35		20-25			18	
	mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren					20		
	Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren					20		
	Absaugung über steuerbare Klappen und separatem Abluftkanal	35						
	Lüftungsklappen			15-20				
	Axialventilatoren			25-30			30	
	mechanische Anlagenteile Axialventilatoren					30		
	Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren					20	10	
	Schalldämpfer			30-40				
	CO-Messung	12		20-25		15	13	
	Sichttrübungsmessgeräte	12		20-25		15	15	
	Regelung/ Steuerung			10-15		15		
	Strömungsmessung						20	
	Verkehrstechnische Einrichtungen	20						
	statische Verkehrszeichen	20				10		
	Wechselleuchtezeichen					10	14	
	Wechselverkehrszeichen							
	Wechselzeichengebersteuerung					10	14	
	Höhenkontrollen			10-15		10	15	
	Verkehrsdatenerfassung					10		
	Schrankenanlagen (Sperrschranken)	20					15	
	Dauerlichtzeichen			20-25		10	14	
	Wechselwegweiser			20-25		15	14	
	Messeinrichtungen				5-10			
	Längsgeschwindigkeitsmessung					15		
	Induktionsschleifen						13	
	Sicherheitseinrichtungen	20		14,8				
	Fluchtwegkennzeichnung	20				10		
	Orientierungsbeleuchtung					10		
	Leiteinrichtung	15						
	Brandmeldeeinrichtung			20-25				
	Manuelle Brandmeldeeinrichtungen	15						
	Branddetektion			5-10			5	
	Brandmeldeanlage (Kabel)	20				20		
	Brandmeldeanlage Steuerung					10		
	Brandbekämpfungseinrichtungen							
	Handfeuerlöscher			10-15		20	7	
	Löschwasserversorgung					20		
	Druckerhöhungsanlage	20						
	Hydrant	50		40-50			28	
	Stationäre Brandbekämpfungsanlagen						20	
	Lösch- und Bindemittelvorrat					20		
	Kommunikationseinrichtungen							
	Notrufeinrichtung	20				15		
	Notruftelefon (SOS-Nische)			20-25				
	Notausgangstür in die Schleuse	30						
	Videoüberwachung	15		10-15				
	Videoanlagen					10		
	Kamera						15	
	Monitor						10	
	Steuerungsequipment						20	
	Kabel						20	
	Tunnelfunk	20		15-20		15		
	Verkehrsfunk/ Radio				0-5			
	Lautsprecheranlage	15				20		
	Radio Antennenkabel					20	15	
	Telefon (Festnetz)			15-20		20	15	
	Zentrale Anlage	20		20,1				
	Energieversorgung	20						
	Netzanschluss/ Einspeisung			25-30				
	Mittelspannungsanlagen					25		
	Niederspannungsschaltanlagen			25-30		25	20	
	Niederspannungskabel				0-5		40	
	Ersatzstromversorgungsanlage (USV-Anlage)			20-25	10-15	15	15	
	Batterien mit Säurefüllung			15			5	
	Batterien mit Gelfüllung			10				
	Notstromaggregate					25	20	
	Kabel und Leitungen			25,7		15-20		
	Cu-Kabel					35-40		
	LWL-Verkabelung				20-25	5-10		
	Transformatoren				30-40	15-20	30	
	Erdung/ Blitzschutz/ Potentialausgleich						25	
	Steuerungsanlage (Leit-, Automatisierungstechnik und Überwachung)			10,7			18	
	Übergeordnetes Leitsystem				10-15			
	Verkehrsleitsystem				10-15			
	Leitstellen				15-20			
	Tunnelsteuerung		8					
	Leitrechner					15		
	Automatisierung					10		
	Prozessvisualisierung					10		
	Archivierung/ Datenauswertung					10		
	Raumlufttechnische Komponente					0-5		
	Lüftung					15		

³² Vgl. LEHAN (2017)

Einige Quellen geben dabei detaillierte Angaben zur Nutzungsdauer einzelner Ausstattungskomponenten und Anlagenteilen, andere wiederum geben eine durchschnittliche anzusetzende Nutzungsdauer für ein gesamtes Modul an. Zu berücksichtigen ist hier allerdings, dass bei einer weltweiten Betrachtung Ausstattungs- und Anforderungsniveaus stark variieren (insb. Angaben aus PIARC). Weiter ist zu beachten, dass mit dem Erreichen der Nutzungsdauer von Einzelkomponenten eines Moduls, wie z.B. bei einem technischen Defekt, der ganze Funktionsblock erneuert werden muss/ kann, wenn die wirtschaftliche Nutzungsdauer des Gesamtmoduls nicht mehr gegeben ist. Darüber hinaus wurde an ausgewählten Bauwerken für alle Ausstattungskomponenten analysiert, was die tatsächliche Nutzungsdauer betrug, bevor ein Austausch vorgenommen wurde. Diese realen Praxisdaten wurden um Angaben von Experteneinschätzungen und den Literaturangaben ergänzt. Der sich daraus ergebende Datensatz wurde in einem Teilmodul für ein Lebenszykluskostenprognosemodell statistisch unter Anwendung der Monte-Carlo-Analyse aufbereitet³³.

Aufgrund des sehr langen Prognosezeitraumes einer Lebenszyklusbetrachtung (Annahme Neubau bzw. Erstausrüstung) sind Abwägungen vorzunehmen in welcher Detailtiefe Berechnungen durchgeführt werden sollen. Der pauschale Ansatz nach der ABBV von 20 Jahren lässt nur eine sehr grobe Kostenschätzung zu. Die teilweise auf Einzelkomponenten von Funktionsblöcken abzielenden Angaben der Tabelle 1 könnten aber zu detailliert im Sinne einer Prognose sein. Eine geeignete Herangehensweise stellt daher die Betrachtung von Funktionsblöcken/ Titelgruppenebenen³⁴ bzw. Modulen dar.

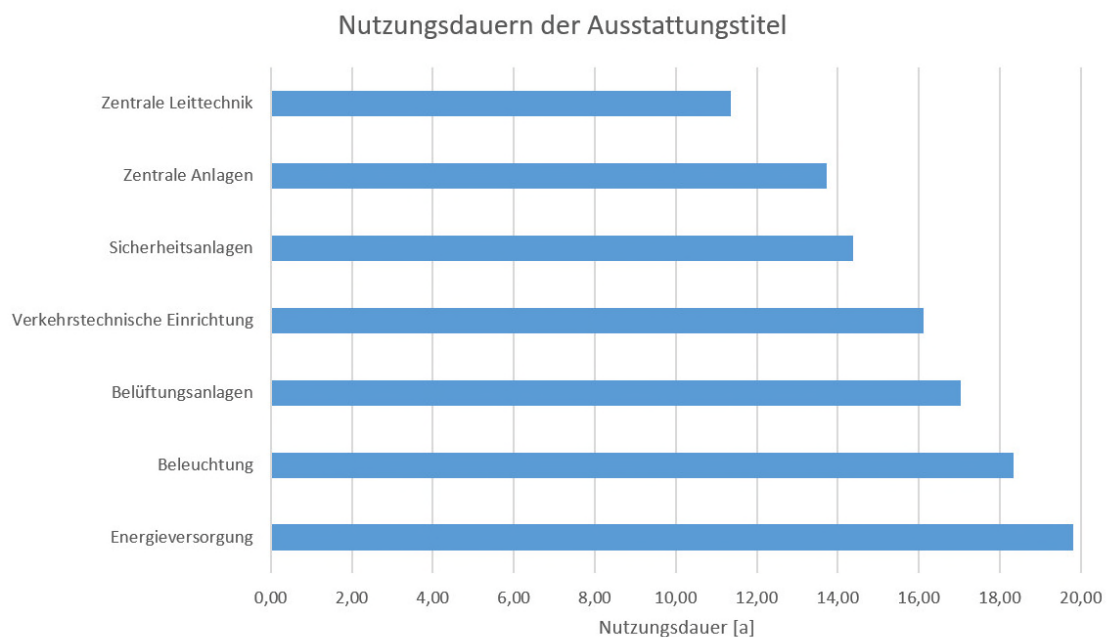


Abbildung 6: Wahrscheinlichkeitsbasierte Nutzungsdauern der Tunnelausstattung

Auf Basis des Datensatzes³⁵ wurden die in Abbildung 6 dargestellten Nutzungsdauern ermittelt. Es zeigt sich, dass keine Titelgruppe als Ganzes mehr als 20 Jahre Nutzung

³³ Vgl. LEHAN (2020)

³⁴ Funktionsblöcke nach EABT-80/100 (2019); im Rahmen der Analyse wurden die wesentlichen Ausstattungselemente in Titelgruppen (in nachfolgenden Kapiteln auch als Baugruppen bezeichnet) zusammengefasst.

³⁵ Vgl. LEHAN (2017)

aufweist, die Zentrale Leittechnik mit 11,4 Jahren sogar nur wenig mehr als die Hälfte der pauschalen ABBV-Angabe erreicht. Als besonders robust lassen sich Komponenten zur Energieversorgung bewerten.³⁶ Zur Erstellung einer genaueren Planungsgrundlage oder bei kürzeren Prognosezeiträumen empfiehlt sich eine Betrachtung auf einer detaillierteren Ebene (z.B. auf Modulebene, Abbildung 16).

Schließlich bleibt die Herausforderung, unter allen genannten Einflüssen eine für das jeweilige Bauwerk passende Rechengröße für die Nutzungsdauer anzusetzen, die alle äußeren Einflüsse sowie die Besonderheiten eines Bauwerks bestmöglich berücksichtigt und die gewählte Instandsetzungsstrategie widerspiegelt.

³⁶ Vgl. LEHAN (2020)

3.4.2 ÖPNV-Tunnel

Kommunale Verwaltungen sind zum großen Teil Eigentümerin von ÖPNV-Anlagen, wie z.B. U-Bahn- und Stadtbahntunneln oder sind über kommunale Tochtergesellschaften mit dem Bau und der Instandhaltung dieser Anlagen betraut. Für diese Verwaltungsorgane wurden 2008 die Regeln des Neuen Kommunalen Finanzmanagements (NKF) bzw. vergleichbare Regelungen eingeführt, welche die Basis des heutigen Finanz- und Haushaltswesens bilden. Hier werden investive Herstellungskosten und Erneuerungskosten und konsumtive Unterhaltungskosten, wie z. B. Wartungs-, Instandsetzungs- und Reinigungskosten, und auch Abschreibungs- und Nutzungsdauern festgelegt und erfasst.

Die Nutzungsdauern für die unterschiedlichen Bestandteile der ÖPNV-Tunnel sind gemäß der „NKF Rahmentabelle der Gesamtnutzungsdauer für kommunale Vermögensgegenstände“ in § 36 Abs. 4 KomHVO³⁷³⁸ geregelt (Abbildung 7):

- Rohbauanlagen (Tunnel, Rampen, Brücken ...): 70 - 80 Jahre
- Bahnhofs-Innenausbau (Böden, Decken, Verkleidungen, Möblierung ...): 20 - 30 Jahre
- Technische Anlagen 1 (Elektroanlagen, Beleuchtung ...): 20 - 30 Jahre
- Technische Anlagen 2 (IT-Anlagen...): 3 - 15 Jahre
- Technische Anlagen 3 (Klimaanlagen ...): 8 - 12 Jahre
- Betriebstechnische Ausrüstung (Gleise, Oberleitung, Zugsicherung, ...): 20 - 33 Jahre

Die kommunalen Eigentümer haben aus diesen Vorgaben eigene Bilanzierungshandbücher entwickelt.

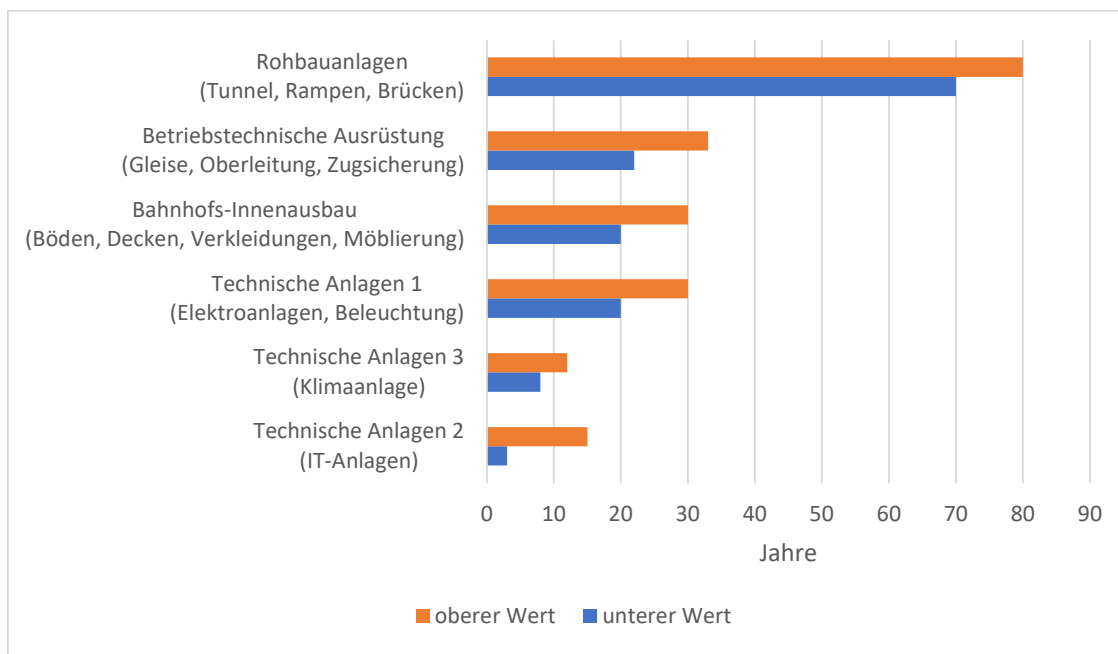


Abbildung 7: Vorgegebene Nutzungsdauern ausgewählter Bestandteile der ÖPNV-Tunnel

³⁷ KOMHVO (2018)

³⁸ MBI NRW (2005)

3.4.3 Nutzungsdauern Bahntunnel

Für die Nutzungsdauern im Bereich von Bahntunneln gibt es interne Aufstellungen, die nicht veröffentlicht sind.

3.5 Erhaltungs- und Instandhaltungsstrategien

Unter dem Einfluss der Nutzung der Bauwerks- und Ausstattungskomponenten (die in sinnvollen Funktionseinheiten als Module zusammengefasst werden, vgl. Kap. 5) wird nach DIN 31051³⁹ der Abnutzungsvorrat durch die Einwirkung chemischer und/oder physikalischer Vorgänge sukzessive abgebaut. Dem gegenüber stehen regelmäßige Maßnahmen der Instandhaltung und der Bauwerkserhaltung; sie erhöhen durch gezielte Maßnahmen den Abnutzungsvorrat in den unterschiedlichen Phasen der Nutzung eines Moduls. Exemplarisch sind verschiedene Alterungskurven unter Implementierung von Maßnahmen zur Anhebung des Abnutzungsvorrats farblich in Abbildung 8 hervorgehoben.

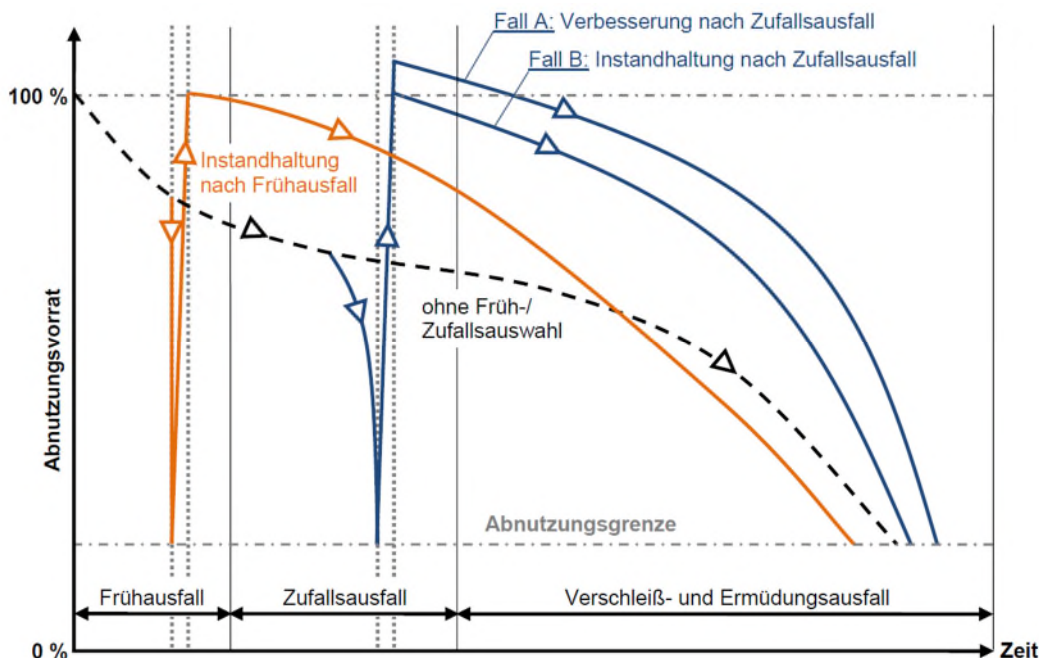


Abbildung 8: Abbau des Abnutzungsvorrats und Instandhaltungsmaßnahmen⁴⁰

Instandhaltungs- und Bauwerkserhaltungsmaßnahmen können auf unterschiedlichen Strategien basieren. Detaillierte Ausführungen enthält DIN EN 13306⁴¹, die die Instandhaltung in präventive und korrektive Maßnahmen unterteilt (Abbildung 9). Die präventive Instandhaltung kommt in festgelegten Abständen oder nach vorgeschriebenen Kriterien mit dem Ziel zur Anwendung, die Ausfallwahrscheinlichkeit zu verringern. Die korrektive Instandhaltung wird ausgeführt, sobald ein Fehler erkannt wird. Infolgedessen wird das Modul derart instandgesetzt, dass eine zukünftige Funktionserfüllung weiter möglich ist.

³⁹ Vgl. DIN 31051 (2012)

⁴⁰ Vgl. VOGT (2013)

⁴¹ Vgl. DIN EN 13306 (2018)

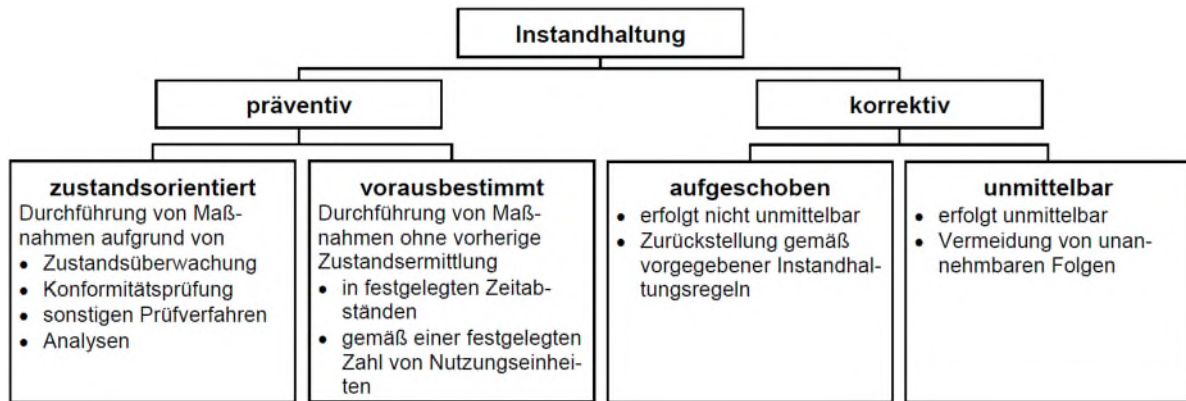


Abbildung 9: Untergliederung der Instandhaltung

Es ist das oberste Ziel der Instandhaltung, den Soll-Zustand eines Moduls beizubehalten und Ist-Zustände des Alterungsprozesses zu dokumentieren.⁴² Vor Erreichen der Abnutzungsgrenze sind Instandhaltungsmaßnahmen zu ergreifen, die den Soll-Zustand wiederherstellen oder ggf. übertreffen (Abbildung 9). Dies kann dadurch erreicht werden, dass eine zwischenzeitlich erfolgte technische Weiterentwicklung bessere Materialien hervorgebracht hat als jene Materialien, die bis zum (Beinahe-)Ausfall eingesetzt wurden.

Eine angemessene Ausfallwahrscheinlichkeit für jedes Modul spiegelt zum einen die Art des funktionalen Einsatzbereiches wider, zum anderen drückt sich dadurch die sicherheitstechnische Relevanz aus. Aus der sicherheitstechnischen Relevanz eines Moduls lässt sich folgern, ob ein Modul infolge eines irreparablen Ausfalls unverzüglich oder ggf. erst mit einem tolerierbaren Zeitversatz durch ein neues Modul zu ersetzen ist. Dies ist insbesondere davon abhängig, ob technische Redundanzen vorhanden sind und somit der Funktionsausfall innerhalb einer Übergangsfrist durch ein anderes Element übernommen werden kann.

Ein Element von hoher sicherheitstechnischer Relevanz kann bei Funktionsausfall eine Einschränkung des Tunnelbetriebs zur Folge haben. Ist das Modul von hoher sicherheitstechnischer Bedeutung, so ist im Weiteren danach zu differenzieren, ob es in hoher Stückzahl vorhanden ist oder ob es nur einige wenige Male zur Anwendung kommt. In hoher Stückzahl sind beispielsweise Leuchtmittel, Hinweistafeln, Handfeuerlöcher oder Befestigungsmittel zur Fixierung von Einbauteilen vertreten. Für diese Module, die dem Status 1 in Abbildung 10 angehören, ist davon auszugehen, dass sie als Ersatzteil dauerhaft vorgehalten werden. Module gemäß Status 2 in Abbildung 10, die in geringer Stückzahl z.B. in einem Straßentunnel verbaut sind und ggf. eine spezielle Anfertigung benötigen, sind Tunnelventilatoren, Rauchabzugsklappen, Sichtweitenmessgeräte oder Schranken zur Sperrung der Tunnelzufahrt. Die Wiederbeschaffung geht einerseits mit hohen Folgekosten, andererseits mit Lieferfristen in der Größenordnung mehrerer Wochen einher.

Eine Methodik, die den zuvor genannten Einflüssen Rechnung trägt, muss das Potenzial besitzen, eine theoretische Nutzungsdauer für ein spezifisches Modul valide abzuschätzen. Die Basis derartiger Zuverlässigkeitsuntersuchungen liegt in der Dokumentation der Zeitpunkte, zu denen ein spezifisches Modul seine Funktionsfähigkeit verliert. Wird davon ausgegangen, dass eine Instandhaltung des ausgefallenen Moduls unwirtschaftlich oder

⁴² Vgl. GÄNßMANTEL et al. (2005)

technisch unmöglich ist, erfolgt der Austausch. Für das Ersatzmodul muss die Forderung gelten, dass die Funktion, die es vor dem Ausfall übernommen hat, auch nach dem erfolgten Austausch sichergestellt wird.

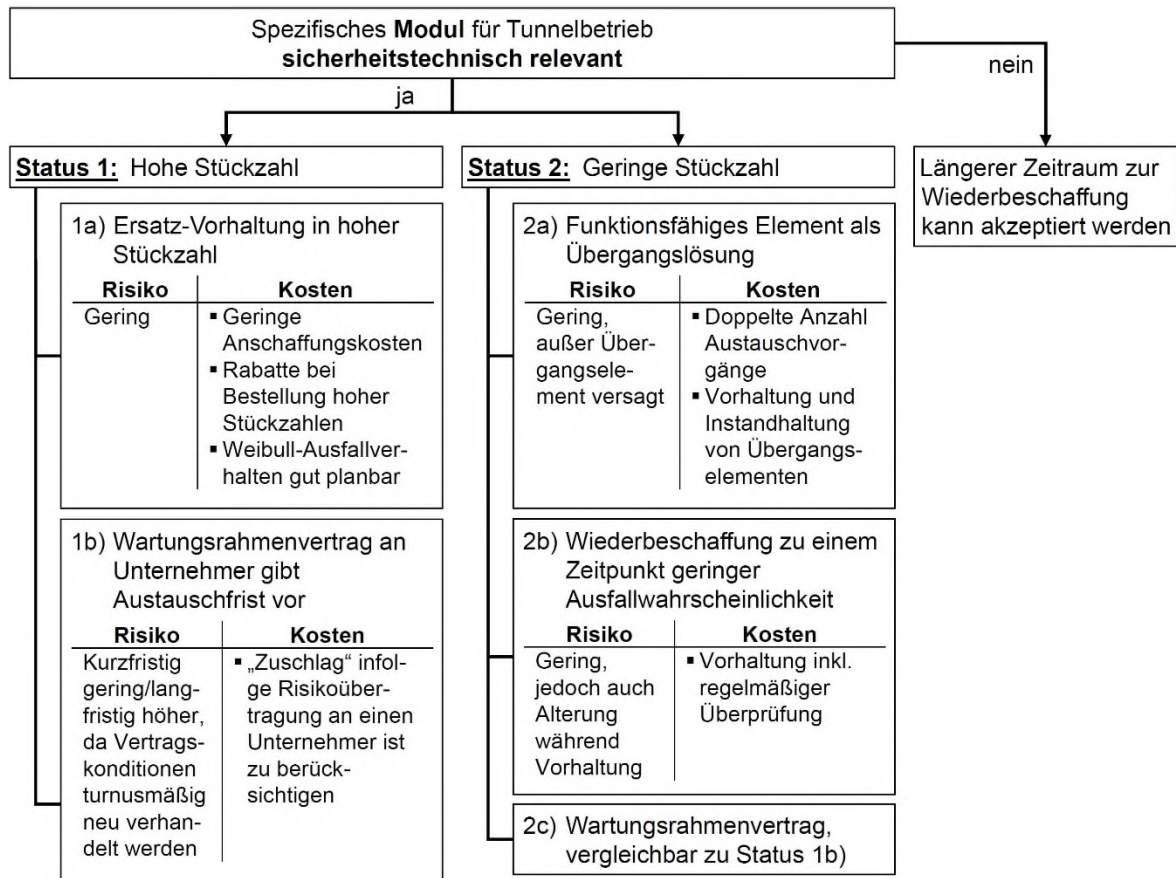


Abbildung 10: Umgang mit sicherheitstechnischer Tunnelausstattung⁴³

Die Kategorisierung von Modulen nach der sicherheitstechnischen Relevanz kann unterschiedliche Strategien im Hinblick auf die Instandhaltung eines Tunnelbauwerks auslösen. In Abhängigkeit von der gewählten Strategie variiert insbesondere die Wahl einer zweckmäßigen Ausfallwahrscheinlichkeit. Dabei besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen der gewählten Ausfallwahrscheinlichkeit und den Auswirkungen auf die Folgekosten in der Lebenszykluskostenberechnung.

Aufgrund der zuvor genannten Einflüsse (Nutzungsdauer, Instandhaltungsstrategien, Weiterentwicklung und Sicherheitsanforderungen) ist es erforderlich, regelmäßig einen Soll-Ist-Abgleich durchzuführen und ggf. Anpassungen vorzunehmen um den weiteren Lebenszyklus annähernd genau bestimmen zu können. Eine detaillierte Ausführung zur Instandsetzung von Verkehrstunneln gibt der STUVA-Arbeitskreis in seinem Sachstandsbericht Instandsetzungsstrategien und -verfahren für Verkehrstunnel⁴⁴.

⁴³ Vgl. VOGT (2013)

⁴⁴ Vgl. STUVA (2018)

4 Kapitalwertverfahren

4.1 Grundaussagen und -annahmen

In der Planungsphase von Investitionsvorhaben ist das Kapitalwertverfahren eine finanzmathematische Entscheidungsmethode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit einzelner Investitionen/Investitionsprogramme und wird zur Verfahrensauswahl im Sinne eines Variantenvergleichs eingesetzt.⁴⁵

Die Kapitalwertmethode kann in folgenden Entscheidungssituationen eingesetzt werden:

- Durchführung/Unterlassung einer Investition ohne Berücksichtigung alternativer Investitionsmöglichkeiten. Der Kapitalwert zeigt, ob das Investitionsvorhaben wirtschaftlich ist.
- Auswahl eines optimalen Investitionsobjektes aus einer definierten Menge autonomer, sich gegenseitig ausschließender Alternativen.
- Ermittlung der optimalen Nutzungsdauer bzw. des optimalen Ersatzzeitpunktes.
- Bestimmung von Umfang und Zusammensetzung eines optimalen Investitionsprogramms, das aus voneinander abhängigen Investitionsobjekten besteht.

Die wirtschaftliche Beurteilung alternativer Investitionsvorhaben kann nur dann methodisch korrekt umgesetzt werden, wenn diese hinsichtlich ihres Ziels, des Planungszeitraums, des Kapitaleinsatzes und der Umweltlagen vergleichbar sind.

Die Investition ist somit ein Vorhaben, das mit einer oder mehreren Anschaffungsauszahlungen beginnt und dessen Nutzung zu künftigen Einzahlungen und Auszahlungen führt.

Das Investitionskalkül enthält als Eingangsdaten

- alle mit dem Objekt verbundenen Ein- und Auszahlungen (Zahlungsreihen),
- die Zahlungszeitpunkte,
- den Ungewissheitsgrad der Zahlungen.

Als weitere Eingangsdaten sind mit Bezug auf den Investor auch sein(e)

- Zielsystem,
- Entscheidungsfeld (Alternativen, Nebenbedingungen),
- Risikoneigung als auch die
- Rechtsform (im Hinblick auf Haftungs- und Besteuerungsfolgen)

zu beachten.

4.2 Analytisches Standardmodell

Die wirtschaftliche Bewertung von Tunnelbauten befasst sich in der Regel nur mit der Ermittlung, Analyse und Optimierung der pagatorischen Initial- und Folgekosten; damit entspricht das Kapitalwertkalkül in diesem Anwendungsfall der Barwertberechnung einer

⁴⁵ Vgl. ADDEN, THEWES, LEHAN (2016)

Zahlungsreihe. Der Kapitalwert ist somit die Summe aller auf den Referenzzeitpunkt diskontierten Ein- und Auszahlungen, die mit der Investition, dem Tunnel, verbunden sind:

$$(1) \quad NPV = -a_0 + \sum_{t=1}^n c_t \cdot q^{-t}$$

mit:

NPV Net Present Value, Kapitalwert der Auszahlungen zum Zeitpunkt 0 (Ende der Lebenszyklusphase 1 = Planung und Herstellung)

*a*₀ Planungs- und Herstellungsauszahlungen⁴⁶ im Zeitpunkt 0, zugleich Diskontierungszeitpunkt *t*

*c*_{*t*} *c*_{*t*} = (*b*_{*t*} - *a*_{*t*}); Überschuss der Einzahlungen (*b*_{*t*}) über die Auszahlungen (*a*_{*t*}) in der Periode *t*

q: Diskontierungsfaktor (1 + *i*) mit *i* = Kalkulationszinsfuß

n: Nutzungsdauer des Investitionsobjekts mit *t* = 1, 2, *n* (in Jahren)

Bei uniformen Auszahlungen vereinfacht sich Formel (1) zu

$$(2) \quad NPV = -a_0 + c \cdot RBF_i^n$$

mit:

$$RBF_i^n = \frac{q^n - 1}{i \cdot q^n}$$

RBF Rentenbarwertfaktor

Auswahlkriterium:

$$NPV \geq 0$$

Ein Bauvorhaben ist umso wirtschaftlicher, je größer der Kapitalwert ist.

4.3 Entscheidungsrelevante Parameter

Auswahl des Kalkulationszinssatzes

Ist die mit dem Tunnelprojekt verbundene Auszahlungsreihe (Zahlungsreihe) gegeben, dann ist der Kapitalwert lediglich eine vom Kalkulationszinsfuß abhängige Größe. Der Kalkulationszinssatz, der über den Nutzungszeitraum des Tunnelprojekts konstant gehalten wird, hat somit einen entscheidenden Einfluss auf die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit. Ein hoher Zinssatz begünstigt Alternativen mit ausgeprägten Folge- und geringen Investitionskosten.

Bei Infrastrukturbauten mit langer Lebensdauer wird empfohlen, für den Kalkulationszinsfuß mit einem Wert zu rechnen, der sich an zumindest einer der ministeriellen Berechnungsbeispiele^{47,48,49} orientiert (Tabelle 2).

Tabelle 2: Zinssatzvorgaben BMF⁵⁰

Jahr	2005	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Zins [%]	4,3	4,0	3,3	3,4	3,3	3,1	2,3	1,7	1,3	1,0	0,7	0,6	0,5	0,5	0,7

⁴⁶ Planungs- und Herstellungskosten sind als Auszahlungen einzusetzen.

⁴⁷ Vgl. BMWSB (2015), BNB Kriterium Nr. 2.1.1, Anlage 4

⁴⁸ Vgl. BVWP (2030), Kapitel 12.1

⁴⁹ Vgl. ABBV (2010), Kapitel 2.4

⁵⁰ Nominalzinssätze in Prozent

Basisbewertung 0%

Um im Rahmen der praktischen Anwendung einen Referenzmaßstab für die Ergebnisqualität und -sensitivität zu haben, ist es erforderlich, für die Berechnungen des Kapitalwerts stets auch eine 0%-Variante der Kapitalwertfunktion aufzunehmen. Bei einem Kalkulationszinsfuß von 0% ist der Kapitalwert gleich der Summe der künftigen, nicht diskontierten Ein- und Auszahlungen.

Preisniveauänderungen und relative Preisänderungen

In den üblichen Anwendungsfällen unterscheiden sich die Preisänderungsraten der jeweiligen Auszahlungsgrößen. Außerdem können sie wie die allgemeine jährliche Inflationsrate/Deflationsrate im Zeitablauf variieren oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten einsetzen. Diese relativen Preisänderungen sind wie folgt zu berücksichtigen:

$$(3) \quad NPV = a_0 + \sum_{t=1}^n \frac{\prod_{t=1}^n c_t(1+p_{ct})}{\prod_{t=1}^n (1+p_t)(1+i_r)^t}$$

mit:

p_{ct} : Preisänderungen der jährlichen Auszahlungen

p_t : Änderungen der Inflationsrate/Deflationsrate im Zeitablauf

i_r : realer Kalkulationszinsfuß

$$NPV = -a_0 + \sum_{t=1}^n \frac{\prod_{t=1}^n b_t(1+p_{bt}) - \prod_{t=1}^n a_t(1+p_{at})}{\prod_{t=1}^n (1+p_t)(1+i_r)^t}$$

p_{at} : Preisänderungen der jährlichen Auszahlungen

p_{bt} : Preisänderungen der jährlichen Einzahlungen

p_t : Änderung der Inflationsrate/Deflationsrate im Zeitablauf

i_r : realer Kalkulationszinsfuß

Der Sonderfall einheitlicher Preisniveauänderungen, d.h. Inflation oder Deflation, führt zu gleichmäßigen Änderungen aller Preise im Kapitalwertkalkül und muss daher nicht berücksichtigt werden. Formel 4 zeigt, dass die Ein- und Auszahlungsgrößen und der Kalkulationszinsfuß der Höhe und Richtung nach gleich beeinflusst werden.

$$(4) \quad NPV = -a_0 + \sum_{t=1}^n \frac{b_t(1+p)^t - a_t(1+p)^t}{(1+i)^t \cdot (1+p)^t} \quad \Rightarrow \quad NPV = -a_0 + \sum_{t=1}^n \frac{b_t - a_t}{(1+i)^t}$$

mit:

p : einheitliche Inflations-/Deflationsrate

Risiko und Unsicherheit

Die erwarteten künftigen Ein- und Auszahlungsgrößen des Investitionsprojekts sind Planungswerte und können daher nicht mit Sicherheit vorausberechnet werden, der zu bestimmende Kapitalwert wird zu einer mehrwertigen Zielgröße. Der Ungewissheitsgrad der Eingangsparameter kann beim Kapitalwertverfahren grundsätzlich durch deterministische Korrekturverfahren, Sensitivitätsanalysen oder stochastische Verfahren der Risikoanalyse berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 6).

4.4 Erweiterungen des Standardmodells

Ergänzungsinvestitionen

Durch Berücksichtigung von Ergänzungsinvestitionen kann die Vergleichbarkeit von alternativen Investitionsvorhaben hergestellt werden, die sich

- in der Höhe und zeitlichen Verteilung der Ein- und Auszahlungen (b_t, a_t)
- der Planungs- und Herstellungsauszahlungen (a_0),
- in der Länge der Nutzungsdauern (n) und
- im Ungewissheitsgrad

unterscheiden.

Soweit zum Referenzzeitpunkt keine Pläne über die Verwendung der nicht benötigten Investitionsmittel sowie über den Ersatz der Anlagen nach Ablauf der Nutzungsdauer bestehen, wird im Rahmen der partialanalytischen Betrachtung mit einer „Neutralitätsannahme“ gearbeitet: Die Kapitalwertmethode unterstellt, dass der Kapitalwert eventuell zu berücksichtigender Ergänzungsinvestitionen Null ist, da die fiktive Wiederanlage möglicher Einzahlungsüberschüsse (im Falle von Konzessionsmodellen) zum Kalkulationszinsfuß erfolgt.

Finanzierung der Investition

Die Finanzierungsseite des Investitionsvorhabens wird im Standardmodell nicht betrachtet. Das Kapitalwertverfahren geht davon aus, dass dem Investor der benötigte Investitionsbetrag vollumfänglich zur Verfügung steht. Die Finanzierungsseite kann aber in das Investitionskalkül einbezogen werden, indem eine separate Zahlungsreihe aufgestellt wird, die eine Kapitalaufnahme mit anschließenden periodenbezogenen Tilgungsraten abbildet. Finanzierung und Investition unterscheiden sich letztlich nur durch das Vorzeichen ihrer periodenbezogenen Zahlungsgrößen.

4.5 Beurteilung der Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertmethode zur rechnerischen Umsetzung des Lebenszykluskostenkonzepts ist derzeit methodisch ohne praktikable Alternative. Die Ergebnisqualität der Berechnungen ist im konkreten Anwendungsfall davon abhängig, inwieweit Modifikationen des Standardmodells zu einer realitätsnahen Abbildung der konkreten Gegebenheiten eines Tunnelbauvorhabens führen.

Der Standardansatz ist als Partialmodell einfach und schnell zu handhaben. Die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit autonomer Investitionsvorhaben orientiert sich nur an der Zielgröße „Kapitalwertoptimierung“. Weitere Zieldimensionen - Liquidität, Beschaffungs- und/oder Finanzrestriktionen - werden nicht explizit berücksichtigt. Die Charakterisierung eines Investitionsobjektes durch die Zahlungsreihe vernachlässigt zunächst nichtmonetäre Größen, technologische, organisatorische und rechtliche sowie externe Effekte (Luftverschmutzung, Lärmbelästigung) können im Untersuchungsrahmen durch Monetarisierung berücksichtigt werden.

Die den Zahlungsgrößen zugrunde liegende Datenbasis für die Kapitalwertrechnung ist das pagatorische, auf Zahlungsgrößen basierende externe Rechnungswesen. Die Lebenszykluskostenrechnung ist systematisch der kalkulatorischen, internen Kosten- und Leistungsrechnung zuzuordnen. Die Verwendung der Kapitalwertberechnung ist dann umsetzbar, wenn auf pagatorische Kosten abgestellt wird.

5 Berechnung der Lebenszykluskosten

Zur Bestimmung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken ist in Abbildung 11 der strukturierte Verfahrensablauf dargestellt. Die einzelnen Teilschritte I bis VII werden in den nachfolgenden Absätzen 5.1 bis 5.7 erläutert.

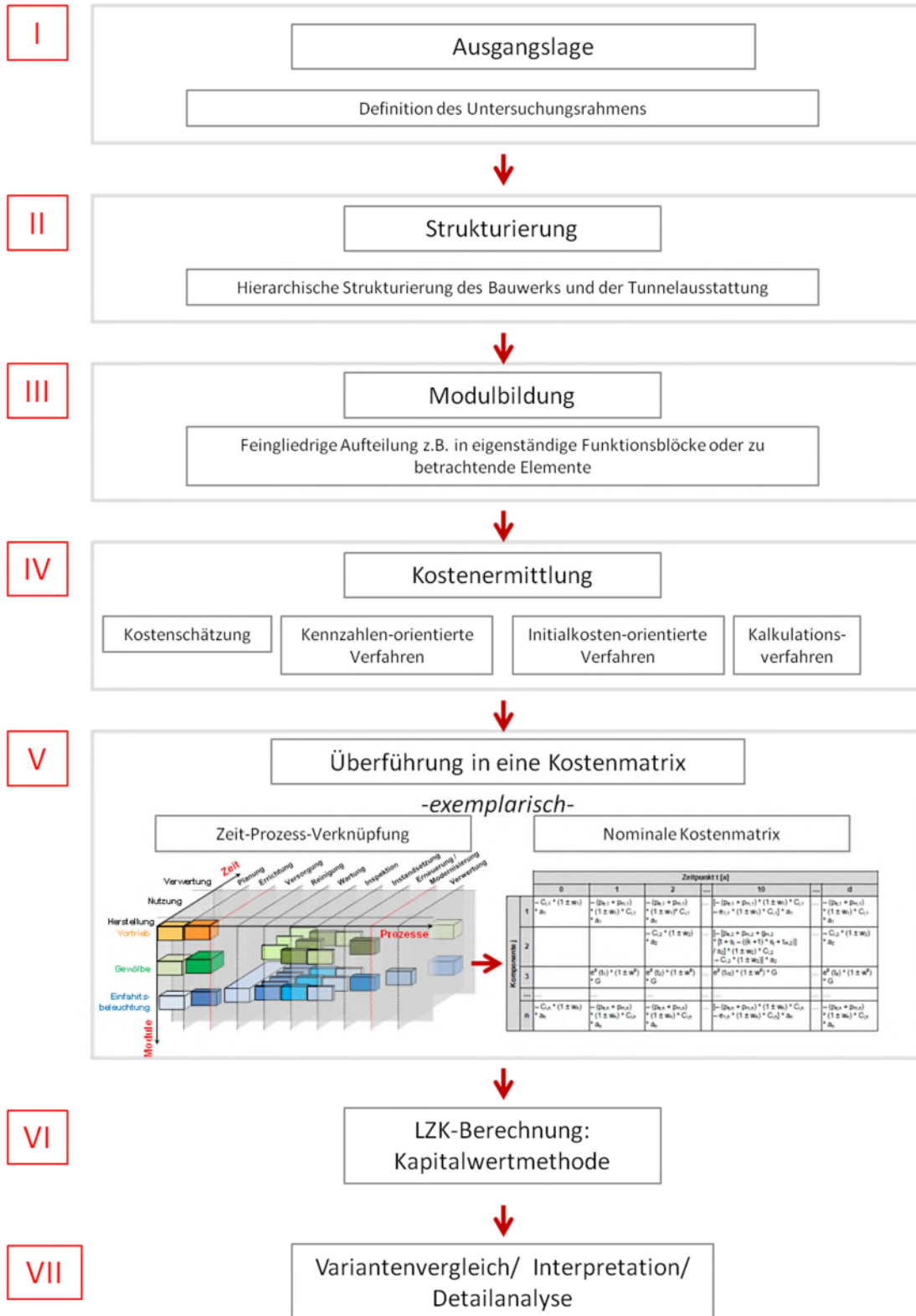


Abbildung 11: Verfahrensablauf zur Bestimmung der Lebenszykluskosten

Kern der Vorgehensweise ist die Strukturierung des Bauwerks in eigenständige Module sowie die Untergliederung des Lebenszyklus in die anfallenden Prozesse. Die Bestimmung der einzelnen Kostengrößen kann dabei, entsprechend der Zielstellung bzw. dem vorliegenden Kenntnisstand, auf Basis unterschiedlicher Verfahrensansätze vorgenommen werden.

5.1 Schritt I – Ausgangslage

Im Vorfeld einer Lebenszyklusanalyse ist eine Definition des Untersuchungsrahmens vorzunehmen (Abbildung 12). Dabei erfolgt ausgehend vom Untersuchungsgegenstand (Neubau oder Bestandsbauwerk) die Bestimmung der Ausprägung des Untersuchungsrahmens. Dazu ist auf Basis der vorliegenden Planungs- bzw. Informationstiefe sowie der verfolgten Zielstellung, die Betrachtungstiefe im Einzelnen festzulegen. Entsprechend des modularen Aufbaus kann der Umfang vom einzelnen Modul bis zum vollständigen Tunnelbauwerk sämtliche Ausprägungen umfassen. Dabei sind vertiefte Untersuchungen singulärer Bereiche, bei einer gleichzeitigen übergeordneten Betrachtung weiterer Einheiten realisierbar.

Die Festlegung des mit der Untersuchung verfolgten Ziels, beispielsweise einer Lebenszykluskostenrechnung zur Gesamtkostenoptimierung oder zur Budgetplanung, prägt wesentlich das weitere Vorgehen. Insbesondere die Bestimmung des relevanten Zeithorizonts für den Untersuchungsrahmen wird dadurch entscheidend beeinflusst.

Untersuchungsgegenstand	Ausprägung	Zielstellung	Zeitraumen
<ul style="list-style-type: none"> • Neubau • Bestand • Umbau • Instandsetzung • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Bauwerk • System • Baugruppe • Modul • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Kostenoptimierung • Kostenvergleich • Budgetplanung • Benchmarking • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • 100 Jahre • 25 Jahre • 10 Jahre • 2 Jahre • ...
Untersuchungsrahmen			

Abbildung 12: Definition des Untersuchungsrahmens

Für eine Gegenüberstellung von Bauwerksvarianten ist bei der Bestimmung des Untersuchungsrahmens grundsätzlich auf eine Vergleichbarkeit zu achten. Diese ist beispielsweise über ein äquivalentes Sicherheitsniveau, identische Leistungsklassen, vergleichbare Eingangsgrößen (z. B. Verkehrsaufkommen, zul. Höchstgeschwindigkeit usw. bei Straßentunneln bzw. Fahrgastaufkommen, Fahrzeuglänge, Bahnsteiglänge usw. bei ÖPNV-Tunneln) oder eine vollumfängliche Aufgabenerfüllung zu gewährleisten. Bei der Planung von ÖPNV-Tunneln ist zu berücksichtigen, dass mit dem Lichtraumprofil und Tunnelquerschnitt des größtmöglichen Fahrzeugs in dem entsprechenden Netz geplant werden muss, damit das Netz zukunftsfähig bleibt und das Projekt zuschussfähig ist.

5.2 Schritt II – Strukturierung des Bauwerks

Zur nachvollziehbaren Abbildung der Kosten von Tunnelbauwerken in einem Lebenszykluskostenmodell ist eine gezielte Strukturierung vorzunehmen. Für eine aktive Gestaltung der Gesamtkosten wird auf ein hierarchisch strukturiertes und modular aufgebautes Modell abgestellt. Modular bedeutet in diesem Zusammenhang, das System in weitestgehend unabhängige Einheiten zu zerlegen.

Durch diese Strukturierung wird erreicht, dass einzelne Elemente (Module) aufgrund der Unabhängigkeit und unter Berücksichtigung vorhandener Beziehungen isoliert einer Analyse unterzogen werden können. Daneben besteht die Möglichkeit, bereits entwickelte Lösungsansätze (Struktur, Module, Kosten etc.) auf andere Projekte zu übertragen. Zusätzlich erlaubt die hierarchische Strukturierung die Betrachtungen auf die vorliegende Planungs- und Informationstiefe individuell anzupassen.

Ausgehend vom Gesamtbauwerk können Tunnelbauwerke z.B. in die Teilsysteme Bauhilfsmaßnahmen, Baukonstruktion und Ausstattung unterteilt werden. Hierdurch wird eine verursachergerechte Zuweisung von Initial- und Folgekosten gewährleistet. Die Bauhilfsmaßnahmen bedingen aufgrund ihrer Einmaligkeit in aller Regel keine Folgekosten, können allerdings – insbesondere in urbaner Umgebung – einen großen Anteil der Gesamtherstellungskosten beanspruchen. Die Differenzierung zwischen Baukonstruktion und Tunnelausstattung trägt der sehr unterschiedlichen Ausprägung von Initial- und Folgekosten sowie der fachlich und zeitlich getrennten Planung und Umsetzung Rechnung. Übergeordnet werden die Module in Baugruppen hinsichtlich gleicher Funktion, Aufgabe bzw. Struktur zusammengefasst (Abbildung 13).

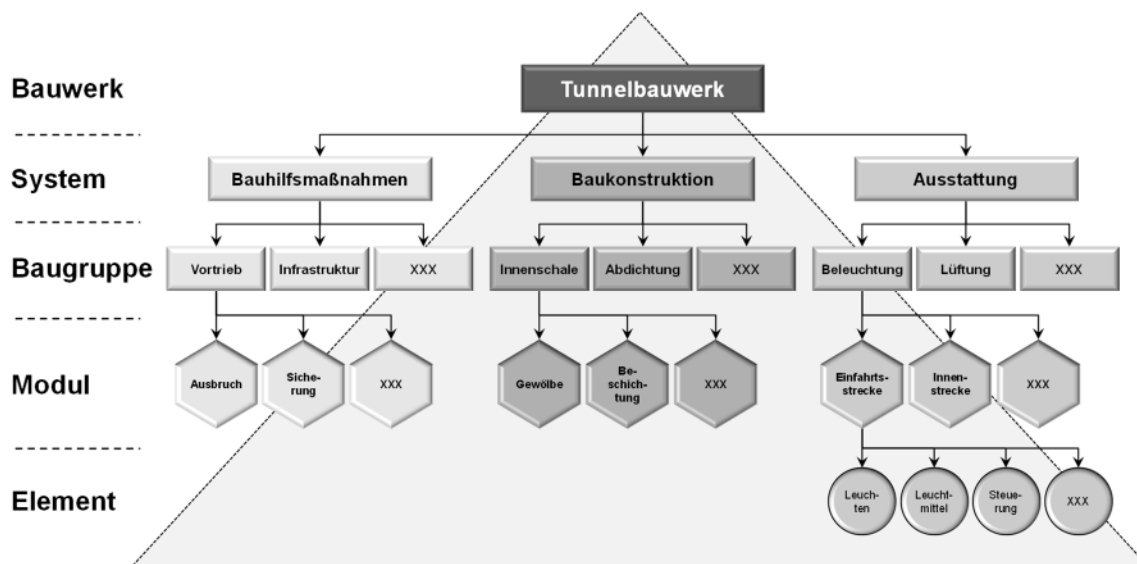


Abbildung 13: Hierarchisch-modulare Strukturierung von Tunnelbauwerken⁵¹

5.3 Schritt III – Modulbildung

Entsprechend der vorgenommenen Strukturierung setzt sich ein Tunnelbauwerk aus Modulen zusammen. Ein Modul selbst definiert sich über die zu erfüllende, technisch-funktionale Aufgabe und stellt eine weitgehend unabhängige Einheit dar.⁵²

⁵¹ Vgl. ENGELHARDT (2015)

⁵² Zur theoretischen Herleitung von Modulen sowie deren Abgrenzung über die Kriterien Unabhängigkeit und Integrität wird auf ENGELHARDT (2015), S. 95 ff. verwiesen.

5.3.1 Strukturierung der Module

Zur Gewährleistung einer Übertragbarkeit bzw. Vergleichbarkeit empfiehlt es sich, Module mit einem allgemeingültigen Aufbau (Abbildung 14) zu verwenden. Die dazu erforderlichen Attribute der einzelnen Module sind für die Bestimmung der Lebenszykluskosten möglichst vollständig zu erfassen.

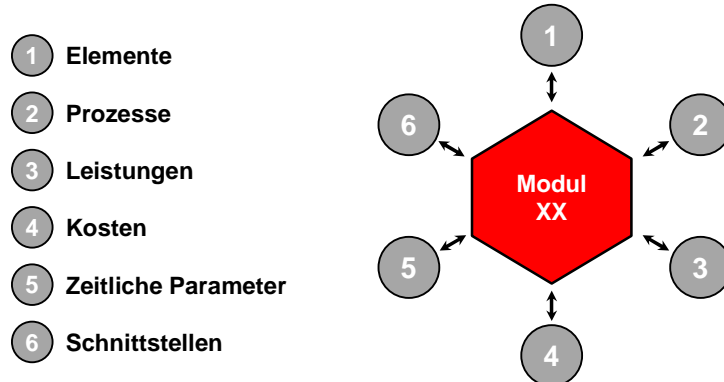


Abbildung 14: Interne Struktur eines Moduls⁵³

Elemente

Die wesentlichen Bestandteile (Elemente) des Moduls sind zu erfassen und gegenüber anderen Modulen abzugrenzen. Dabei sind alle Komponenten mit einer gemeinsamen technisch-funktionalen Aufgabe zusammenzufassen. Sollte ein Element für mehrere Aufgaben vorgesehen sein, ist die überwiegende Aufgabe entscheidend für die Modulzuordnung.

Zur Gewährleistung einer Vergleichbarkeit bzw. Übertragbarkeit hat eine exakte Erfassung und Spezifizierung der einzelnen Elemente zu erfolgen. Beispielsweise ist für die Beleuchtung zwischen den verwendeten Leuchtmitteln (Leuchtstoffröhren, Natriumdampf-Hochdrucklampen oder LED-Leuchtmittel) zu differenzieren. Um den Aufwand zur Datenerhebung zu beschränken, kann die Differenzierung, auf die die Kosten maßgeblich beeinflussenden Elemente eingegrenzt werden.

Prozesse

Die einzelnen Module durchlaufen, wie in Kapitel 2 ausgeführt, über die gesamte Lebensdauer eine Vielzahl an unterschiedlichen Prozessen. Für jedes Modul sind die relevanten Prozesse zu bestimmen und nach Umfang und Häufigkeit der jeweiligen Lebensphase zuzuordnen. Dabei können die Prozesse – je nach angestrebtem Zielhorizont – zu übergeordneten Prozessen zusammengefasst werden. Beispielsweise kann es sinnvoll sein, die Einzelprozesse Reinigung, Inspektion und Wartung zu einem Gesamtprozess zu aggregieren.

In Abbildung 15 sind Beispiele für Straßentunnel aufgeführt.

⁵³ Vgl. ENGELHARDT (2015)

Bauwerk				Prozesse						
System	Baugruppe	Module		Planung	Bau	Betriebliche Unterhaltung	Bauliche Unterhaltung	Instandsetzung	Modernisierung	Verwertung
				Ausstattung		Wartung und Inspektion		Instandsetzung	Verbesserung und Erneuerung	Versorgung / Überwachung
Mustertunnel	Baukonstruktion	Innenschale	Gewölbe	x	x	x	x	x	-	-
			Sohle	x	x	-	-	-	-	-
			Beschichtung	x	x	-	x	-	x	x
			Querschlag	x	x	x	x	x	-	-
			Zwischendecke	x	x	x	-	x	-	-
		Verkehrsweg	Fahrbahn	x	x	x	x	x	-	-
			Unterbau	x	x	-	x	x	-	-
			Querschlag	x	x	x	x	-	-	-
		Abdichtung	Regenschirmabdichtung	x	x	-	-	-	-	-
			Ulmendrainage	x	x	x	x	x	-	-
	Wasserhaltung	Tunnelentwässerung	x	x	x	x	x	x	-	
		Gewässerschutzanlage	x	x	x	x	x	x	-	
		Betriebszentrale	x	x	-	x	x	-	-	
	Betriebsbauwerk	Betriebsstation	x	x	x	x	x	x	-	
		Elektronische	x	x	x	x	x	-	-	
	Ausstattung	Beleuchtung	Einfahrtsbeleuchtung	x	x	x	x	x	x	x
			Durchfahrtsbeleuchtung	x	x	x	x	x	x	x
			Pannerbuchten	x	x	x	x	x	x	x
			Flucht- und Rettungswege	x	x	x	x	x	x	x
Lüftung		Lüftungsanlage	x	x	x	x	x	x	x	
		statische Verkehrszeichen	x	x	x	-	x	-	-	
Verkehrstechnik		Verkehrssichtsignalanlage	x	x	x	x	x	x	x	
		Wechselverkehrszeichen	x	x	x	x	x	x	x	
		Wechselwegweiser	x	x	x	x	x	x	x	
		Höhenkontrolle	x	x	x	x	x	x	x	
		Verkehrsdatenerfassung	x	x	x	x	x	x	x	
Sicherheitstechnik		Videüberwachung	x	x	x	x	x	x	x	
		Verkehrsleiteinrichtung	x	x	x	x	x	x	x	
		Fluchtweghinweiszeichen	x	x	x	x	x	x	x	
		Notrufanlage	x	x	x	x	x	x	x	
		Brandmeldeeinrichtung	x	x	x	x	x	x	x	
		Brandbekämpfung	x	x	x	x	x	x	x	
		Tunnelfunk	x	x	x	x	x	x	x	
Zentrale Anlagen		Mobilfunk/GSM-Netz	x	x	x	x	x	x	x	
		Verkehrsfunk	x	x	x	x	x	x	x	
	Beschallungsanlage	x	x	x	x	x	x	x		
	Stromversorgung MSP	x	x	x	x	x	x	x		
	Stromversorgung NSP	x	x	x	x	x	x	x		
	Trallo	x	x	x	x	x	x	x		
	Schalt- / Steuerungsanlage	x	x	x	x	x	-	-		
	USV-Anlage	x	x	x	x	x	x	x		
	Beleuchtung Betriebsbauwerk	x	x	x	x	x	x	x		
	Lüftungsanlage Betriebsbauwerk	x	x	x	x	x	x	x		

Legende nicht zu bearbeiten zu bearbeiten

Abbildung 15: Beispielhafte Zuordnung Prozesse und Module für einen Straßentunnel

Leistungen

Zur Schaffung von Transparenz sowie dem notwendigen Verständnis für die Kostenauslöser sind die Leistungen und deren Umfang für die einzelnen Prozesse zu bestimmen. Hierfür kann auf unterschiedliche Quellen zurückgegriffen werden, beispielsweise:

Allgemein

- Standardleistungsbuch (STLB-Bau⁵⁴)
- Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken (RI-ERH-ING⁵⁵)
- ZTV-ING⁵⁶, ABBV⁵⁷, RWVZ⁵⁸, RWVA⁵⁹, DIN 1076⁶⁰ usw.

⁵⁴STLB (2019)

⁵⁵RI-ERH-ING (2021)

⁵⁶ZTV-ING (2022)

⁵⁷ABBV (2010)

⁵⁸RVVZ (1997)

⁵⁹RWVA (1997)

⁶⁰DIN 1076 (1999)

Straßentunnel

- Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT⁶¹)
- Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen⁶²
- Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT⁶³)
- Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h (EABT)⁶⁴

ÖPNV-Tunnel

- Bau- und Betriebsordnung für Straßenbahnen (BOStrab)⁶⁵
- Technische Regeln Tunnel (TR Tunnel)⁶⁶
- Technische Regeln Elektro-Anlagen (TR EA)⁶⁷
- Technische Regeln Brandschutz (TR Strab BS)⁶⁸

Eisenbahntunnel einschließlich Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV)

- Ril 853 – Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten⁶⁹
- VV Bau des Eisenbahnbundesamtes⁷⁰
- Allgemeines Eisenbahngesetz⁷¹

Kosten

Für die in den Prozessen zu erbringenden Leistungen sind die Kosten zu erfassen. Diese sind aus Gründen der Einheitlichkeit als Nettobeträge zu bestimmen. Abhängig vom Planungs- und Informationsstand zur Kostenerhebung kann auf verschiedene Möglichkeiten der Kostenplanung zurückgegriffen werden (vgl. Kapitel 5.4).

Können Kosten einem Prozess bzw. einem Modul nicht direkt zugeordnet werden, beispielsweise für Wartung und/oder Reinigung, so hat eine Bestimmung des maßgebenden Prozesses bzw. Moduls und eine entsprechende Kostenzuweisung zu erfolgen. Alternativ sind die Prozesse zusammenzufassen bzw. sind Module in der übergeordneten Strukturebene (Baugruppe bzw. System) zu berücksichtigen.

Zeitliche Parameter

Der Wert einer monetären Größe ist vom Anfallszeitpunkt geprägt. Hierdurch ist es erforderlich – neben der Häufigkeit – auch die jeweiligen Zeitpunkte zu berücksichtigen, an denen die Leistungen, respektive die Kosten, für die einzelnen Prozesse anfallen. Dies wird durch die Implementierung der Kapitalwertmethode – vgl. Kapitel 4 – sichergestellt.

Für zyklische Prozesse, bspw. Reinigung oder Inspektion, sind die zeitlichen Parameter in vielen Fällen durch rechtliche oder betriebstechnische Vorgaben gesichert

⁶¹ M KWPT (2015)

⁶² BMVI (2021)

⁶³ RABT (2006)

⁶⁴ EABT-80/100 (2019)

⁶⁵ BOSTRAB (2019)

⁶⁶ TRTUNNEL (2015)

⁶⁷ TRSTRABEA (2011)

⁶⁸ TRSTRABBS (2014)

⁶⁹ RIL853 (2018)

⁷⁰ VVBAU (2013)

⁷¹ AEG (2020)

prognostizierbar.⁷² Komplexer ist die Bestimmung der Zeitpunkte von azyklischen Prozessen, z. B. für die Erneuerung einzelner Bauteile. Hierauf wurde bereits in Kapitel 3 näher eingegangen.

Schnittstellen

Die Module sind zwar unabhängig voneinander auszubilden, allerdings sind die gegenseitigen Wechselwirkungen der Module bzw. Prozesse als Attribute zu berücksichtigen. Zusätzlich gilt es, die wesentlichen Einflussparameter, wie z. B. den Reflexionsgrad der Innenschale, die Leuchtdichte im bzw. vor dem Tunnel, die Tunnellänge usw. zu bestimmen.

5.3.2 Beispiele für Module Straßentunnel

Aus Abbildung 16 geht beispielhaft die hierarchische Gliederung für Straßentunnel gemäß der Strukturierung „Bauwerk – System -Baugruppe – Modul“ hervor.

Bauwerk	System		
	System	Baugruppe	
		Baugruppe	Module
			Module
Mustertunnel	Baukonstruktion	Innenschale	Gewölbe
			Schle
			Beschichtung
			Zwischendecke
		Verkehrsweg	Fahrbahn
		Unterbau	
	Abdichtung	Regenschirmabdichtung	
	Wasserhaltung	Ulmendrainage	
		Tunnelentwässerung	
	Betriebsbauwerk	Betriebszentrale	
		Elektronische	
	Ausstattung	Beleuchtung	Einfahrtsbeleuchtung
			Durchfahrtsbeleuchtung
			Pannenbuchten
			Flucht- und Rettungswege
		Lüftung	Lüftungsanlage
		Verkehrstechnik	statische Verkehrszeichen
			Verkehrslightsignalanlage
			Wechselverkehrszeichen
			Wechselwegweiser
Sicherheitstechnik		Videoüberwachung	
		Verkehrsleiteinrichtung	
		Fluchtweghinweiszeichen	
		Notrufanlage	
		Brandmeldeeinrichtung	
	Brandbekämpfung		
Zentrale Anlagen	Tunnelfunk		
	Mobilfunk/GSM-Netz		
	Verkehrsfunk		
	Beschallungsanlage		
	Stromversorgung MSP		
	Stromversorgung NSP		
Trafo			
Schalt- / Steuerungsanlage			
USV-Anlage			

Abbildung 16: Beispielhafte Ausgestaltung der Module für Straßentunnel

⁷² Beispielsweise durch das Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT), die Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), DIN 1076 (1999) usw.

5.3.3 Beispiele für Module ÖPNV-Tunnel

Bei der Modularisierung dient die typische Gewerkeaufteilung einer Stadtbahnanlage als Grundlage. Auf diese Weise werden zusätzliche spekulative Aufteilungen von vorliegenden Kosten vermieden. Zunächst wird das Bauwerk in drei Systeme unterteilt: die baulichen Anlagen, die technischen Anlagen und die betriebstechnischen Anlagen. In einer Masterarbeit an der Ruhr-Universität Bochum⁷³ wurde dazu ein reales Objekt betrachtet. Insgesamt umfasste das untersuchte Projekt 81 Module, für die unterschiedlich viele Kosteninformationen vorlagen (Abbildung 17 bis Abbildung 19).

Lfd.Nr.	System	Baugruppe	Modul	Abkürzung / Synonym / Elemente
1	Bauliche	Rohbau	Erdbau	Aushub
2	Anlagen		Stahlbetonbau	Bf., Rampe, Tunnel, Notausstiegs-Schacht, Betoninstandsetzung, Abdichtungsinjektion
3			Tunnelbau	Vortrieb, Innenschale
4			Stahlbau	
5			Gerüste, Baubehelfe	
6			Baugrubensicherung	Verbau
7			Spezialtiefbau	
8			Baustelleneinrichtung	BE
9			Wasserhaltung	
10			Abdichtung	Außenabdichtung, Fugenabdichtung
11			Kanalbau	
12			Leitungsbau	Versorgungsleitungen, Stadtwerke, Telekom, Unitymedia etc.
13			Straßenbau	Oberflächen Wiederherstellung
14			Lichtsignalanlagen	LSA im Zuge des Straßenbaus
15		Ausbau	Estrich	
16			Fliesen	
17			Natursteinarbeiten	
18			Trockenbau und Mauerwerk	Innenwände
19			Putzarbeiten	
20			Maler- und Beschichtungsarbeiten	
21			FH-Türen	
22			Türanlagen	Raum- und Gebäudetüren (nicht FH)
23			Metallbau	Wandverkleidung, Paneeldecken, Handläufe, Geländer, Gitterroste
24			Glasbau	
25			Stahlbau	Fluchtwege im Gleisbereich, Fluchttreppenhaus, Dachbau
26			Dachabdichtung	Dachdeckerarbeiten
27			Aufzugseinhausung	Aufzugseinhausung und Aufzugschachtüren
28			Beschilderung	
29			Möblierung	Schlosserarbeiten Ausstattung
30			Vitrinen	
31			Landschaftsbau	Außenanlagen
32			Bauendreinigung	
33			Leitungs-Trassenausbau	Wandhalter, Kabeltröge, Kabelkanäle
34			Taubenvergrämung	
35			Reinigung	Reinigung der Bahnhöfe und Einrichtung
36			Graffiti-beseitigung	Graffitischutz und -beseitigung
37			Beseitigung Vandalismusschäden	
38			Bewachung	
39			Versicherung	

Abbildung 17: Module der baulichen Anlagen⁷⁴

⁷³ Vgl. FREIMANN (2020)

⁷⁴ Vgl. FREIMANN (2020)

Lfd.Nr.	System	Modul	Abkürzung / Synonym / Elemente
40	Technische	Elektrische Durchverbindung	Erdung
41	Anlagen	Hauptverteilung	
42		Unterverteilung	Elektroarbeiten
43		Beleuchtung/Elektrounterhaltung	öffentliche Beleuchtung im Bahnhof (Gleisebene, Verteilerebene)
44		Beleuchtung	Betriebsraumausstattung
45		Rolltore	
46		Lüftungsanlage	
47		Klimaanlage	
48		Heizungsanlage	
49		Sanitäranlage	Frischwasser, Abwasser, WCs, Bauwerksentwässerung
50		Pumpen- und Hebenanlagen	
51		Baulicher Brandschutz	Brandschotts, Brandschutzklappen, Rauchmelder, Brandmeldeanlage, BMZ
52		Rauchschränke / Entrauchung	Rauchrückhaltung
53		Fluchtwegbeschilderung	
54		Trockenlöschleitung	TLL, Feuerlöschleitung
55		Feuerwehr-Schlüsseldepot	FSD, Schlüssel-Safe

Abbildung 18: Module der technischen Anlagen⁷⁵

Lfd.Nr.	System	Modul	Abkürzung / Synonym / Elemente
56	Betriebstechnische	Gleisbau	Gleise, Weichen, Oberbau
57	Anlagen	Oberleitung	Fahrleitungssystem
58		Aufzüge	
59		Fahrtreppen	
60		Zugsicherung	Signalanlagen, Nothalt, Verkabelung
61		Energieversorgung	Unterwerke
62		Mittelspannungsanlage	
63		Trafos	
64		Unterbrechungsfreie Stromversorgung	USV, ESV
65		Batterien	
66		Netzersatzanlage	Notstromaggregat (Diesel)
67		Fernmeldeanlage	FM-Kabel, FM-Schränke
68		Telefon- und Notrufeinrichtung	
69		Automatische Betriebsführung	ABF
70		Fernwirktechnik	
71		Netzleittechnik	
72		Uhren-Anlage	
73		TV-Anlage mit Netzwerk	Videoanlage
74		Elektrische Lautsprecheranlage	ELA, Elektro-akustische Anlage
75		Dynamische Fahrgast-Information	DFI, Zugzielanzeiger
76		Fahrausweisautomaten	FAA, Fahrkartenautomaten
77		Fahrausweisentwerter	FAE, Entwerter
78		Rechnergesteuertes Betriebsleitsystem	RBL
79		Betriebsfunk	Digitalfunk
80		BOS-Funk	Funk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
81		WLAN / Mobilfunk	Kundenanbindung / Handy-Netze

Abbildung 19: Module der betriebstechnischen Anlagen⁷⁶⁷⁵ Vgl. FREIMANN (2020)⁷⁶ Vgl. FREIMANN (2020)

5.4 Schritt IV – Verfahren der Kostenermittlung

Zur Bestimmung der Kosten für die einzelnen Module bzw. für die übergeordneten Systemebenen kann, abhängig vom Planungs- und Informationsstand oder der verfolgten Zielstellung, auf unterschiedliche Ansätze zurückgegriffen werden.

Kostenschätzung

Bei der Bestimmung der Kosten für die einzelnen Module ist auf Erfahrungswerte zurückzugreifen. Hier besteht die Möglichkeit, von bestehenden Bauwerken Ansätze – unter Einbeziehung der Randbedingungen – zu adaptieren bzw. fortzuschreiben. Das Verfahren bietet sich insbesondere für sehr frühe Projektphasen an, in denen nur unscharfe, übergeordnete Kenntnis über die spätere Ausprägung des Bauwerkes und die Nutzung vorliegt. Mit steigendem Wissensstand sollte jedoch auf andere, detailliertere Verfahren zurückgegriffen werden.

Kennzahlen-orientierte Verfahren

Kennzahlen-orientierte Verfahren greifen zur Kostenermittlung auf abgeleitete Kenngrößen von real existierenden Bauwerken bzw. Prozessen und deren Datensammlung zurück. Dabei ist zwischen absoluten und relativen Kennzahlen zu differenzieren. Wesentlich bei der Anwendung dieses Verfahrens ist die Kenntnis über die maßgeblichen Einflussgrößen für die Kennzahl und daraus abgeleitet deren Übertragbarkeit auf die vorliegenden Randbedingungen. Als Beispiel für Straßentunnel ist bei der Anwendung der Kenngröße für den jährlichen Energiebedarf der Durchfahrtsbeleuchtung (z. B. kWh/m) u.a. entscheidend, auf Basis welcher Leuchtdichte oder Leuchtmittel die Kennzahl im Verhältnis zum Anwendungsfall ermittelt wurde.

Initialkosten-orientierte Verfahren

Bei initialkostenorientierten Verfahren werden die Folgekosten auf Basis von prozentualen Anteilen der Initialkosten abgeleitet. Dabei kann sowohl auf Literaturgrößen (z. B. ABBV⁷⁷) als auch auf abgeleitete Kenngrößen von bestehenden Tunnelbauwerken (z. B. FGSV⁷⁸ bzw. eigene Dokumentation von Bauwerksbetreibern) zurückgegriffen werden. Eine detaillierte Sammlung von Tunnelrohbau- und -ausstattungskosten sowie den zugehörigen jährlichen Betriebskosten wurde von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen⁷⁸ zusammengetragen. Aus dieser Datensammlung können – unter Beachtung des jeweiligen Preisstandes – für verschiedene Module Abschätzungen zu den jährlich zu erwartenden Folgekosten als Faktor zu den Initialkosten abgeleitet werden. Dieses Vorgehen knüpft unmittelbar an das in Kapitel 2.3 erläuterte Substitutionsprinzip an und macht die Abhängigkeit der Folge- von den Initialkosten auf Modulebene deutlich.

Für ÖPNV-Tunnel und für Bahntunnel gibt es vergleichbare allgemeine Daten nicht. Die Betreiber greifen jeweils auf eigene Erfahrungen zurück.

Kalkulationsverfahren

Die kalkulatorischen Verfahren sind angelehnt an die im Bauwesen übliche Kalkulationsmethodik. Die Kosten ergeben sich aus den Einzelkosten der Teilleistungen und können dabei nach Möglichkeit entsprechend den Kostenarten (Lohn, Gerät, Material, Nachunternehmer usw.) untergliedert werden (siehe Beispiele in Kapitel 7 und 8). Da die

⁷⁷ Vgl. ABBV (2010)

⁷⁸ Vgl. FGSV (1996)

Kosten ausgehend von der zu erbringenden Leistung bestimmt werden, lassen sich diese dem Kostenträger (Modul bzw. Prozess) direkt zuordnen.

Zur Bestimmung der Kalkulationsansätze empfiehlt es sich, auf bekannte Kostengrößen (z. B. aus Ausschreibungsunterlagen, Rechnungen von Nachunternehmern usw.) vergleichbarer Projekte zurückzugreifen. Die erhobenen Kosten sind dabei auf den Bezugszeitpunkt umzurechnen und zu einer mittleren Größe zusammenzuführen.

Für Leistungen, die nicht direkt abgebildet werden können, ist eine Recherche vorzunehmen, um veröffentlichte Größen (Kosten, Kalkulationsansätze, Mengensätze, Aufwandswerte usw.) zur Bestimmung der Kosten herauszuarbeiten. Für Leistungen ohne validierte Datenbasis empfiehlt sich zur Bestimmung der Kosten eine Abschätzung des Leistungsumfangs und der Kosten.

Unter Berücksichtigung, dass nicht immer alle erforderlichen Eingangsgrößen vorliegen, kann auch annäherungsweise eine Kombination der verschiedenen Verfahren angewendet werden. Dies erfordert jedoch eine spätere Detailbetrachtung oder fortlaufende Konkretisierung, sobald genauere Werte vorliegen.

5.5 Schritt V – Überführung in eine Kostenmatrix

Die Anzahl aller Module, die das Tunnelbauwerk vollumfänglich oder gemäß Zielstellung in Teilen abbildet, wird durch die Variable x ausgedrückt. Für jedes Modul ist die Anzahl n_j baugleich errichteter Module sowie der Wert für die theoretische Nutzungsdauer d_j vorzugeben. Aus der theoretischen Nutzungsdauer d_j sowie dem Gesamtzeitraum der Lebenszykluskostenberechnung z lässt sich die Anzahl der erforderlichen Austauschvorgänge im Betrachtungszeitraum für jedes Modul ermitteln. Die Modul-Initialkosten $a_{t,j}$ umfassen die Auszahlungen, die für die betriebsbereite Herstellung oder Beschaffung des Moduls j zum gewählten Zeitpunkt t aufzuwenden sind. Insbesondere werden durch die Größe $a_{0,j}$ die Initialkosten für das Modul j zum Zeitpunkt $t=0$, dem Referenzzeitpunkt für die Diskontierung (vgl. Kapitel 4.2) ausgedrückt. Während der anschließenden Phase entstehen die Folgekosten $c_{t,j}$, in Abhängigkeit von der Funktions- und Betriebsweise eines Moduls beinhalten die Folgekosten alle erforderlichen Maßnahmen für den Betrieb, die Erhaltung, die Instandsetzung sowie für den (Teil-) Austausch des Moduls, sobald die theoretische Nutzungsdauer erreicht wird.

Abbildung 20 ordnet zusammenfassend die zuvor genannten Größen und Kosten in den Kontext der Lebenszykluskostenanalyse ein.

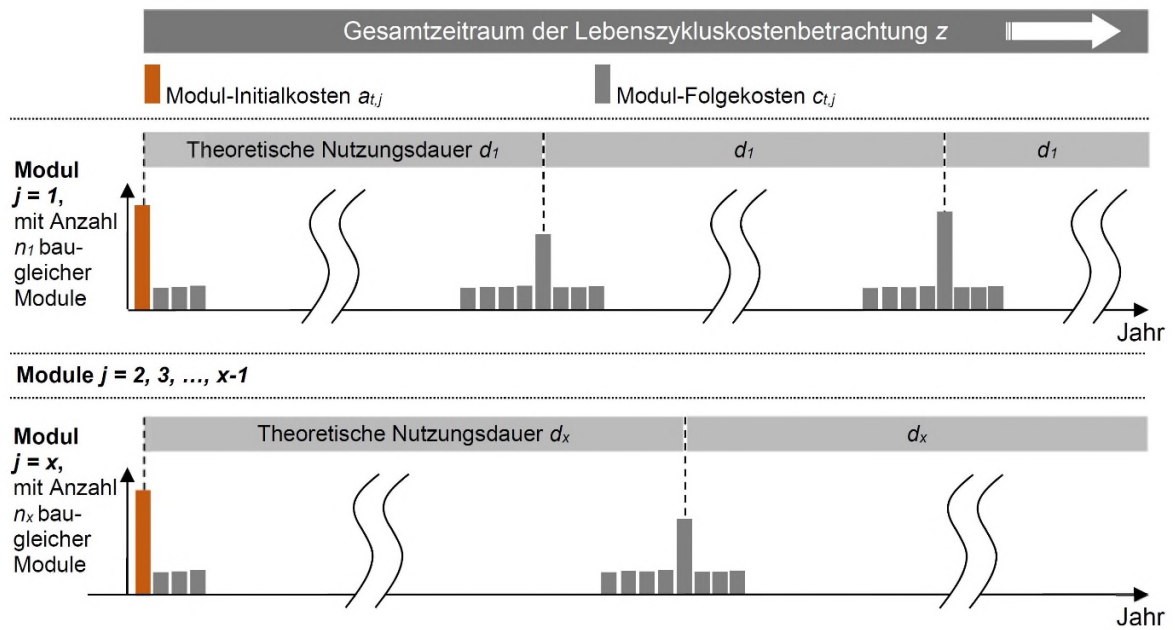


Abbildung 20: Variablen zur Erfassung der Module

Im nächsten Schritt ergibt sich unter Zuordnung der jeweiligen Kostengröße zum Anfallszeitpunkt und der Ausgestaltung des Untersuchungsrahmens eine dreidimensionale Zeit-Kosten-Prozess-Verknüpfung (Abbildung 21). Bei den einzelnen Größen handelt es sich um eine Aufsummierung der einzelnen Kostenbestandteile für den entsprechenden Prozess.

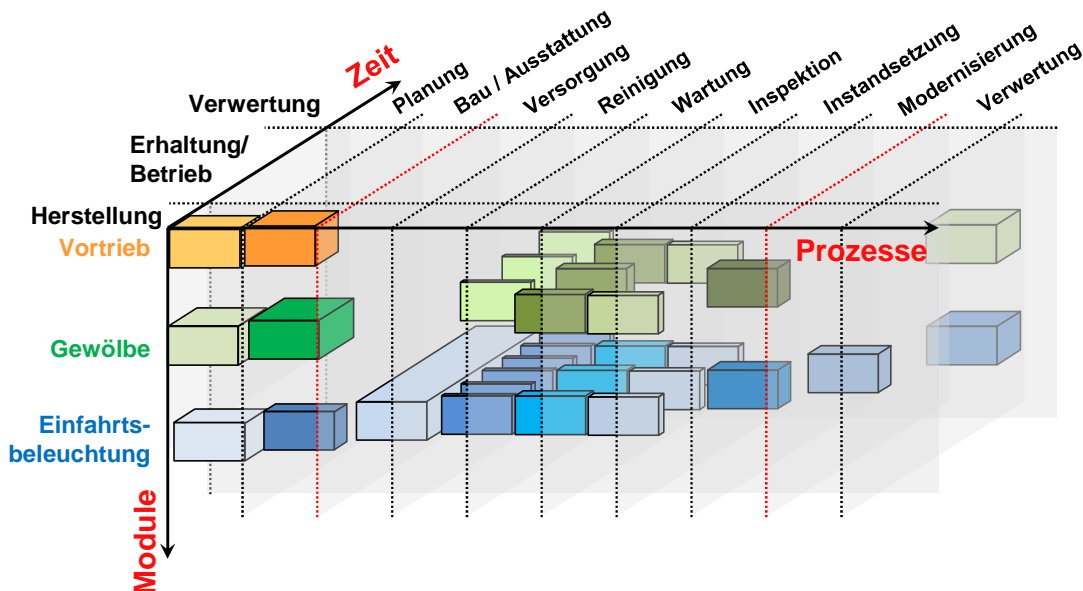


Abbildung 21: Zeit-Kosten-Prozess-Verknüpfung (beispielhafte Ausgestaltung)⁷⁹

Bei der Ausgestaltung werden die Kosten ausgehend vom Betrachtungszeitpunkt geplant. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit hat eine Berücksichtigung der Preissteigerung bzw. Geldentwertung zu erfolgen. Die Initialkosten $a_{t,j}$ und die Folgekosten $c_{t,j}$ repräsentieren nominale Kosten, die z. B. auf Basis einer endfälligen Berechnung zum

⁷⁹ ENGELHARDT (2015)

31.12. des jeweiligen Jahres gewonnen werden. Tabelle 3 zeigt exemplarisch eine nominale Zeit-/Kostenmatrix.

Tabelle 3: Nominale Zeit-/Kostenmatrix

		Zeitpunkt t [Jahre]						
		0	1	2	...	10	...	z
Modul j	1	Initialkosten $- a_{0,1} * n_1$	Folgekosten $- c_{1,1} * n_1$	Folgekosten $- c_{2,1} * n_1$	...	Folgekosten inkl. Austausch $- c_{10,1} * n_1 - a_{10,1} * n_1$	...	Folgekosten $- c_{z,1} * n_1$
	2			Initialkosten $- a_{2,2} * n_2$	...	Folgekosten $- c_{10,2} * n_2$	...	Folgekosten $- c_{z,2} * n_2$

	x	Initialkosten $- a_{0,x} * n_x$	Folgekosten $- c_{1,x} * n_x$	Folgekosten $- c_{2,x} * n_x$	...	Folgekosten inkl. Austausch $- c_{10,x} * n_x - a_{10,x} * n_x$	...	Folgekosten $- c_{z,x} * n_x$

5.6 Schritt VI – Lebenszykluskosten-Berechnung: Kapitalwertmethode

Ausgehend von den in den vorangegangenen Abschnitten erhobenen Attributen der einzelnen Module, werden die Lebenszykluskosten unter Anwendung der Kapitalwertmethode (vgl. Kap. 4) berechnet. Zielgröße ist der Kapitalwert. Der zur Bestimmung des Kapitalwertes erforderliche Referenzzeitpunkt wird per Definition dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme gleichgestellt. Für die Initialkosten ist somit keine Ab- bzw. Aufzinsung vorzunehmen. Die Folgekosten hingegen sind in Bezug auf den Referenzzeitpunkt abzuzinsen.

5.7 Schritt VII – Variantenvergleich und Interpretation

Das Ergebnis einer Lebenszykluskostenrechnung liefert als Ergebnisgröße den Kapitalwert. Der Kapitalwert, obwohl in EURO, ist eine abstrakte Größe. Ohne weitere Untersuchungen bzw. Interpretationen lassen sich hieraus – außer bei einem reinen Variantenvergleich – nur im begrenzten Umfang Erkenntnisse ableiten.

Durch die Aggregation der jährlichen abgezinsten Kostengrößen kann der Verlauf der Lebenszykluskosten dargestellt werden (Abbildung 23). Aus diesem Kostenverlauf lassen sich wesentliche Ereignisse und Zeitpunkte für den Untersuchungszeitraum herauslesen. In den Jahren mit einem signifikanten, sprunghaften Anstieg der Kosten sind verstärkte Investitionen zu tätigen und somit einzuplanen. Vor allem Verbesserungs- und Erneuerungsarbeiten sind aus dem Verlauf ablesbar.

Zusätzlich ermöglicht die gewählte Strukturierung neben einer Aggregation der Kosten für das Gesamtbauwerk auch eine system-, baugruppen- und modulweise Auswertung. Erweiternd kann durch Zusammenführung gleichartiger Prozesse oder übereinstimmender Lebensphasen eine prozess- bzw. phasenbezogene Auswertung erfolgen. Hierdurch wird beispielsweise eine Bewertung der Initial- und Folgekosten ausgehend vom gesamten Untersuchungsrahmen bis hin zum einzelnen Modul ermöglicht (Abbildung 22).

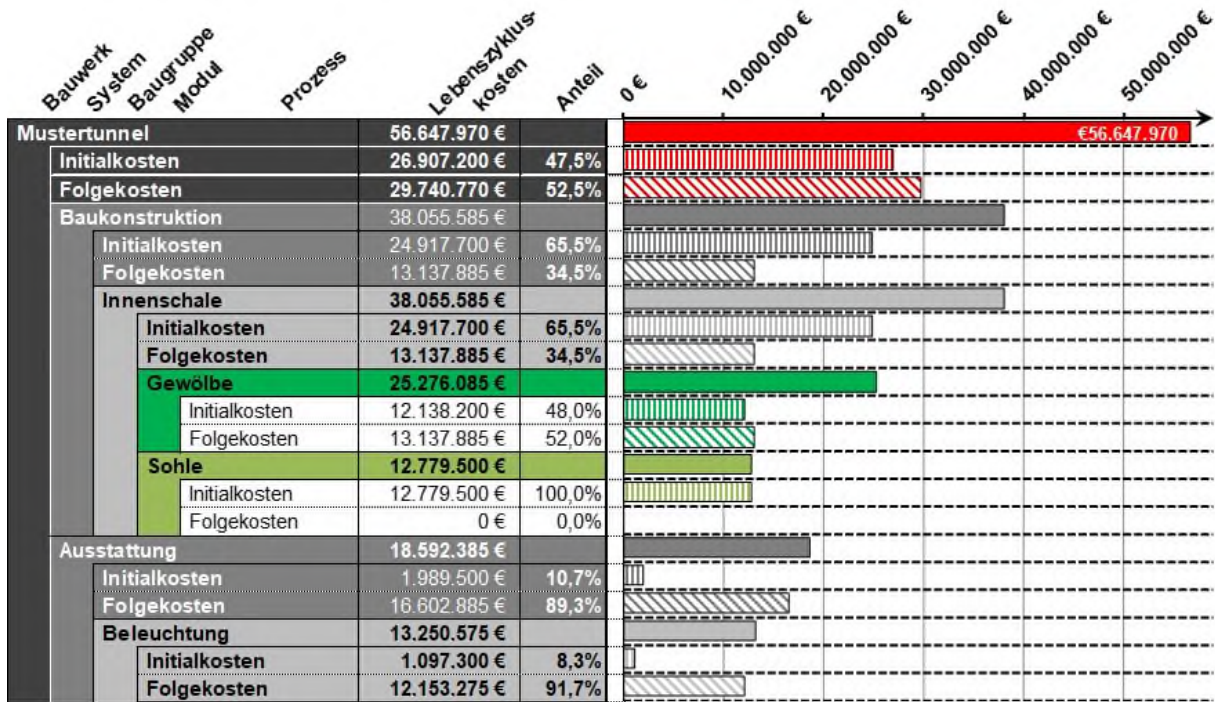


Abbildung 22: Bewertung der Initial- und Folgekosten an einem Beispiel (Ausschnitt)

Eine Gegenüberstellung von untersuchten Varianten sowohl in einer Auswertung der Einzelgrößen (modulweise/prozessweise) als auch des Kostenverlaufes (gesamt oder in Einzelgrößen) erlaubt eine weiterführende Identifikation von Kostentreibern bzw. Optimierungsmöglichkeiten.

Der Einfluss des Zinssatzes wird durch den Verlauf der Lebenszykluskosten deutlich sichtbar. In Abbildung 23 ist beispielhaft der Verlauf der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 % und eines Zinssatzes von 0,0 % gegenübergestellt.

Es empfiehlt sich daher grundsätzlich, einen sog. 0-Abgleich durchzuführen. Die Prognose der LZK kann über diesen langen Zeitraum nicht genau vorherbestimmt werden, die Bildung einer Bandbreite ist hier angemessen und zeigt eingrenzend auf, in welcher Größenordnung sich die Kosten bewegen.

In Kapitel 7 bzw. Kapitel 8 wird für einen Musterstraßentunnel bzw. Muster-ÖPNV-Tunnel eine entsprechende Beispielberechnung vorgestellt.

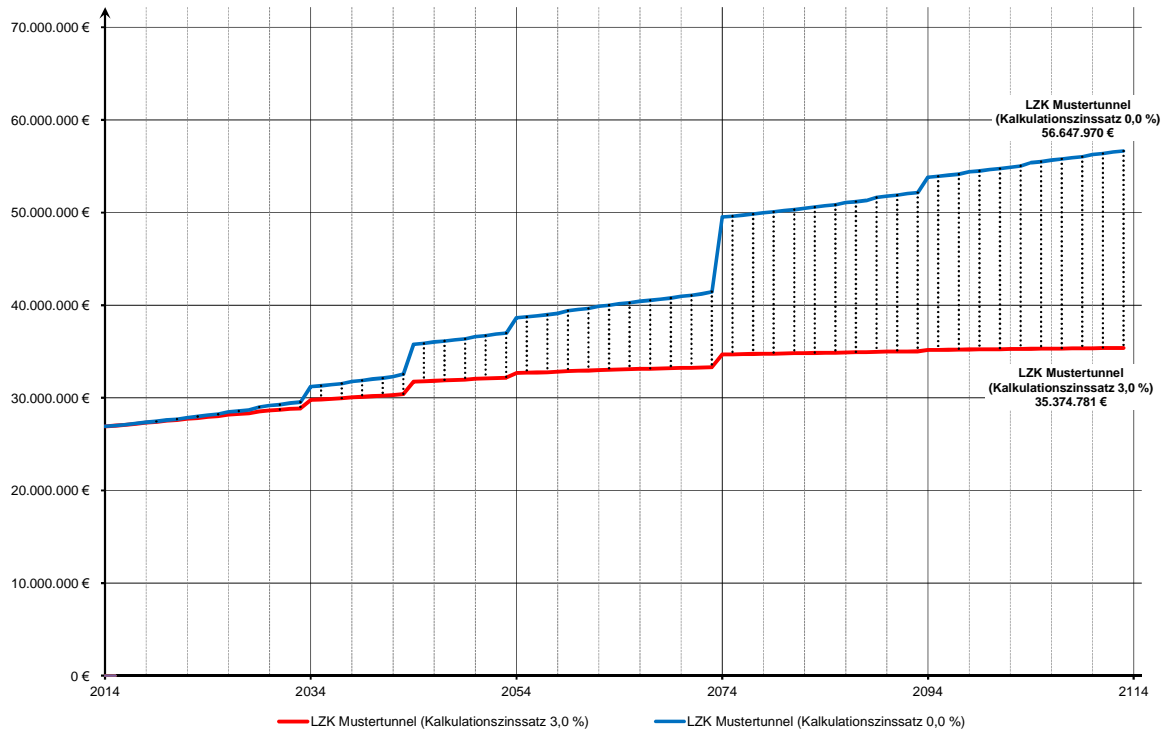


Abbildung 23: Beispielhafter Verlauf der Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung der Kalkulationszinssätze von 3% und 0%

6 Auswertungen und Analysen

Für eine detaillierte LZK-Analyse bieten sich verschiedene weiterführende Verfahren an. Dadurch wird es möglich, Unsicherheiten, Risiken aber auch Bandbreiten abzubilden oder deutlich hervorzuheben. Auch lassen sich Hauptkostenverursacher identifizieren, die anschließend einer detaillierteren Betrachtung zur Risikoabgrenzung oder zur weiterführenden Optimierung unterzogen werden sollten.

6.1 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse dient dazu, die Beziehungen zwischen den in die Lebenszykluskostenrechnung eingehenden Daten sowie den Zielwerten zu untersuchen, Faktoren mit hoher Hebelwirkung zu identifizieren und die Transparenz der zumeist komplexen Abhängigkeiten zu erhöhen. Gleichzeitig ermöglicht die Sensitivitätsanalyse eine Abschätzung des Risikos, das aus den überwiegend unscharfen Eingangsgrößen resultiert.

Ausgehend vom ermittelten Kapitalwert (Lebenszykluskosten) wird untersucht, wie sensibel das Rechenergebnis auf Variation der eigentlich unsicheren Eingangsgrößen reagiert. Um Veränderungen im Ergebnis der entsprechenden Eingangsgröße zuordnen zu können, wird ausschließlich eine Inputgröße bzw. -gruppe verändert. Die Variation der Eingangsgrößen hat möglichst mit nachvollziehbaren, realistischen Merkmalsausprägungen zu erfolgen. Alle weiteren Rechengrößen bleiben gegenüber der Ausgangsrechnung unverändert. Dieses Vorgehen (*ceteris paribus*) ermöglicht eine Identifizierung der Eingangsgrößen, durch die der Zielwert besonders stark beeinflusst werden kann. Eine gezielte Informationsbeschaffung bezüglich dieser Daten, führt zu einer Schärfung des mit Unsicherheiten belegten Zielwertes.⁸⁰

Das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse lässt sich übersichtlich in Diagrammen visualisieren. Bei der in Abbildung 24 dargestellten Diagrammform ermöglichen die Steigungen der einzelnen Zielwertverläufe einen Rückschluss auf den Einfluss der jeweiligen Eingangsgröße. Je steiler der Verlauf des Graphen, desto größer ist die Sensitivität des Zielwertes. Die Elastizität der Variablen lässt sich nicht immer über eine lineare Funktion abbilden. Daher wird empfohlen, die einzelnen Berechnungen im Rahmen einer Parametervariation zu wiederholen.

Erweiternd können zur Bestimmung der Sensitivität Szenarien-Analysen, beispielsweise in Form von Bestcase- bzw. Worstcase-Szenarien, durchgeführt werden. Hierbei werden mehrere Parameter gleichzeitig in ihrer Ausprägung verändert und deren Auswirkungen untersucht.⁸¹ Hierunter leiden jedoch die Transparenz und die Zuordenbarkeit von Actio und Reactio.

Die Kenntnis über die Stabilität der Berechnungsergebnisse und der Eingrenzung der für die Lebenszykluskosten relevanten Eingangsgrößen führt dazu, dass die Qualität der Entscheidungsgrundlage zunimmt. Hieraus entsteht für den Anwender die Möglichkeit, Optimierungsansätze gezielt anzugehen.⁸² Das weitere Vorgehen kann sich dabei auf die

⁸⁰ Vgl. GÖTZE, BLOECH (1993), BLOHM, LÜDER, SCHAEFER (2012)

⁸¹ Vgl. FECK (2007)

⁸² Die Generierung von Optimierungspotentialen hinsichtlich der Lebenszykluskosten ist nur möglich, sofern vorab die relevanten Einflussgrößen und die wesentlichen Zusammenhänge identifiziert und berücksichtigt wurden. Vgl. BECKER (1986)

aussichtsreichsten Ansätze beschränken, um so den Aufwand für die Optimierungen in einem vertretbaren Rahmen zu halten.

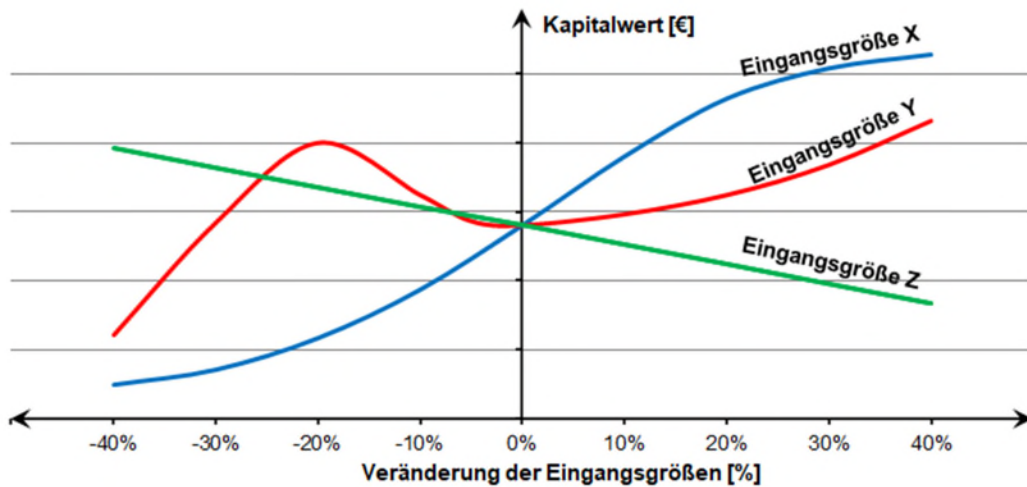


Abbildung 24: Darstellung der Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse

6.2 Pareto Prinzip

Ausgehend von der Überlegung, dass aus Zeit- und Kostengründen nicht für alle Indikatoren Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden können, ist zu empfehlen, sich auf jene Indikatoren zu beschränken, welche

- einen großen quantitativen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben und
- über deren tatsächlichen Werte Unsicherheit besteht.

Hierfür wird auf das Pareto-Prinzip abgestellt. Dieses beschreibt das statistische Phänomen, dass ein wesentlicher Teil des Gesamtergebnisses (z. B. 80 %) durch einen kleinen Anteil aller Aufwendungen (z. B. 20 %) bestimmt wird.

Für die Lebenszykluskostenrechnung bedeutet dies, dass sich für eine effektive Risikobewertung sowie eine gezielte Optimierung der Lebenszykluskosten, die detaillierte Informationsbeschaffung auf die wesentlichen Kostenfaktoren beschränken kann.

Für eine Bewertung der Kosten wird aus diesem Grund eine Rangfolgenbildung der einzelnen Bestandteile hinsichtlich ihrer Größe vorgenommen. Durch eine modulare Struktur der Lebenszykluskosten wird eine ungehinderte Identifizierung der wesentlichen Kostentreiber ermöglicht (Abbildung 25). Die hieraus als Leitgrößen identifizierten Prozesse werden anschließend auf ihre Risiko- oder auch Optimierungspotentiale untersucht. Für geeignete Größen erfolgt darauf aufbauend eine Sensitivitätsanalyse zur weiteren Eingrenzung der vorhandenen Risiken bzw. von Optimierungsmöglichkeiten.

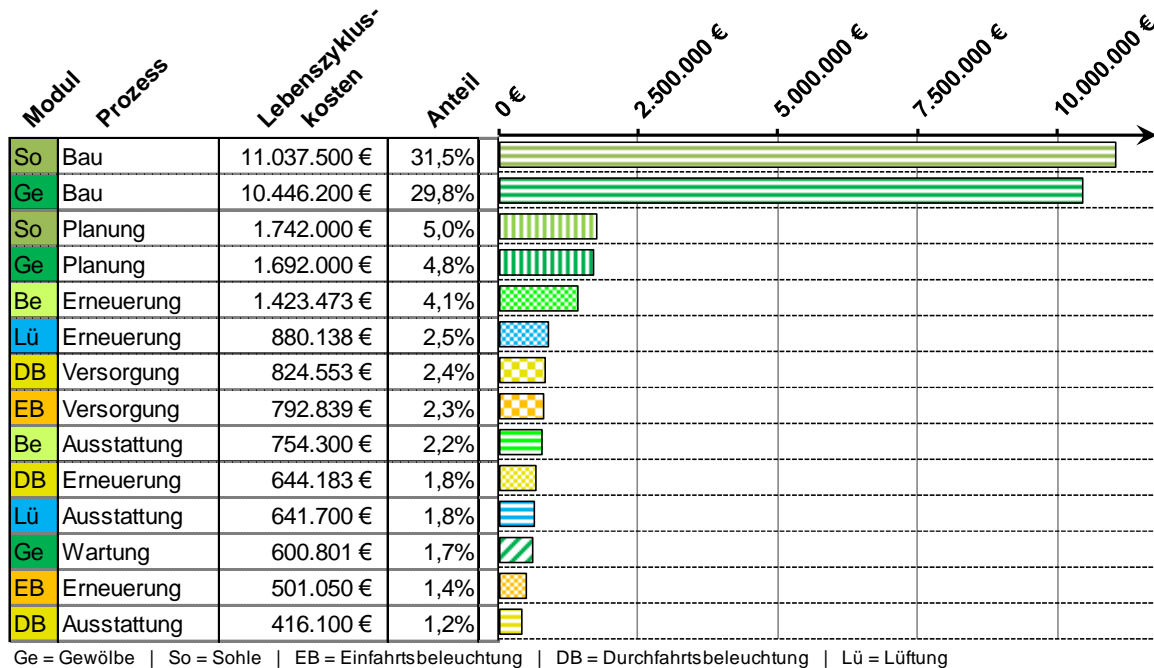


Abbildung 25: Rangfolgenbildung zur Identifikation signifikanter Prozesse (auszugsweise)⁸³

6.3 Erstellung einer ABC Kategorisierung

Bei der ABC-Analyse der Gesamtkosten werden in Kategorie A die Schwerpunkt-Positionen mit dem größten Anteil an den Lebenszykluskosten zusammengefasst. Für eine aussagekräftige Lebenszykluskostenrechnung sind diese Module unbedingt in den Untersuchungsrahmen einzubinden. Elemente der Kategorie B weisen eine deutlich verringerte Relevanz für die Gesamtkosten eines Tunnelbauwerkes auf. Module der Kategorie C besitzen nur einen untergeordneten Einfluss, so dass es sich aufgrund des Aufwandes zur Datenerhebung empfiehlt, diese Bestandteile nicht bzw. nur als pauschale Größen in Ansatz zu bringen, sofern sich keine genaueren Ansätze erheben bzw. ableiten lassen. Dies ermöglicht bei der Analyse der Kalkulation die Betrachtung nur derjenigen Positionen, die wesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Für eine Einschätzung der Relevanz von Modulen wird aus der Bewertung eines realen Bestandsprojekts (Beispiel Straßentunnel) eine Kategorisierung hinsichtlich des Einflusses auf die Gesamtkosten vorgenommen (Abbildung 26).

⁸³ beispielhafter Auszug aus der Berechnung eines Straßentunnels

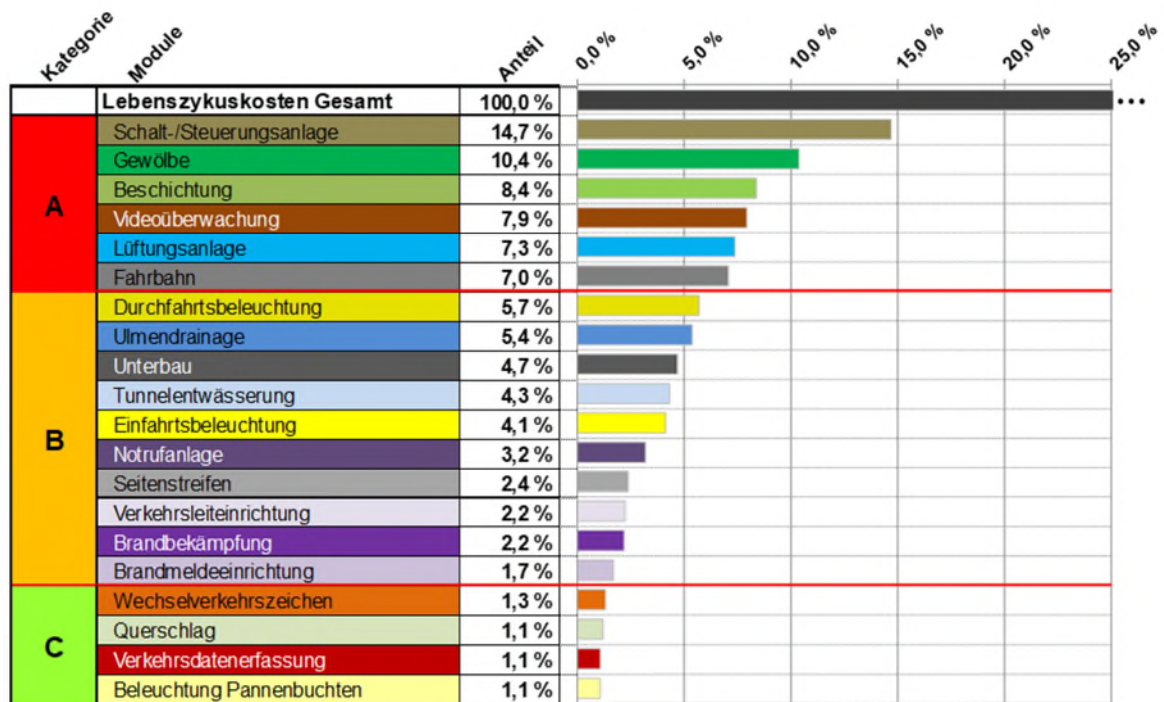


Abbildung 26: Auswertung zur Bestimmung der Relevanz von Modulen (auszugsweise)⁸⁴

6.4 Risikoanalyse zur Berücksichtigung von Unsicherheiten

Bei den bisherigen Untersuchungen wurden sämtliche Rechengrößen (Zahlungen, Anfallszeitpunkt und Zinssatz) als deterministische Größen eingesetzt. In Wirklichkeit handelt es sich bei einer Lebenszykluskostenrechnung um eine modellhafte Abbildung zukünftiger Ereignisse. Die verwendeten Daten und der sich daraus ergebende Eintritt der angenommenen Umweltzustände kann also nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden.

Die Auswirkungen möglicher Veränderungen lassen sich allerdings durch Einbindung einer Risikoanalyse sichtbar machen. Hieraus können Wahrscheinlichkeiten bestimmt werden, in welchen Grenzen sich der Zielwert einstellen wird.

Die Einbindung der Risikoanalyse in die aufgezeigte Methodik zur Bestimmung der Lebenszykluskosten erfolgt unter Rückgriff auf die Monte-Carlo-Simulation.⁸⁵ Der Vorteil dabei ist, dass auf das deterministische Rechenmodell – ohne weitere Anpassung – zurückgegriffen werden kann. Es sind lediglich die bislang deterministischen Eingangsgrößen durch probabilistische Rechengrößen zu ersetzen (Abbildung 27).

Die Bestimmung der probabilistischen Eingangsgrößen ist der wesentliche Schritt zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Lebenszykluskostenrechnung. Dazu sind die unsicheren Eingangsgrößen im Vorfeld mit Hilfe von diskreten bzw. stetigen Verteilungsfunktionen zu beschreiben. Um an dieser Stelle den Aufwand ebenfalls zu beschränken, ist auf die ergebnisrelevanten Einflussgrößen, entsprechend dem Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse bzw. der ABC-Kategorisierung (Kapitel 6.1 und 6.3), abzustellen.

⁸⁴ beispielhafter Auszug aus der Berechnung eines Straßentunnels

⁸⁵ Unter dem Begriff „Monte-Carlo-Simulation“ werden verschiedene Simulationsverfahren zusammengefasst, bei denen zur Zielgrößenbestimmung Zufallszahlen zum Einsatz kommen.

Eine eingehende Erläuterung der Monte-Carlo-Simulation ist beispielsweise BOUSSABAINÉ, KIRKHAM (2006); COTTIN, DÖHLER (2013), FISHMAN (1996) oder ENGELHARDT (2015) zu entnehmen.

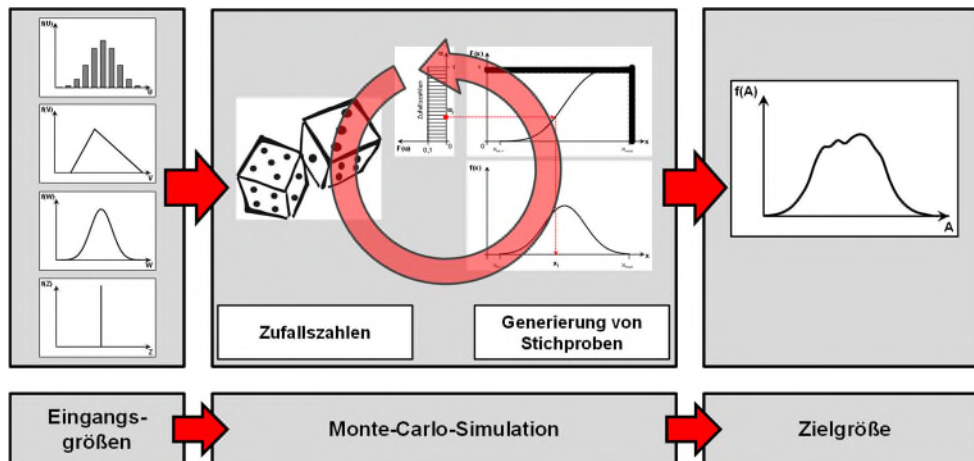


Abbildung 27: Einbindung einer Monte-Carlo-Simulation zur Lebenszykluskostenrechnung⁸⁶

Das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation umfasst eine Bandbreite aller möglichen Ergebnisausprägungen entsprechend der Anzahl der Simulationsdurchläufe. Hieraus lassen sich Rückschlüsse über die eigentliche Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lebenszykluskosten und die sich daraus ergebenden Risikomaßzahlen ableiten. Anders als bei der deterministischen Ermittlung erfordert das nicht eindeutige, wahrscheinlichkeitsbasierende Ergebnis der Gesamtkosten eine eigenständige Analyse und Bewertung. Dabei ist zur Auffindung der aus ökonomischer Sicht vorteilhaftesten Ausgestaltung zusätzlich die Risikobereitschaft (avers, neutral, affin) der Entscheidungsträger einzubeziehen. Ein entsprechender Ansatz zur Berücksichtigung von Kostenunsicherheiten mittels der Monte-Carlo-Simulation wurde explizit in einem Projekt zur Ermittlung der Herstellungskosten von Tunnelbauwerken gewählt⁸⁷ und konzeptionell auch auf Lebenszykluskostenprognosen übertragen⁸⁸.

6.5 Benchmarking

Das bisherige Vorgehen zur Optimierung der Kosten von Tunnelbauwerken konzentriert sich im Wesentlichen auf die Planungsphase im Zuge eines Neubaus bzw. einer grundlegenden Sanierung von Bestandsbauwerken. Anstelle dieser Singularität ist es zielführender, diese Option zur Kostenreduzierung dauerhaft in allen Lebensphasen in Form einer kontinuierlichen Optimierung zu implementieren. Das in anderen Bereichen bereits weitverbreitete Konzept des Benchmarkings erlaubt diese fortwährende Generierung von Optimierungs- und Verbesserungspotentialen.

Vorteil des Benchmarkings ist neben dem Gewinn von Kennzahlen auch die Auseinandersetzung mit den für die Kennzahlen verantwortlichen Leistungen und Prozessen. Dadurch bildet sich ein Bewusstsein für die interne Struktur und die realen Arbeitsabläufe. Durch die fortwährende Datenerhebung erhält der Tunnelbetreiber einen Überblick über die laufenden Kosten sowie den Gesamtzustand des Bauwerkes. Hieraus ist die Relevanz der einzelnen Kostengrößen ableitbar und vorhandene Leistungslücken oder Abweichungen werden veranschaulicht. Dies erleichtert die Strategieausrichtung für

⁸⁶ ENGELHARDT (2015)

⁸⁷ THEWES (2019) und THEWES (2020)

⁸⁸ RUB (2018)

die Erhaltung (bzw. Bauwerksmanagement) und unterstützt die Entscheidungsfindung für zukünftige Investitionen.

Dabei zielt das Benchmarking nicht nur auf die Gesamtlebenszykluskosten ab, sondern ermöglicht nach Identifikation der relevanten einzelnen Parameter oder Prozesse einen Abgleich mit vorhandenen bzw. zu generierenden Kennzahlen.

7 Anwendungsbeispiel für Mustertunnel Straße

7.1 Einleitung und Projektbeschreibung Mustertunnel

Die in der Empfehlung erläuterte Vorgehensweise zur Ermittlung der Lebenszykluskosten für Straßentunnel wird im Folgenden am Beispiel eines Mustertunnels vorgestellt.

Es wird darauf hingewiesen, dass die verwendeten Daten nicht auf einem realen Tunnelbauwerk basieren, und daher nur modifiziert auf andere Tunnel übertragbar sind. Es wurden umfassende Vereinfachungen und Abschätzungen vorgenommen, welche sich an tatsächlichen Kosten, Literatur- oder Erfahrungswerten orientieren. Bei dem betrachteten Mustertunnel handelt es sich um einen innerstädtischen Straßentunnel mit den Daten nach Tabelle 4.

Tabelle 4: Merkmale Mustertunnel Straße

Parameter	Mustertunnel Straße
Tunnellänge	550 m
Fertigstellung	2007
Anzahl Tunnelröhren	1 Tunnelröhre
Anzahl der Fahrstreifen	1 Fahrstreifen je Fahrtrichtung
Betriebsart	Gegenverkehr
Bauart	150 + 100 m offene Bauweise 300 m bergmännische Bauweise
Regelquerschnitt	RQ 11 t
Ausstattung	u.a. 2 Notausgänge, Strahlventilatoren, Brandmeldeanlage, Videoüberwachungsanlage

7.2 Vorgehen

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Lebenszykluskosten eines Tunnelbauwerks wird anhand eines strukturierten Verfahrensablaufs vorgestellt (Abbildung 11) und bei der Bearbeitung dieses Anwendungsbeispiels entsprechend umgesetzt:

1. Ausgangslage: Festlegung der Daten des Untersuchungsrahmens (Betrachtungszeitraum, relevante Bauwerksdaten, Fokus der Betrachtung etc.)
2. Strukturierung: Erstellung des Grundgerüsts der Module
3. Modulbildung
4. Kostenermittlung
 - 4.1 Überprüfung, welche Daten vorliegen bzw. erfragt oder ermittelt werden müssen
 - 4.2 Ableiten von Regelmäßigkeiten (Kosten und zeitliche Intervalle)
 - 4.3 Ausfüllen der Modulblätter
5. Überführung in die Kostenmatrix
6. LZK-Berechnung
7. Interpretation

7.3 Schritt I: Untersuchungsrahmen

Für die Analyse der Lebenszykluskosten werden die übergeordneten Phasen Planung, Herstellung und Nutzung bis hin zum Ende der Gebrauchstauglichkeit betrachtet. Es

handelt sich um einen Neubau, für den der Untersuchungszeitraum in Anlehnung an die mittlere Gesamtlebensdauer gemäß ABBV⁸⁹ mit 100 Jahren angesetzt wird.

Die nachfolgende Darstellung umfasst die Lebenszykluskostenbestimmung für das beschriebene Tunnelbauwerk. Zur Veranschaulichung der Methodik wird das gesamte Tunnelbauwerk einer Betrachtung unterzogen, wobei die Anzahl der genauen betrachteten Module eingeschränkt wird.

Im vorliegenden Beispiel wird das Verfahren exemplarisch an einer Ausstattungsvariante dargestellt. Auf den Vergleich mit anderen Varianten wird verzichtet. Die Ermittlung des Kapitalwerts für jede Vergleichsvariante würde analog erfolgen und kann auch gezielt für einzelne Module durchgeführt werden.

7.4 Schritt II: Strukturierung und Schritt III: Modulbildung

Je nach gewünschtem Detaillierungsgrad bzw. vorhandener Datenstruktur werden die Module festgelegt. Im vorliegenden Fall wurden für die Systeme Tunnelkonstruktion und Tunnelausstattung jeweils sieben eigenständige Module gewählt, die im Fokus der weiteren Betrachtung stehen sollen. Zudem wurde jeweils eine Restposition geschaffen, in welcher die nicht detailliert betrachteten Kosten zusammengefasst sind.

Tunnelkonstruktion

- Gewölbe geschlossene Bauweise
- Sohle geschlossene Bauweise
- Sohle offene Bauweise
- Wände offene Bauweise
- Decke offene Bauweise
- Entwässerung (Bauwerk)
- Fahrbahn
- "REST" Tunnelbauwerk

Tunnelausstattung

- Tunnelautomation
- Videoüberwachung
- Lüftungsanlage
- Beleuchtung
- Brandmeldeanlage
- Tunnelsperranlage
- Entwässerung (Ausstattung)
- "REST" Tunnelausstattung

7.5 Schritt IV: Kostenermittlung

7.5.1 Initialkosten

Die Herstellungskosten sind, wie im hier untersuchten Fall, nachvollziehbar dokumentiert oder lassen sich für zukünftige Bauvorhaben aufgrund von Erfahrungswerten gut abschätzen. Die übliche Einteilung in Positionen eines Leistungsverzeichnisses ermöglicht es, die Kosten den entsprechenden Modulen zuzuordnen.

Die Herstellungskosten, welche nicht eindeutig einem der genannten Module zugeordnet werden konnten, wurden entweder auf mehrere in thematischem Zusammenhang stehende Module verteilt oder den allgemeinen Modulen "Rest Tunnelbauwerk" bzw. "Rest Tunnelausstattung" zugeordnet.

⁸⁹ ABBV (2010)

Die Planungskosten liegen im Unterschied dazu zumeist nicht modulbezogen vor. Eine Aufteilung gemäß Verteilung der Herstellungskosten würde sich an den Grundlagen der HOAI⁹⁰ orientieren; es kann jedoch auch sinnvoll sein, eine inhaltlich basierte prozentuale Verteilung vorzunehmen.

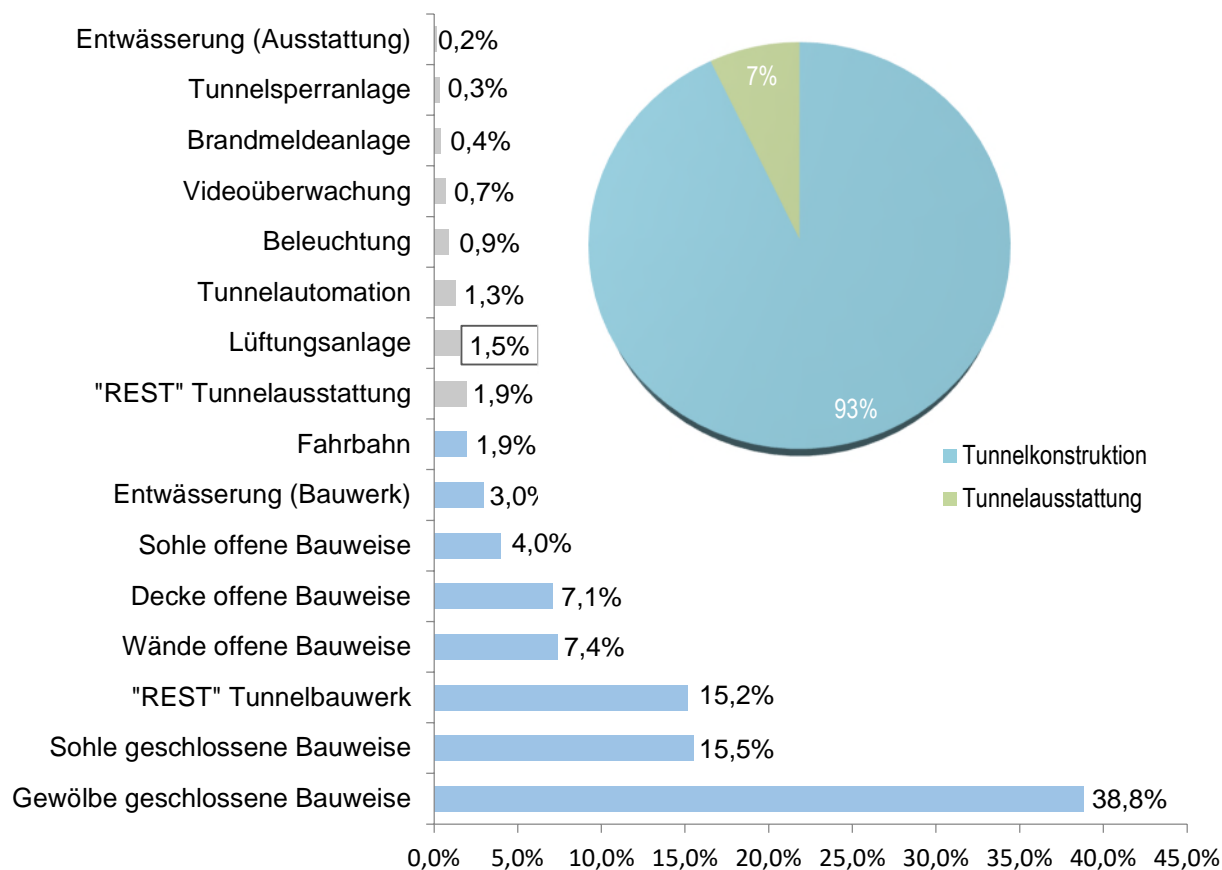


Abbildung 28: Verteilung der Initialkosten (Planung + Bau/Ausstattung)

7.5.2 Folgekosten

Die Ermittlung der Folgekosten stellt die größere Herausforderung dar. Konkrete Erfahrungswerte zu den benötigten Daten, wie Nutzungsdauern und Wartungszyklen mit den dazugehörigen Kosten, liegen nur begrenzt vor bzw. variieren stark. Hier empfiehlt es sich, auf Erfahrungswerte der Nutzungsdauern zurückzugreifen; als Kostenansatz der Wartung können Wartungsverträge die Basis bilden.

Gleichzeitig können die prognostizierten Kosten und ihr künftiger Eintritt, welche vorwiegend weit in der Zukunft liegen, ohnehin nur unter Unsicherheit vorausgesagt werden (siehe Kapitel 6.4).

Wird, wie in diesem Beispiel, auf bestehende Daten von Tunnelbetreibern zurückgegriffen, sind diese überwiegend nach Kostenarten differenziert dokumentiert, aber nicht immer auf einzelne Bauteile und Ausstattungskomponenten bezogen. So können die Energiekosten für das gesamte Bauwerk als Summe erfasst sein, aber nicht auf die verschiedenen Verbraucher aufgeteilt vorliegen. In diesen Fällen müssen Annahmen für die prozentuale Verteilung auf die einzelnen Module getroffen werden. Im vorliegenden Fall konnte diese

⁹⁰ HOAI (2021)

Aufteilung durch die Zuhilfenahme der Leistungsbilanz der Stromverbraucher im Tunnel erfolgen.

Die Kosten für die Erneuerung beinhalten den Rückbau, die Neuplanung und den Einbau der neuen Bauteile und Ausstattungselemente. Da sich künftige Preisänderungen unter Berücksichtigung des technischen Fortschritts nur unter Unsicherheit vorhersagen lassen, wurden die Kosten auf Basis der Initialkosten abgeschätzt.

7.5.3 Modulblätter

Für die übersichtliche Zusammenstellung der ermittelten Datenansätze wurden Modulblätter erstellt, welche alle Initial- und Folgekostenkosten für ein Modul erfassen.

Bereich: Ausstattung		Kürzel: LUF	
Modul: Lüftungsanlagen			
Prozess	Leistungen	Kosten [€]	Zeitl. Faktor [in Jahren]
Initialkosten			
	Planung	45.000,00 €	-
	Ausstattung (Bau)	450.000,00 €	-
Folgekosten			
Energie- und Wasserversorgung/ Überwachung/ Übungen/ Sonstiges	Strom Rest	30.000,00 €	1
	Versicherungen	115,00 €	1

Wartung/ Inspektion/ Instandsetzung	Bau - Fremdleistungen	4.500,00 €	3
	Wartung/Instandhaltung	10.000,00 €	1
	Wartung/Instandhaltung zusätzlich	7.000,00 €	2
	Wartung Intern	500,00 €	1

Verbesserung/ Erneuerung	Austausch komplett	500.000,00 €	15
	Teilaustausch (Sensorik)	35.000,00 €	8

Abbildung 29: Auszug Modulblatt Tunnelausstattung

7.6 Schritt V: Überführung in eine Kostenmatrix

Die ausgefüllten Modulblätter wurden im Anschluss in eine Kostenmatrix überführt. Die Kostengrößen für jedes Modul werden darin den Anfallszeitpunkten zugeordnet und für jedes Jahr über den gesamten Untersuchungszeitraum zusammengestellt. Je nach Auswertungsziel hätten alle Leistungen eines Moduls auch zusammengefasst betrachtet werden können.

Tabelle 5: Auszug Zeit-/Kostenmatrix exemplarisch für ein Modul (hier LUF)

Zeit-/Kostenmatrix								
Kürzel	Modul j	Zeitpunkt t [Jahren]						
		Summe	0	1	2	3	4	5

LUF	Planung	45.000,00 €	45.000,00 €					
LUF	Ausstattung (Bau)	450.000,00 €	450.000,00 €					
LUF	Strom	300.000,00 €		30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	...
LUF	Versicherung	1.150,00 €		115,00 €	115,00 €	115,00 €	115,00 €	...
LUF	Bau- und Fremdleistungen	148.500,00 €		0,00 €	0,00 €	4.500,00 €	0,00 €	...

7.7 Schritt VI: LZK-Berechnung mit Anwendung des Kapitalwertverfahrens

Der Kapitalwert dient in der Planungsphase als Methode, die Wirtschaftlichkeit einer Investition zu beurteilen bzw. verschiedene Konstruktions- und Ausstattungsvarianten gegenüberzustellen.

Einzahlungen sind für das betrachtete Beispiel nicht vorhanden. Ungewissheitsgrade von Zahlungen und Preissteigerungen werden der Einfachheit halber ebenfalls nicht berücksichtigt.

Als Beginn der Lebenszyklusberechnung und damit als Referenzzeitpunkt $t=0$ wird der Zeitpunkt der Inbetriebnahme angesetzt. Bis auf die zum Zeitpunkt $t=0$ vorhandenen Initialkosten (Planungs-, Bau- und Ausstattungskosten) sind daher alle Folgekosten zu diskontieren.

Der Kalkulationszinssatz wurde entsprechend dem im Bundesverkehrswegeplan 2030⁹¹ vorgegebenen Nominalzins von 1,75% angenommen.

Der Verlauf der Lebenszykluskosten kann als Zusammenfassung der jährlichen abgezinsten Kosten angegeben werden.

7.8 Schritt VII: Interpretation

Die Initialkosten des Tunnelbauwerks sowie die Folgekosten der Tunnelausstattung bestimmen die Lebenszykluskosten. In den folgenden Darstellungen ist zu erkennen, dass der gewählte Kalkulationszinssatz große Auswirkungen auf das Verhältnis der Folgekosten zu den Initialkosten hat. Um die Bedeutung der Folgekosten abschätzen zu können, wurde daher eine vergleichende Auswertung mit einem Kalkulationszinssatz von 0% durchgeführt.

Bei entsprechend differenziert vorliegenden Kosten können die Anteile der jeweiligen Module dezidiert untersucht werden und Strategien und Optimierungen abgeleitet werden (z.B. Umrüstung auf LED).

⁹¹ BVWP (2016)

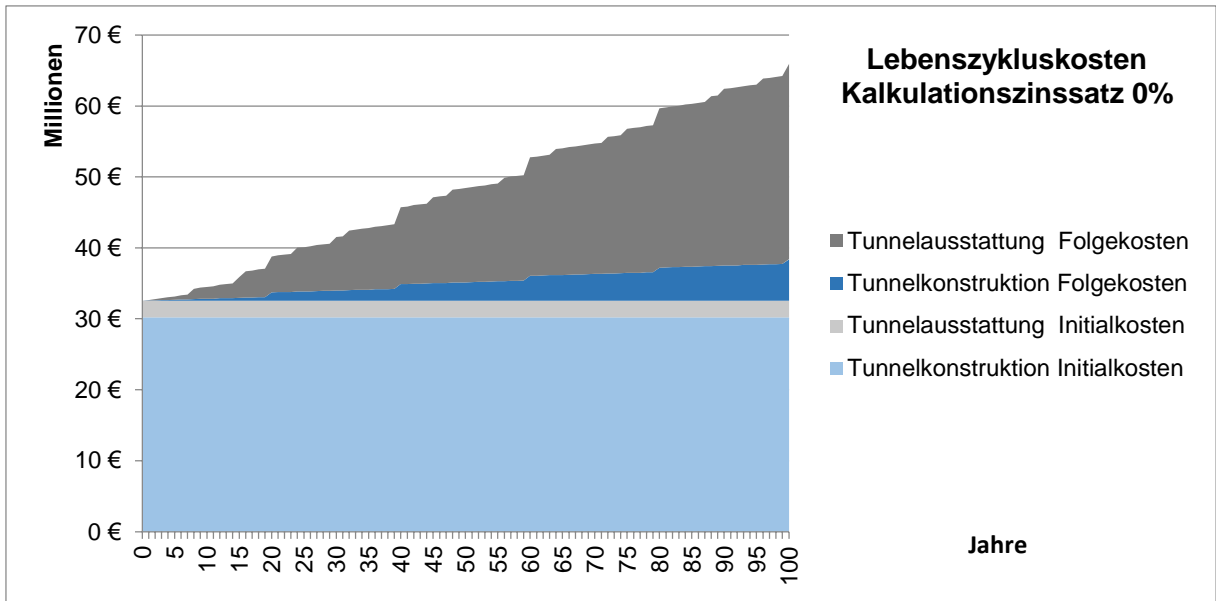


Abbildung 30: Verlauf der Lebenszykluskosten (Kalkulationszinssatz 0%)

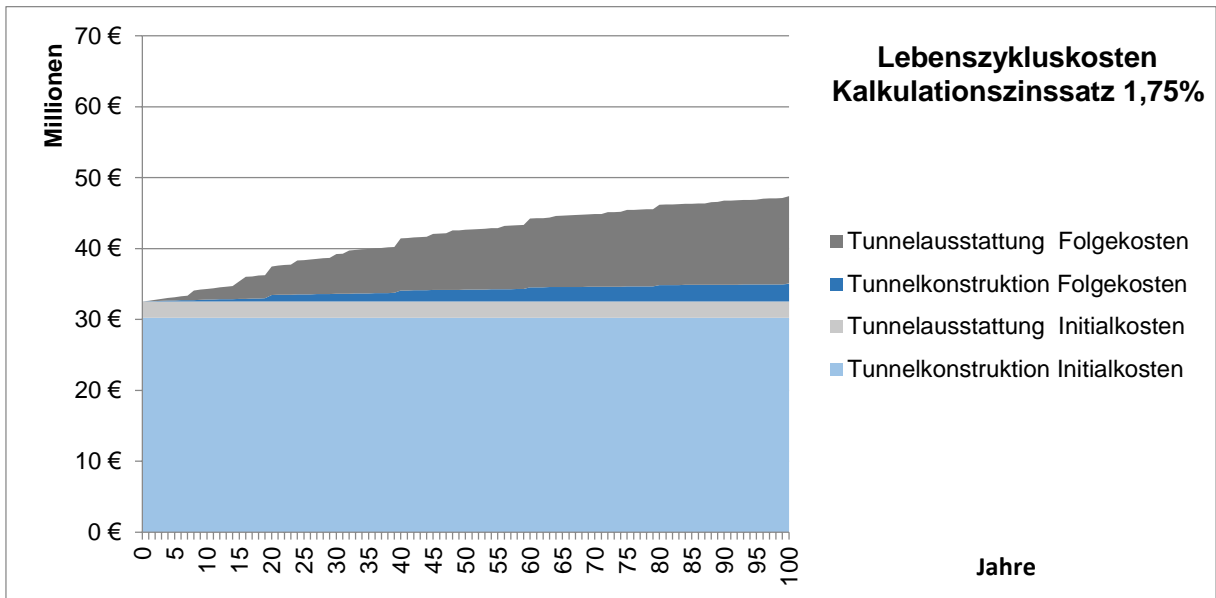


Abbildung 31: Verlauf der Lebenszykluskosten (Kalkulationszinssatz 1,75%)

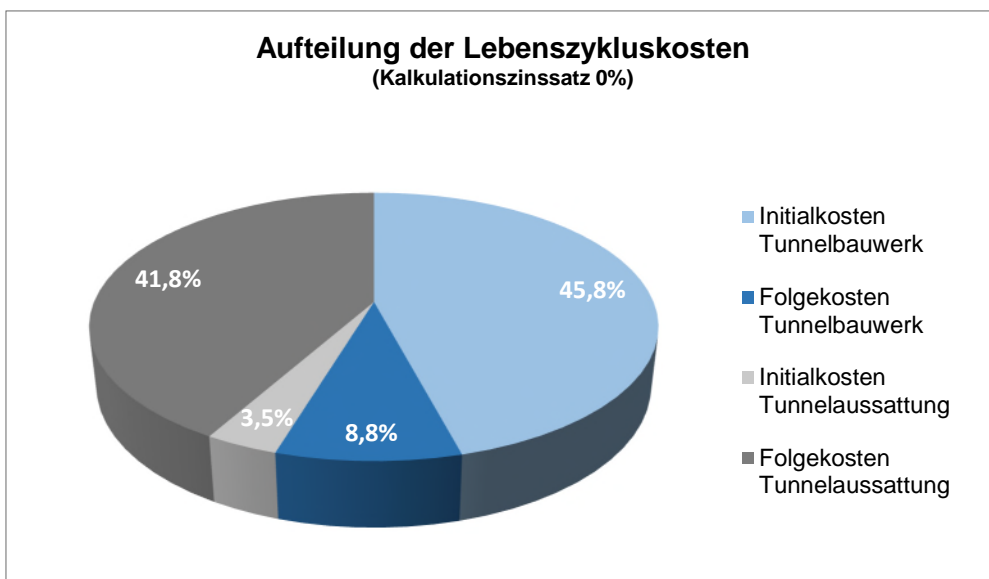


Abbildung 32: Aufteilung der Lebenszykluskosten (Kalkulationszinssatz 0%)

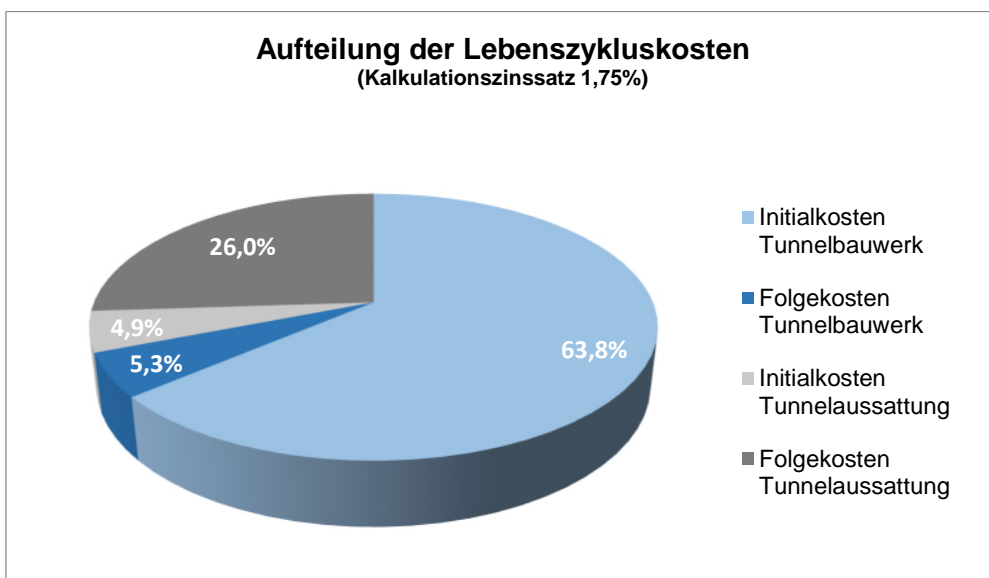


Abbildung 33: Aufteilung der Lebenszykluskosten (Kalkulationszinssatz 1,75%)

8 Anwendungsbeispiel für Mustertunnel ÖPNV

8.1 Schritt I: Ausgangslage und Projektbeschreibung Mustertunnel

Zur Validierung der in den vorangegangenen beschriebenen theoretischen Grundlagen sowie des Anwendungsbeispiels Mustertunnel Straße soll dargestellt werden, inwieweit das Vorgehen zur Ermittlung der Lebenszykluskosten für Straßentunnel auch auf unterirdische Stadtbahnanlagen angewendet werden kann.⁹² In Analogie zu Kapitel 7 wurde die in Abbildung 34 dargestellte Vorgehensweise gewählt.



Abbildung 34: Vorgehensweise zur Ermittlung der LZK für Stadtbahnanlagen

Die verwendeten Daten basieren auf einem bestehenden unterirdischen Streckenabschnitt einer Stadtbahnlinie und können modifiziert auf andere vergleichbare Bauwerke übertragen werden. Die Qualität der Berechnungsergebnisse im jeweiligen konkreten Anwendungsfall hängt davon ab, inwieweit Modifikationen des vorgestellten Standardmodells zu einer realistischen Abbildung der spezifischen Bedingungen des zu untersuchenden Stadtbahnsystems führen. Analog zum Musterstraßentunnel mussten bei den Berechnungen aufgrund der teilweise undifferenzierten Datenlage Vereinfachungen vorgenommen werden, welche sich an tatsächlichen Kosten, Literatur- oder Erfahrungswerten orientieren.

Die Bewertung der unterirdischen Stadtbahnanlage beschränkt sich auf die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit basierend auf der Zielgröße "Kapitalwertmaximierung". Technologische, organisatorische und rechtliche sowie externe Effekte (Luftverschmutzung, Lärmbelastung) sowie die Berücksichtigung von Einnahmen können künftig durch eine entsprechende Monetarisierung in den laufenden Ein- und Auszahlungsströmen berücksichtigt werden.

⁹² Vgl. FREIMANN (2020) und DAHOUD (2023)

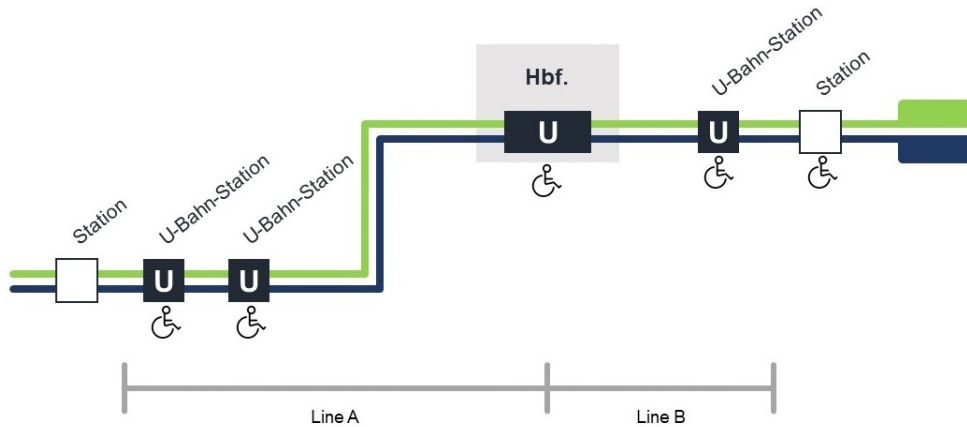


Abbildung 35: Unterirdische Streckenabschnitte der Stadtbahnlinie

Die Berechnungen der Lebenszykluskosten basieren auf einem bestehenden städtischen U-Bahn-Tunnel mit den folgenden Merkmalen und Daten nach Abbildung 35 und Tabelle 6.

Tabelle 6: Merkmale des unterirdischen Muster Stadtbahnsystems

Parameter	Muster-Stadtbahn
Baubeginn	1971
Inbetriebnahme	Linie A: 1979 Linie B: 1981
Streckenlänge	3.300 m
Bauweise	Neue Österreichische Tunnelbauweise, offene Bauweise
Röhren	Eine Röhre, nur ein Streckenabschnitt 2-röhrig
Ausstattung	4 Bahnhöfe, 9 Aufzüge, 40 Rolltreppen mit 2 Notausgängen, Ventilatoren, Brandmeldeanlage, Videoüberwachungssystem

8.2 Schritte II, III und IV: Strukturierung, Modulbildung und grundlegende Kosteninformationen

Ausgangspunkt und Kern der nachfolgenden Kostenermittlung ist die Strukturierung des gesamten Bauwerks in eigenständige Module sowie die Unterteilung des Lebenszyklus in die anfallenden Prozesse. Die Ermittlung der einzelnen Kostenparameter erfolgt je nach Zielsetzung und verfügbarem Wissensstand auf der Grundlage unterschiedlicher Verfahrensansätze.

Die Modularisierung des Bauwerks wurde auf der Grundlage der vom zuständigen städtischen Tiefbauamt durchgeführten Strukturierung vorgenommen. Das Bauwerk wurde in die Systeme "Bauliche Anlagen", "Technische Anlagen" und "Betriebstechnische Anlagen" unterteilt.

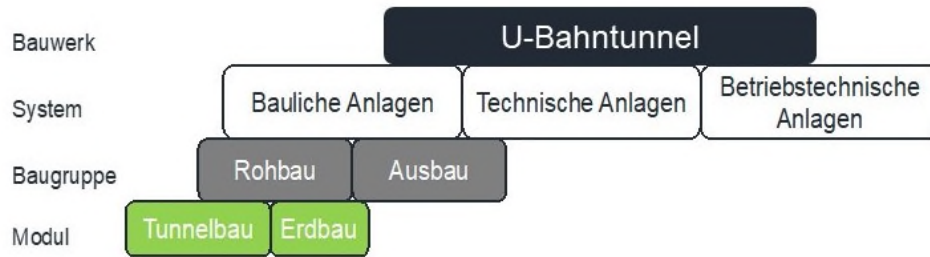


Abbildung 36: Exemplarische Gewerkeaufteilung eines kommunalen Betreibers

Auf Basis der Gewerkeaufteilung ergaben sich für das untersuchte Projekt insgesamt 81 Module, für die in unterschiedlichem Detaillierungsgrad Kosteninformationen vorliegen.

Bauwerk	81 Module
Bauliche Anlagen	39
Technische Anlagen	16
Betriebstechnische Anlagen	26

Basis der Kostenermittlung der Initial- und Folgekosten:

- für die Module
- Strecken A + B

mit unterschiedlichen jeweiligen Kosteninformationen:	
▪ Kostendaten	Keine, stabil, schwankend
▪ Keine Angaben	---
▪ stabil	Reinigung, Versicherung
▪ schwankend	Vandalismus, Graffiti beseitigung
▪ Sondermodule	
▪ IK, keine FK	Baustelleneinrichtung
▪ FK, keine IK	Reinigung, Bewachung, Versicherung

Abbildung 37: Modularisierung des Bauwerks und Kosteninformationen

Die aus 39 Modulen bestehenden baulichen Anlagen (Abbildung 17 in Kap. 5.3.3) wurden wiederum in die Systeme "Rohbau" und "Ausbau" jeweils der Strecke und der Stationen differenziert. Bei den Modulen in diesem System handelt es sich meist um Module mit hohen Anschaffungskosten, längerer Nutzungsdauer und geringeren Folgekosten als bei technischen oder betriebstechnischen Anlagen.

Das System "Technische Anlagen" setzt sich aus 16 Modulen (Abbildung 18 in Kap. 5.3.3) zusammen. Diese zeichnen sich im Allgemeinen durch hohe Erneuerungskosten aufgrund hoher Ersatzbeschaffungskosten und einer kurzen Nutzungsdauer aus.

Die betriebstechnischen Anlagen sind in insgesamt 26 Module (Abbildung 19 in Kap. 5.3.3) unterteilt. Wie bei den Modulen des Systems "Technische Ausrüstung" fallen aufgrund der kurzen Nutzungsdauer und der hohen Ersatzbeschaffungskosten hohe Folgekosten für Betrieb und Wartung bzw. Erneuerung an.

Für die Ermittlung der Initial- und Folgekosten wurden die in Abbildung 37 und Tabelle 7 genannten Datengrundlagen herangezogen:

Tabelle 7: Kostendaten/-grundlage Mustertunnel ÖPNV

System	Initialkosten	Folgekosten
Bauliche Anlagen (inkl. Sondermodule)	Tatsächliche Kosten, ansonsten <ul style="list-style-type: none"> - Kritische Zuordnung⁹³ - Schätzung mittels Baulos einer vergleichbaren Stadtbahn - Expertenschätzung 	Ohne Energiekosten 2015-2018 z.T. 1997-2018
Technische Anlagen	Tatsächliche Kosten, ansonsten <ul style="list-style-type: none"> - Kritische Zuordnung 	Ohne Energiekosten 2015-2018 z.T. 1997-2018
Betriebstechnische Anlagen	Geschätzte Kosten aus den letzten Jahren (techn. Fortschritt beachten)	Durchschnittswerte 2017-2018

Während die Anfangskosten für die baulichen und technischen Anlagen auf Basis einer Schlussrechnung vorlagen, mussten für die Anfangskosten der betriebstechnischen Anlagen teilweise Erfahrungswerte aus Expertenbefragungen herangezogen werden.

Die Planungskosten sind nicht modulweise verfügbar. Allerdings kann hier eine prozentuale Verteilung auf Basis der Anfangskosten vorgenommen werden.

Die Folgekosten sind für die Lebenszykluskostenrechnung von großer Bedeutung. Sie können bereits nach wenigen Jahren die Herstellungskosten übersteigen⁹⁴. Konkrete Erfahrungswerte für die benötigten Daten wie Nutzungsdauern und Wartungszyklen mit den dazugehörigen Kosten waren in begrenztem Umfang vorhanden, variierten aber stark. Hier wurden Erfahrungswerte für Nutzungsdauern verwendet. Als Kostenansatz für die Instandhaltung wurden Wartungsverträge verwendet.

Als schwierig erwies sich die Ermittlung der Energiekosten, die nur als Gesamtwert für das Gebäude, nicht aber aufgeschlüsselt nach Modulen vorlagen. Hier wurde die Leistungsbilanz der Stromverbraucher herangezogen oder eine prozentuale Aufteilung vorgenommen.

8.3 Schritt V Überführung in eine Kostenmatrix

Die Überführung in die Kostenmatrix erfolgte entsprechend der in Kap. 5.5. beschriebenen Methodik

8.4 Schritt VI: LZK-Berechnung mit Anwendung der Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertmethode wird zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des gesamten Stadtbahnsystems, als auch zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedener Konstruktions- und Ausstattungsvarianten herangezogen.

Unsicherheitsgrade der Zahlungen werden in der konkreten Anwendung nicht berücksichtigt, hingegen werden relative Preissteigerungen in die Berechnungen einbezogen. Für den Kalkulationszinssatz werden unterschiedliche Werte angenommen.

⁹³ Kostenzuordnung bei fehlenden Informationen durch Experten.

⁹⁴ Mit einem Kapitalzinssatz von 0 %

Als Beginn der Lebenszyklusberechnung und gleichzeitig als Bezugszeitpunkt $t=0$ wird der Zeitpunkt der Inbetriebnahme angesetzt. Mit Ausnahme der Anfangskosten zum Zeitpunkt $t=0$ (Planungs-, Bau- und Ausrüstungskosten) müssen alle Folgekosten abgezinst werden.

8.5 Schritt VII: Variantenvergleich, Interpretation, Detailanalyse

Die Initial- und Folgekosten bestimmen die Lebenszykluskosten. Anhand der modulatorientierten Anfangskostenverteilung des gesamten Infrastrukturbauwerks wird in den folgenden Abbildungen deutlich, dass der jeweils gewählte und für die gesamte Nutzungsdauer als konstant angenommene Kalkulationszinssatz sowie die für die einzelnen Bauteilgruppen angesetzten Nutzungsdauern einen dominanten Einfluss auf die Entwicklung des Verhältnisses von Folgekosten zu Initialkosten haben.

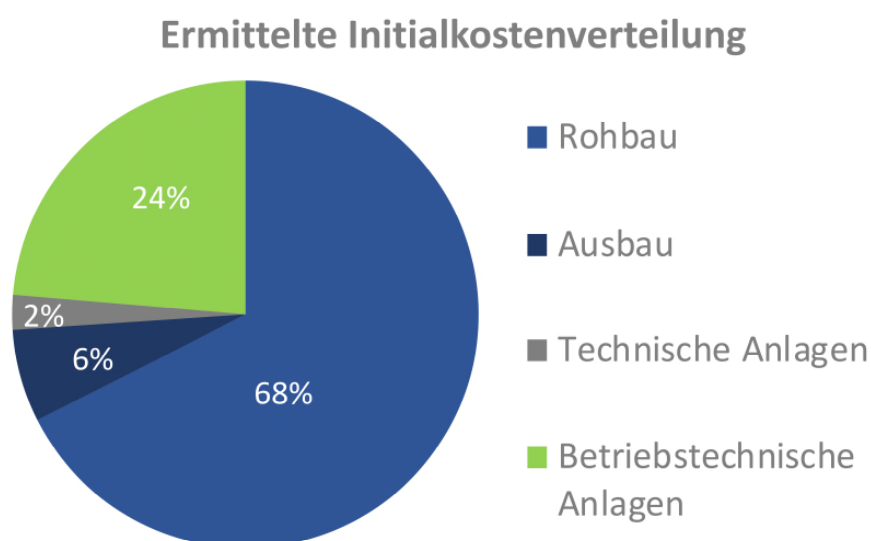


Abbildung 38: Ermittelte anfängliche Kostenverteilung

Die Bedeutung des Kalkulationszinssatzes für die Entwicklung der Folgekosten über die Nutzungsdauer zeigt sich insbesondere dann, wenn eine vergleichende Analyse mit dem Referenz-Kalkulationszinssatz von 0% zugrunde gelegt wird (Abbildung 39 bis Abbildung 42).

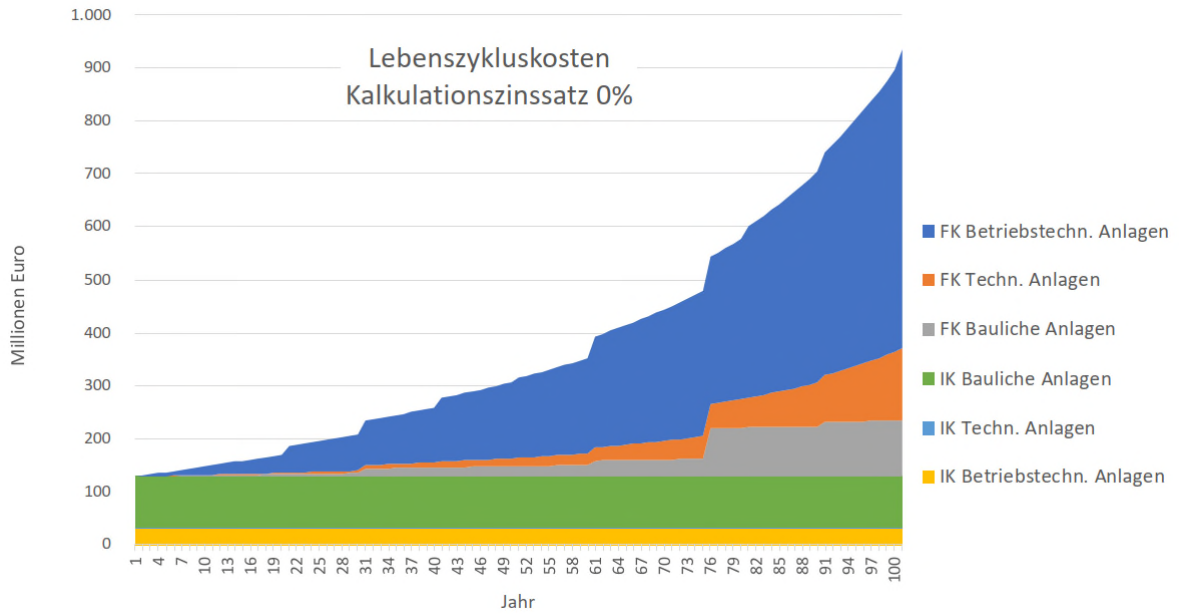


Abbildung 39: Entwicklung der Lebenszykluskosten in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes (Kalkulationszinssatz 0%)

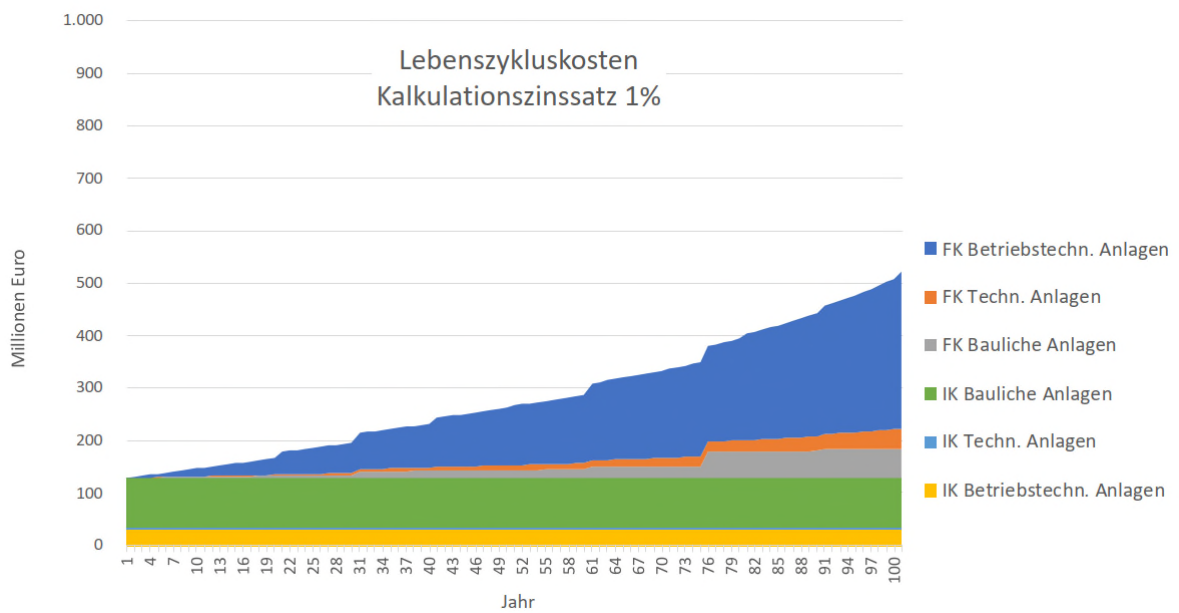


Abbildung 40: Entwicklung der Lebenszykluskosten in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes (Kalkulationszinssatz 1%)

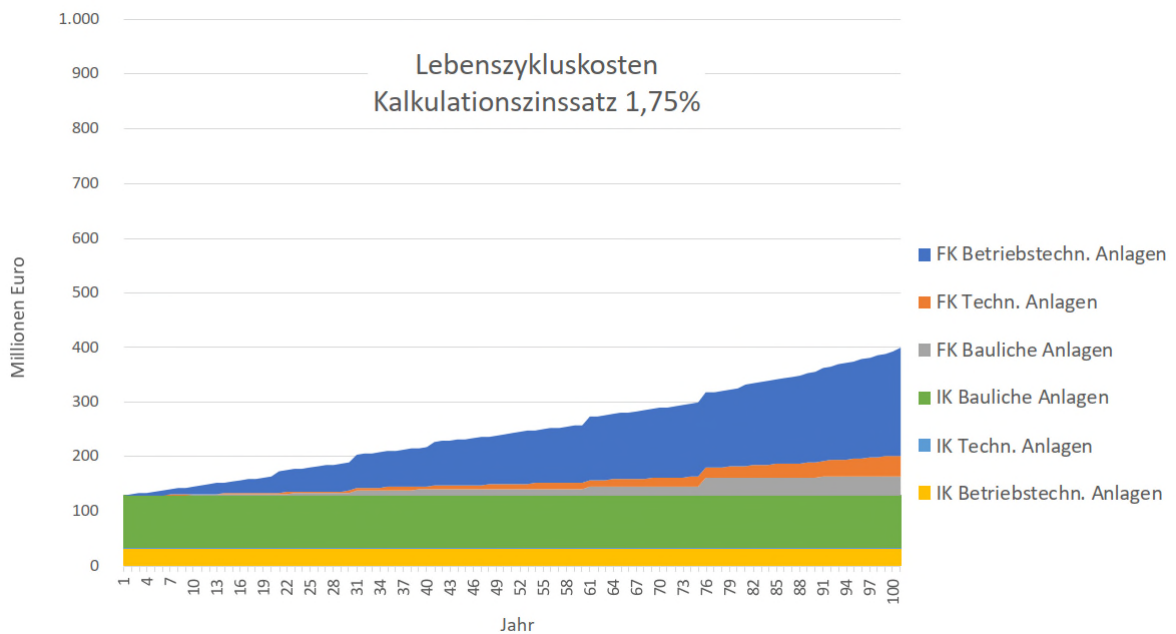


Abbildung 41: Entwicklung der Lebenszykluskosten in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes (Kalkulationszinssatz 1,75%)

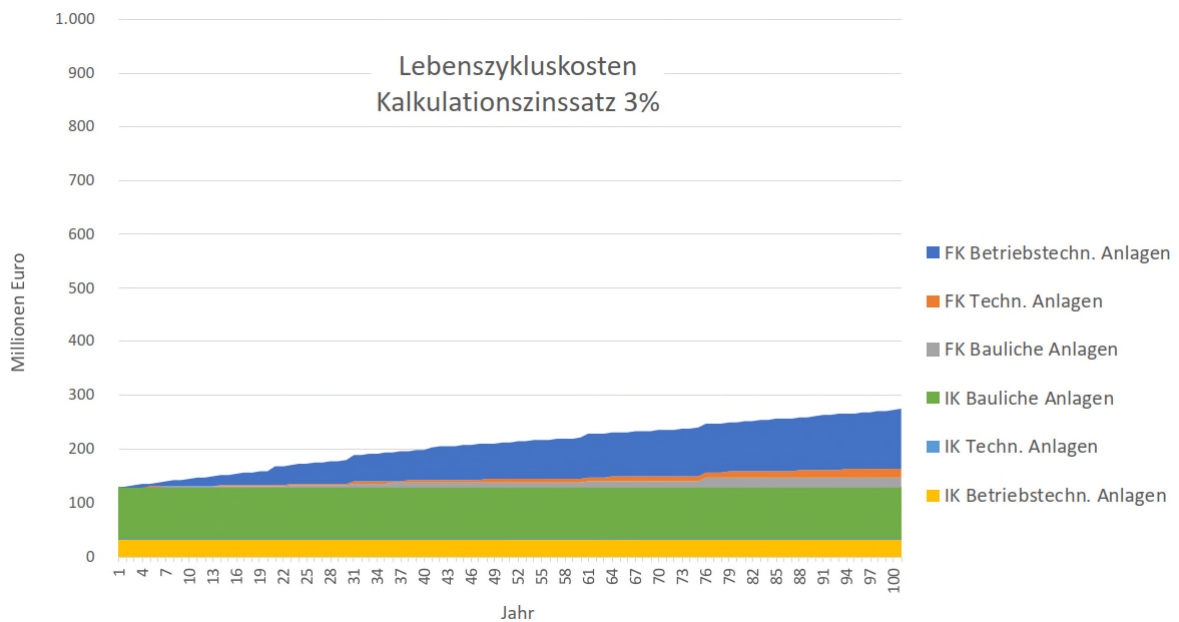


Abbildung 42: Entwicklung der Lebenszykluskosten in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes (Kalkulationszinssatz 3%)

Die umfangreichen Analyse­möglichkeiten der einmal erfassten und standardisierten Daten­unterlagen bieten die Möglichkeit, weitere umfangreiche Detail­analysen durchzuführen und daraus (modul­bezogene) Strategien und Optimierungen abzuleiten.

Dies kann exemplarisch durch folgende Abbildungen dargestellt werden.

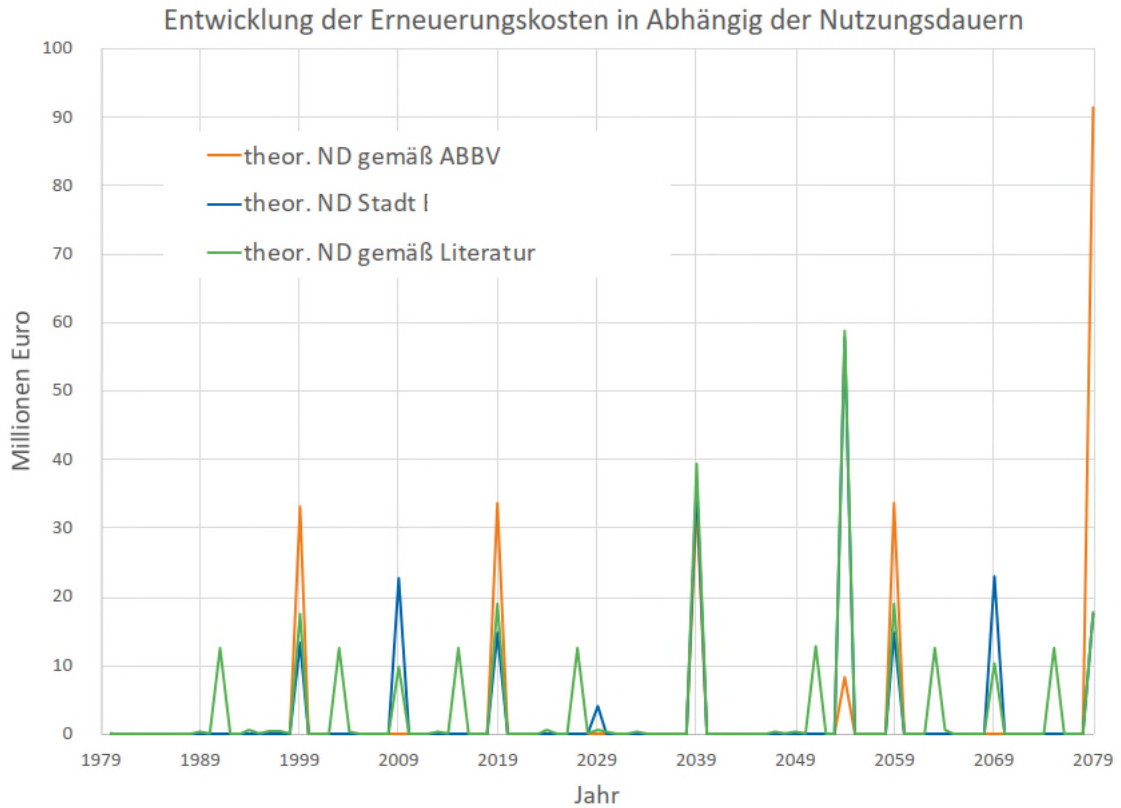


Abbildung 43: Entwicklung der Erneuerungskosten in Abhängigkeit unterschiedlicher Nutzungsdauer-Ansätze

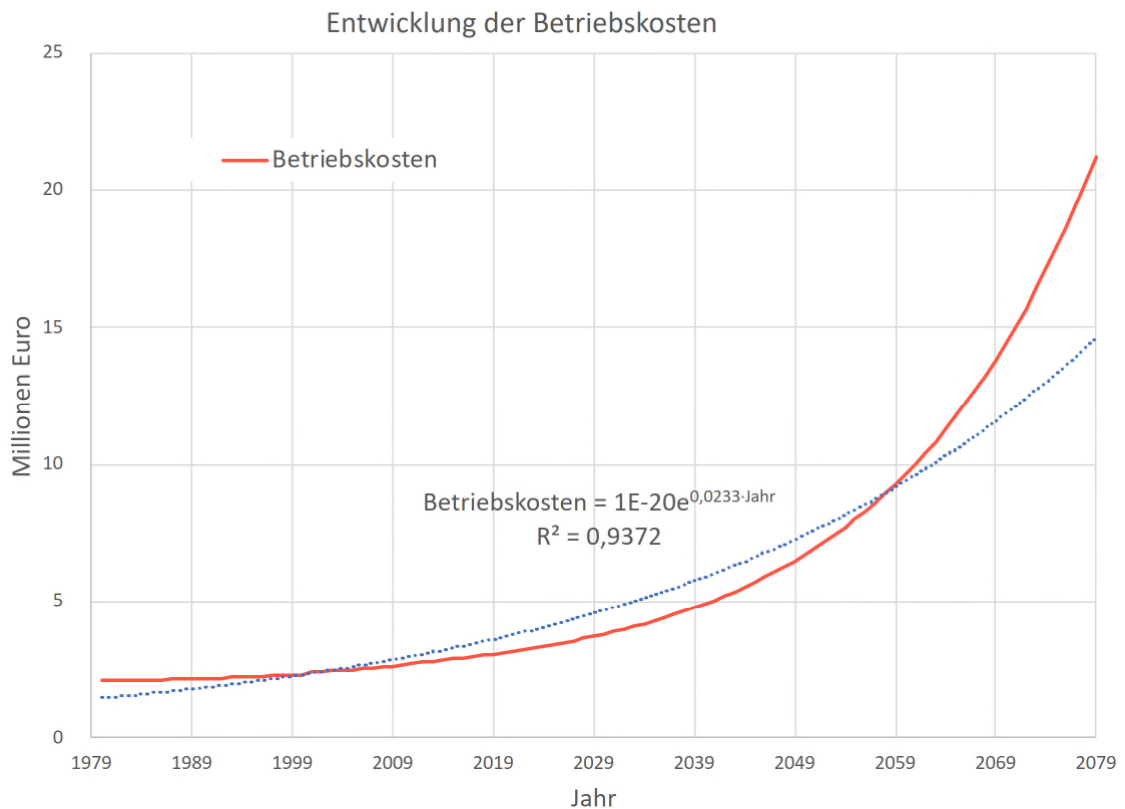


Abbildung 44: Entwicklung der Betriebskosten

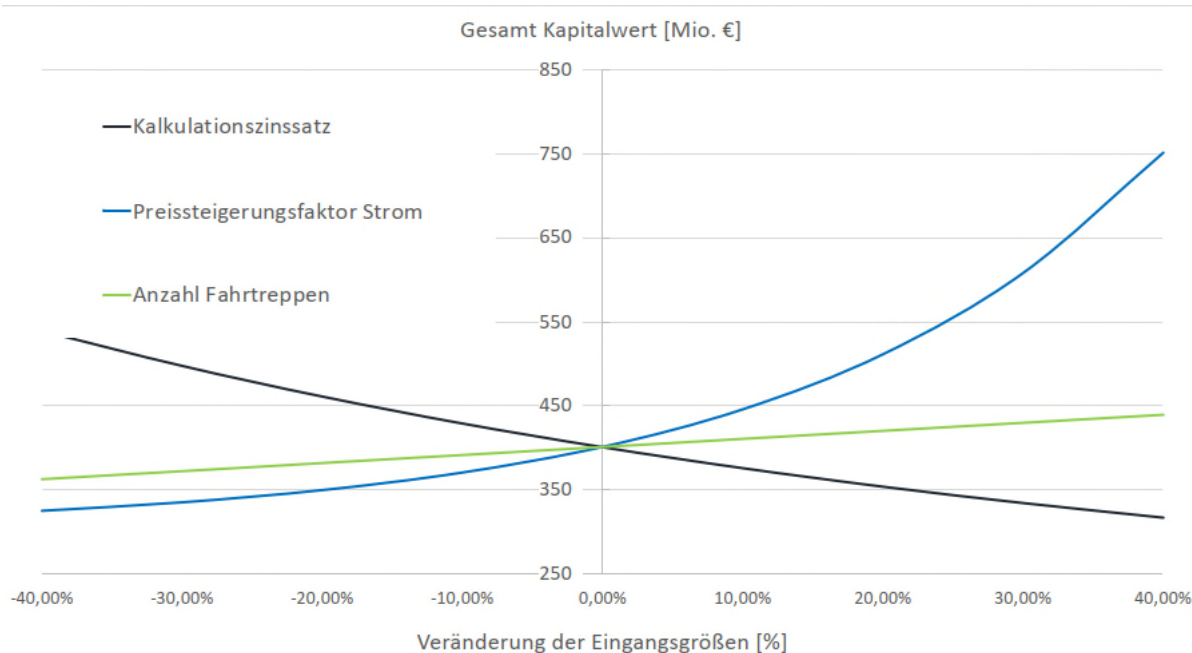


Abbildung 45: Sensitivitätsanalyse

8.6 Ergebnis

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Lebenszykluskosten für Straßentunnel kann konzeptionell auf entsprechende Berechnungen und Vergleichsanalysen für unterirdische Stadtbahnssysteme übertragen werden. Notwendige Voraussetzung sind tief gegliederte Module für Komponenten und Ausstattungselemente und umfassende Datenansätze für Kosten und Nutzungszeiträume. Weitergehende als auch vergleichende Untersuchungen erfordern standardisierte Untergliederungen der Bauwerke auf der Basis entsprechender Leistungsverzeichnisse mit zugeordneten Kosten und Nutzungsdauern.

Durch die Flexibilität und Erweiterbarkeit des Kapitalwertverfahrens ergeben sich umfangreiche Möglichkeiten, sich den praktischen Gegebenheiten vor Ort anzunähern. Der technische Fortschritt, insbesondere bei der technischen und betrieblichen Ausstattung, kann im LZK-Modell durch entsprechende Modernisierungsfaktoren berücksichtigt werden. Insbesondere müssten Modulabhängigkeiten modelliert werden; der Ausfall oder die Wartung eines Moduls kann zwangsläufig zum Funktionsausfall eines technisch angeschlossenen Moduls führen.

Für den Betreiber von Stadtbahnssystemen gibt es in der Regel nicht nur Zahlungsausgänge, sondern auch Zahlungseingänge in Form von Fahrgeldeinnahmen. Da die Kapitalwertmethode die Berücksichtigung von Zahlungen erlaubt (vgl. Kapitel 4), kann dies in die Lebenszykluskostenmodelle integriert werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorliegenden Empfehlung wird ein Verfahren vorgestellt, um die Wirtschaftlichkeit zukünftiger Investitionen bei Tunnelbauprojekten im Hinblick auf den gesamten Lebenszyklus bewerten und vergleichen zu können. Die Grundlage bilden neben der Kenntnis der im Tunnel vorhandenen Bauteile und Ausstattungselemente umfassende Datenansätze für Kosten und Nutzungszeiträume.

Sind die Herstellungskosten bereits in der frühen Planungsphase bekannt, ist die Ermittlung der Folgekosten mit einer Aufwandsabschätzung oder der Recherche nach vorhandenen Erfahrungswerten verbunden. Diese liegen zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht umfangreich vor und liegen damit im Fokus der Betrachtung.

Hier werden detailliert Straßentunnel und ÖPNV-Tunnel betrachtet, die mit Berechnungsansätzen, Daten und mit der Berechnung von Mustertunnelbauwerken dargestellt sind. Bauherren und Betreiber haben damit ein Instrument zur umfassenden Lebenszykluskostenberechnung zur Verfügung.

Auch für Bahntunnel einschließlich HGV ist die Methodik unmittelbar anwendbar. Die wichtigsten Bestimmungen sind zusammengestellt und auch auf spezifische Besonderheiten wird eingegangen. Seitens DB Netz AG als den für Deutschland zuständigen Bauherrn und Betreiber kann die Detaillierung und der notwendige Datenhintergrund intern erarbeitet werden.

Eine Anwendung auf andere Tunnelbauwerke und auf Infrastrukturbauwerke allgemein wird empfohlen. Für alle Anwendungen ist die zukünftige Datenerfassung gezielt auf die Idee der Lebenszykluskosten auszurichten, und ein Datenpool mit den entsprechenden Kosten und Nutzungsdauern als Grundlage aufzubauen.

Die Empfehlung gibt die Grundlage zur Ermittlung der Lebenszykluskosten als wesentliche Säule der Nachhaltigkeit, nämlich der Ökonomie. Nachhaltige Bauwerke sind außerdem in Ökologie und in ihrer sozialen Funktion vorteilhaft. Für die Bewertung der Nachhaltigkeit sind dazu für alle Bauteile ökologische Belastungen und sozialer Impact zu ermitteln, so wie bei den Lebenszykluskosten die monetären Werte. Dies kann nach der Modularisierung des Bauwerks analog für Ökonomie und Soziales erfolgen. Die jeweiligen Zielgrößen sind zu bestimmen und zu bewerten. Als Beispiel sei der CO₂ – Footprint genannt: Nach der Definition des Bewertungsrahmens und der Modularisierung des Bauwerks werden für alle definierten Prozesse die CO₂-Äquivalente ermittelt und summiert, so wie bei der Lebenszykluskostenberechnung die monetären Aus- und Einzahlungen.

Die Bewertung der Nachhaltigkeit insgesamt kann über Zertifizierungssysteme erfolgen, bei denen das zu bewertende Objekt bezüglich verschiedener Kriterien mit Referenzwerten verglichen wird. Dazu besteht Forschungsbedarf, da es aktuell keine Referenzwerte für Infrastrukturbauwerke gibt. Eine direkte Bewertung, auch ein Variantenvergleich, wäre möglich, wenn alle Einflüsse monetarisiert und dann summiert werden.⁹⁵

Die Modularisierung eignet sich ideal für die Verknüpfung mit einem BIM-Modell. Die Module werden als Objekte des Modells definiert, denen die Prozesse und deren Auswirkungen als Attribute zugeordnet werden. Letztlich wäre dies eine Vereinfachung und Automatisierung der Berechnung der Lebenszykluskosten, mit derselben hier beschriebenen Methodik.

⁹⁵ Verfahren zur Monetarisierung finden sich z.B. in der Arbeit von LISSON (2014)

10 Literaturverzeichnis

ABBV (2010)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – ABBV)*. Bonn, 2010.

ADDEN, THEWES, LEHAN (2016)

Adden, H.; Thewes, M.; Lehan, A.: *Life-Cycle Costing. An Economic Approach to Evaluate the Operational Equipment of Tunnels*. Proceedings of the ITA World Tunnel Congress 2016, San Francisco, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).

AEG (2020)

Bundesministerium für Verkehr: Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG), Bonn, 1993, zuletzt geändert 03.12.2020.

ASB-ING (2013)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten (ASB-ING)*. Bonn, 2013.

BECKER (1986)

Becker, C.: *Lebenszykluskosten. Grundlagen und Anwendung bei „Serienprodukten“*. In: Symposium Life Cycle Cost (1985), Hrsg. Schelle, H., Gesellschaft für Projektmanagement INTERNET Deutschland e. V. München, 1986, S. 23-50.

BLOHM; LÜDER; SCHAEFER (2012)

Blohm, H.; Lüder, K.; Schaefer, C.: *Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung*. Vahlen Verlag, München, 2012.

BMVI (2021)

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Leistungsheft für den Straßenbetrieb auf Bundesfernstraßen*. Bonn, 2021.

BMWSB (2015)

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. Bonn, 2015. https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/BNB_Steckbriefe_Buero_Neubau/aktuell/BNB_BN2015_211aktualisiert.pdf

BOSTRAB (2019)

Bundesministerium für Verkehr: *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen*. 1987, zuletzt geändert 01.10.2019.

BOUSSABAIN; KIRKHAM (2006)

Boussabaine, A.; Kirkham, R.: *Whole Life-cycle Costing – Risk and risk responses*. Blackwell Publishing, Oxford (UK), 2004, reprinted 2006.

BVWP (2016)

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI):
Bundesverkehrswegeplan 2030. Bonn, 2016.

COTTIN, DÖHLER (2013)

Cottin, C.; Döhler, S.: *Risikoanalyse*. 2. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013.

DAHOUUD (2023)

Dahoud, H.: *Lebenszykluskostenberechnungen zur wirtschaftlichen Analyse unterirdischer Stadtbahnanlagen am Beispiel der Bochumer Stadtbahnstrecken U21 und 306*, Masterarbeit an der Ruhr Universität Bochum, 2023.

DIN 31051 (2012)

DIN 31051: *Grundlagen der Instandhaltung*. Beuth Verlag, Berlin, 2012.

DIN 1076 (1999)

DIN 1076: *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung*. Beuth Verlag, Berlin, 1999.

DIN EN 13306 (2018)

DIN EN 13306: *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*. Beuth Verlag, Berlin, 2018.

DMRB (1999)

Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), Volume 2, Section 2, Part 9, BD 78/99:
Design of Road Tunnels. London: Department for Transport, August 1999.

EABT-80/100 (2019)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h*. Eigenverlag, Köln, 2019.

ENGELHARDT (2015)

Engelhardt, S.: *Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken – Modulares Prozessmodell zur ökonomischen Optimierung von Straßentunneln*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Institut für Baubetrieb, Dr. Hut Verlag, München, 2015. https://athene-forschung.unibw.de/92541?query=Engelhardt&show_id=101423

EU (2019)

Verordnung Europäische Kommission: *VERORDNUNG (EU) 2019/2020 DER KOMMISSION vom 1. Oktober 2019 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Lichtquellen und separate Betriebsgeräte gemäß der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 244/2009, (EG) Nr. 245/2009 und (EU) Nr. 1194/2012 der Kommission*. Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel, 2019.

FECK (2007)

Feck, N.: *Monte-Carlo-Simulation bei der Lebenszyklusanalyse eines Hot-Dry-Rock-Heizwerkes*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ausgabe 20, Bochum, 2007.

FISHMAN (1996)

Fishman, G. S.: *Monte Carlo – Concepts, Algorithms and Applications*. Springer Verlag, New York (USA), 1996.

FGSV (1996)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Dokumentation von Straßentunneln*. Eigenverlag, Köln, 1996.

FGSV (2011)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT)*. Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement. Eigenverlag, Köln, 2011.

FREIMANN (2020)

Freimann, J.: *Life Cycle Costing als ökonomischer Bewertungsansatz für unterirdische Stadtbahnanlagen am Beispiel ausgewählter Streckenabschnitte der Bochumer Stadtbahnlinie 308/318*, Masterarbeit an der Ruhr Universität Bochum, 2020.

FSV (2014)

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene Verkehr (FSV): Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS); RVS 13.03.41 – *Qualitätssicherung bauliche Erhaltung – Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten – Straßentunnel – Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2014.

GÄNßMANTEL et al. (2005)

Gänßmantel, J.; Geburtig, G.; Schau, A.: *Sanierung und Facility Management. Nachhaltiges Bauinstandhalten und Bauinstandsetzen*. Springer Verlag, 2005.

GÖTZE, BLOECH (1993)

Götze, U.; Bloech, J.: *Investitionsrechnung – Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Springer Verlag, Berlin, 1993.

HOAI (2021)

Bundesrechtsverordnung: *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen. Bundesrechtsverordnung*, letzte Änderungen 2021.

INTRAPLAN CONSULT (2017):

Intraplan Consult GmbH: *Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr*. Version 2016. Verfahrensanleitung. Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur im Rahmen des Forschungsprojekts FE 70.893/2014.

ISO (2008)

ISO/FDIS 15686-5: *Buildings and constructed assets – Service-life planning – Part 5: Life-cycle costing/Gebäude und konstruierte Anlagen – Lebensdauerplanung – Teil 5: Lebenszykluskosten*. International Organization for Standardization, ISO Copyright Office, Genf (CH), 2008.

KOMHVO (2018)

Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung, Ministerium der Finanzen: *Verordnung über das Haushaltswesen der Kommunen im Land Nordrhein-Westfalen (Kommunalhaushaltsverordnung Nordrhein-Westfalen - KomHVO NRW)*. Landesrecht Nordrhein-Westfalen, Rechtsverordnung, 2018.

KOSTRZEWA (2015)

Kostrzewa, M.: *Tunnelbetrieb in Deutschland*. In: Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach (Hrsg.), BASt Tunnelsymposium 2015, S. 5-9.

LEHAN (2017)

Lehan, A.: *Bewertung des bisherigen Ansatzes der theoretischen Nutzungsdauer der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausstattung von Straßentunneln im Rahmen der Lebenszykluskostenanalyse*. Bundesanstalt für Straßenwesen, vorläufige Erhebung zum Bericht zum Projekt F1100.2315006, Bergisch Gladbach, 2017.

LEHAN (2020)

Lehan, A.; Thewes, M.: *Einfluss der Nutzungsdauer auf die Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken*. In: Tagungsband zum 9. BASt-Tunnelsymposium, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 157, Bergisch Gladbach: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, 2020.

LISSON (2014)

Lisson, M.: *Ganzheitliche Projektbewertung - Entwicklung eines Modells zur Nachhaltigkeitsbewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen - Umsetzung in Planung und Projektentscheidung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Institut für Baubetrieb, Dr. Hut Verlag, München, 2014. https://athene-forschung.unibw.de/85231?sortfield0=-authors&sortfield1=&show_id=91052

MBI NRW (2005)

Land Nordrhein-Westfalen: Ministerialblatt (MBI. NRW.) Nr. 15, Anlage 15 „NKF Rahmentabelle der Gesamtnutzungsdauer für kommunale Vermögensstände“, 2005. file:///C:/Users/ml/Downloads/mbi_2005_15-1anl15.pdf

M KWPT (2015)

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement: Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln. Köln, 2015.

PBEFG (2022)

Personenbeförderungsgesetz: Personenbeförderungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. August 1990 (BGBl. I S. 1690), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. April 2021 (BGBl. I S. 822) geändert worden ist, 1961, zuletzt angepasst am 01.07.2022.

PIARC (2004)

PIARC – Technical Committee C.4 Road Tunnel Operations: *Life cycle aspects of electrical road tunnel equipment*, La Défense cedex: World Road Association, 2012.

RABT (2006)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)*. Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit. Eigenverlag, Köln, 2006.

RI-ERH-ING (2021)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten RI-ERH-ING – Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse OSA*, 2021.

RIL853 (2018)

DB Netz AG: *Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten*. Frankfurt am Main, DB Netz AG, gültig seit 2002, letzte Änderungen 2018.

RI-WI-BRÜ (2007)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ)*, Bonn, 2007.

RUB (2018)

Hoffmann, P., Vollmann G., Thewes, M., Adden, H., Wuttig, A. und Riepe, W. (2018): *FE 15.577/2012/ERB Verfahren für Kostenansätze bei Straßentunneln. Schlussbericht (unveröffentlicht) – Erstellt am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)*, 2018.

RWVA (1997)

Bundesministerium für Verkehr: *Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen*; Verkehrsblatt-Dokument Nr. B 6740, Verkehrsbl.-Verlag, Dortmund 1997.

RWVZ (1997)

Bundesministerium für Verkehr: *Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (RWVZ)*, Bonn 1997.

SIA (2004)

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, „*Projektierung Tunnel - Strassentunnel*“, SN 505 197/2, Zürich (CH), 2004.

STLB (2019)

Standardleistungsbuch für das Bauwesen, 2019. <https://www.stlb-bau-online.de/>

STUVA (2018)

ASFINAG, DB Netz AG, STUVA: *Sachstandsbericht 2017 „Instandsetzungsstrategien und –verfahren für Verkehrstunnel“*; Forschung+Praxis 50 U-Verkehr und unterirdisches Bauen, Ernst & Sohn, Berlin, 2018.

THEWES; VOGT (2014)

Thewes, M.; Vogt, P.: *Modellentwicklung für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln* (The development of a model for the life-cycle cost analysis of road tunnels). *Bauingenieur* 10, 2014, S. 421-430.

THEWES (2019)

Thewes, M.; Hoffmann, P.; Vollmann, G.; Friebel, W.-D.; Kaundinya, I.; Lehan, A.; Wuttig, A.; Riepe, W.: *Entwicklung eines Kostenmodells zur exakteren Abschätzung der Herstellkosten von Tunnelbauwerken – Teil 1*. In: DGGT (Hrsg.), *Taschenbuch für den Tunnelbau 2019*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2019.

THEWES (2020)

Thewes, M.; Hoffmann, P.; Vollmann, G.; Friebel, W.-D.; Kaundinya, I.; Lehan, A.; Wuttig, A.; Riepe, W.: *Entwicklung eines Kostenmodells zur exakteren Abschätzung der Herstellkosten von Tunnelbauwerken – Teil 2*. In: DGGT (Hrsg.), *Taschenbuch für den Tunnelbau 2020*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2020.

TRSTRABBS (2014)

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Technische Regeln für Straßenbahnen – Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen (TRStrab Brandschutz)*. BMVI, 2014.

TRSTRABEA (2011)

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Technische Regeln für Straßenbahnen – Elektrische Anlagen (TRStrab EA)*. BMVI, 2011.

TRTunnel (2015)

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Technische Regeln für Straßenbahnen – Tunnelbau (TRStrab Tunnel)*. BMVI, 2015.

VOGT (2013)

Vogt, P.: *Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften. Shaker Verlag, 2013. <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/VogtPeter/diss.pdf>

VVBAU (2013)

Eisenbahn-Bundesamt: *Verwaltungsvorschrift über die Bauaufsicht im Ingenieurbau, Oberbau und Hochbau*. Eisenbahn-Bundesamt Referat 21, Bonn, 2013.

WELTE (2004)

Welte, U.: *Knowing the useful life period of technical equipment – a prerequisite for safe tunnel operations*. In: *Proceedings of 2nd International Conference Tunnel Safety and Ventilation*. Graz, 2004.

ZTV-ING (2022)

ZTV-ING Teil 5, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Stand 2022/01.