



AUSTRIAN
SOCIETY FOR
GEOMECHANICS



ÖSTERREICHISCHE
GESELLSCHAFT FÜR
GEOMECHANIK

Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten von Verkehrstunneln

**Gesamtheitliche Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Ermittlung
und Darstellung der gewerkeübergreifenden Kosten
über den gesamten Lebenszyklus**

2026



Empfehlung

**für die Ermittlung von Lebenszykluskosten
von Verkehrstunneln**

Gesamtheitliche Vorgangsweise
zur nachvollziehbaren Ermittlung und Darstellung
der gewerkeübergreifenden Kosten
über den gesamten Lebenszyklus

1. Auflage
2026

Leitung

(in alphabetischer Reihenfolge)

Galler Robert

Montanuniversität Leoben

Grunicke Urs

UHG Consult ZT

Mitglieder des Arbeitskreises

(in alphabetischer Reihenfolge)

Anibas Benjamin

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung

Braza Bernhard

Amt der Vorarlberger Landesregierung

Brunner Markus

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung

Eder Manfred

Laabmayr ZT GmbH

Engelbogen Siegfried

ASFINAG

Hillinger Christoph

SCHIG mbH

Hinrichs Reinhard

Amt der Steiermärkischen Landesregierung

Kaller Richard

Wiener Linien

Kohlböck Bernhard

IGT Geotechnik und Tunnelbau ZT GmbH

Kriechhammer Michael

Wiener Linien

Mair Elisabeth

ASFINAG

Matt Robert

ÖBB-Infrastruktur AG

Muncke Martin

ÖBB-Infrastruktur AG

Neuper Georg

ÖBB-Infrastruktur AG

Pfisterer Hannes

LLP Engineering GmbH

Reichl Ignaz

Turner & Townsend

Reichard Norbert

ÖSTU-STETTIN Hoch- und Tiefbau GmbH

Steiner Michael

ASFINAG

Wallner Simon

Wiener Linien

Werner Simon

Wiener Linien

Wieland Gregor

Amt der Tiroler Landesregierung

Review

Diese Empfehlung wurde zum Zwecke des Reviews einem ausgewählten Expertengremium vorgelegt. Sämtliche Rückmeldungen wurden bearbeitet, Änderungsvorschläge gegebenenfalls eingearbeitet und die Ergebnisse den Reviewern zur Verfügung gestellt.

© ÖGG, Salzburg, 23. Juli 2026

INHALTSVERZEICHNIS

1.	VORWORT	4
1.1.	Motivation und Zielsetzung	4
1.2.	Anwendungsbereich	5
1.3.	Grundsätzlicher Ablauf	6
2.	BEGRIFFE	7
3.	ABKÜRZUNGEN	12
4.	LEBENSZYKLUS	13
4.1.	Lebenszyklus von Tunneln der Verkehrsinfrastruktur	13
4.2.	Einflussfaktoren auf Lebenszyklus und Brauchbarkeitsdauer	15
4.3.	Alterungsverhalten	17
4.4.	LCM-Strategien	20
5.	KOSTEN	23
5.1.	Grundlagen der Kostenermittlung	23
5.2.	Kostenbestandteile	25
5.3.	Ergebnisgrößen	31
6.	BERECHNUNGSTOOL ÖGG-TLC³	33
7.	FIKTIVES BEISPIEL: STRASSENTUNNEL NEUBAU MIT VARIANTENBETRACHTUNG	34
7.1.	Einleitung	34
7.2.	Beschreibung des Tunnelobjekts	34
7.3.	Elementkatalog	36
7.4.	Querschnittsdefinition	37
7.5.	Tunneldefinition	39
7.6.	Aufbau Lebenszyklus	39
7.7.	Risikoansätze	42
7.8.	Ergebnisse	43
8.	LITERATURVERZEICHNIS	48

1. VORWORT

1.1. Motivation und Zielsetzung

Verkehrsinfrastruktur im europäischen Alpenraum ist ohne Ingenieurbauwerke kaum vorstellbar. Für die Errichtung von Verkehrsrouten durch große Gebirgsmassive oder in Ballungszentren sind neben Brücken auch Tunnelbauwerke von großer Bedeutung. Dabei werden insbesondere an Tunnelröhren sehr hohe Anforderungen gestellt, da selten geeignete Ausweichrouten vorhanden sind. Neben Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit spielt dabei auch die Langlebigkeit eine bedeutende Rolle. Die Erreichung dieser Zielaspekte im Sinne der Nachhaltigkeit ist durch die verfügbaren finanziellen Mittel limitiert. Um ein möglichst umfassendes Bild der Errichtungs- und Folgekosten zu erlangen und um der langen Nutzungs- bzw. Brauchbarkeitsdauer von Tunnelbauwerken gerecht zu werden, sollte stets der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden.

Umso wichtiger ist die Bewusstseinsbildung bei Anlagenverantwortlichen und Stakeholdern, dass ein Tunnel im gesamten Lebenszyklus Kosten verursacht, auch wenn deren Ausmaß und Verteilung höchst unterschiedlich und pauschal mitunter nur schwer abzuschätzen sind. Dies schmälert jedoch nicht den Anspruch, diese Kosten möglichst vollständig zu erfassen, da sie erst gesamtheitlich die sogenannten Lebenszykluskosten (bzw. Life Cycle Costs oder LCC) eines Tunnelbauwerks darstellen. Diese Herangehensweise ist bereits in frühen Projektphasen relevant – beispielsweise in der Konzeptions- und Planungsphase –, da die Beeinflussbarkeit der Kosten im Zeitverlauf sukzessive abnimmt. Getroffene Entscheidungen und Weichenstellungen in frühen Lebenszyklusphasen können sehr lange nachwirken und auch irreversible Auswirkungen bzw. Folgekosten nach sich ziehen.

Im Idealfall sollte man bei Entscheidungen im Zusammenhang mit Tunnelbauwerken daher stets auf Nachhaltigkeit und Resilienz Bedacht nehmen – selbst dann, wenn dies für den Moment höhere Kosten verursacht, aber im gesamten Lebenszyklus des Bauwerks einen positiven Effekt auf die Kosten und/oder die Qualität erzielt. In diesem Sinne zu handeln und generationsübergreifend zu denken, ist auch als gesellschaftliche Verantwortung zu sehen, um nachfolgende Generationen nicht unverhältnismäßig zu belasten. Im Zusammenhang mit Tunnelbauwerken fällt diese Rolle in der Regel insbesondere Sektorenauftraggebern und politischen Entscheidungsträgern zu, denen automatisch auch eine Art Vorbildfunktion zukommt. Um dieser Rolle gerecht zu werden, ist eine fundierte Erfassung und Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten erforderlich, die eine wichtige Ausgangsbasis für Nachhaltigkeitsüberlegungen und Entscheidungsprozesse darstellt.

Mit der *ÖGG-Richtlinie für die Kostenermittlung für Projekte der Verkehrsinfrastruktur*, welche mittlerweile in der 2. Auflage [1] vorliegt, wurde die Grundlage zu einer systematischen, vollständigen und vor allem nachvollziehbaren Ermittlung und Darstellung von Projektkosten bei Neubauprojekten gelegt. Ihr sinnvoller Anwendungsbereich endet jedoch mit der Inbetriebnahme der Infrastruktur. Die vorliegende Empfehlung soll daran anschließend die Erfassung der Kosten von der Inbetriebnahme bis zum Ende der Lebensdauer darstellen. Sie beinhaltet ein Excel-basiertes Hilfsmittel (ÖGG-TLC³, siehe Kap. 6) zur systematischen Erfassung, Auswertung und Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten von Tunnelobjekten in Jahresscheiben. Die Unterteilung in Basiskosten (B), Risikokosten (R) und Vorausvalorisierung (V) entspricht inkl. einer optionalen Diskontierung (D) dem aktuellen Stand der Technik und ermöglicht eine individuelle Berücksichtigung verschiedener Anlagenkomponenten und Gewerke sowie unterschiedlicher Alterungsprozesse, Brauchbarkeitsdauern und daraus abgeleiteter Kosten für Erhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen (siehe Kap. 5.2). Werden die Erst- und Folgekosten eines Tunnels in allen Lebenszyklusphasen detailliert erfasst, so bilden diese eine fundierte Entscheidungsgrundlage und sollten auch als Teil eines nachhaltigen Life Cycle Managements gesehen werden (siehe Kap. 0).

1.2. Anwendungsbereich

Diese Empfehlung soll eine Hilfestellung zur möglichst vollständigen Ermittlung und nachvollziehbaren Darstellung der Lebenszykluskosten von Tunnelobjekten der Verkehrsinfrastruktur geben.

Die Systematik dieser Empfehlung und des hier begleitend zur Verfügung gestellten Berechnungstools ÖGG-TLC³ (vgl. Kap. 6) ist spezifisch auf Verkehrstunnel im österreichischen Kontext ausgerichtet. Dabei wurde auf die üblichen Anlagentypologien, vorhandenen Datengrundlagen und -strukturen der größeren österreichischen Verkehrsinfrastrukturbetreiber Rücksicht genommen. Kostenstruktur, Kostenträger und Finanzierungsart sind zwischen den Organisationen abweichend. Die allgemeinen Grundsätze finden sich aber bei allen in ähnlicher Weise wieder, sodass die vorliegende Empfehlung einen gemeinsamen Nenner darstellt, auf den bei der konkreten Anwendung die Prozesse, Begrifflichkeiten und Zuordnungen der jeweiligen Organisation aufsetzen können.

Die Ermittlung von Lebenszykluskosten kann zu verschiedenen Zeitpunkten und in verschiedenen Detaillierungsgraden erfolgen. So kann sie vor Umsetzung eines Neubauprojekts dazu dienen, die für den bevorstehenden gesamten Lebenszyklus zu erwartenden Kosten zu erfassen und verschiedene Projektvarianten gegenüberzustellen. Bei bestehenden Tunnelanlagen hingegen sind für die zukünftige Erhaltungsplanung neben der Verfügbarkeit meist die Kosten über den restlichen Lebenszyklus von Interesse. Die Betrachtungstiefe kann je nach Zweck der Kostenermittlung entweder sehr detailliert (z.B. für einen Vergleich zwischen technischen Detailvarianten) oder auch sehr global (z.B. für eine Abschätzung des langfristigen Mittelbedarfs des Tunnelportfolios) gehalten werden.

Die sachlichen, zeitlichen und räumlichen Systemgrenzen sind stets im Einzelfall entsprechend dem jeweiligen Zweck der Lebenszyklusbetrachtung zu wählen.

Die gegenständliche Empfehlung beschränkt sich auf Kosten im unmittelbaren Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb der Anlagen. Nicht Gegenstand der Empfehlung und des Berechnungstools ÖGG-TLC³ sind Finanzierungskosten oder -beiträge (z.B. Kostenbeiträge Dritter), zusätzliche volkswirtschaftliche Kosten und Nutzen (z.B. Umweltkosten, Verfügbarkeitskosten) und Erträge im Allgemeinen (z.B. Mauteinnahmen oder Infrastrukturbenützungsentgelte). Diese Eingrenzung zielt auf maximale Kostentransparenz ab, wobei eine sinngemäße Erweiterung bzw. Berücksichtigung weiterer Aspekte im Einzelfall möglich wäre.

Die Ansätze von Kosten, Nutzungs- und Brauchbarkeitsdauern oder Maßnahmenintervallen weisen naturgemäß sehr große Bandbreiten und Spreizungen auf, die u.a. von der Art des Verkehrsträgers, den geologischen und technischen Randbedingungen und der Betriebsführung der Anlage abhängen. Die in dieser Empfehlung, im begleitenden Berechnungstool ÖGG-TLC³ und in allfälligen Beispielen dargestellten Größen stellen daher keinesfalls typische Richtwerte dar, sondern dienen ausschließlich der exemplarischen Illustration der Methodik.

Aufgrund verschiedener Gesellschafts- und Organisationsformen, unterschiedlicher Finanzierungssysteme der Errichter- und Betreibergesellschaften sowie gesetzlicher Vorgaben liegen systemimmanent unterschiedliche Kostenstrukturen, Projektabgrenzungen und Kosten vor. Weiters beeinflussen die Instandhaltungsstrategien und die Erbringung dieser Leistungen als Eigen- oder Fremdleistung die Darstellung der Kosten.

1.3. Grundsätzlicher Ablauf

Das nachstehende Flussdiagramm (Abbildung 1) zeigt den methodischen Ablauf zur Ermittlung der Lebenszykluskosten im Sinne dieser Empfehlung. Bei den einzelnen Bearbeitungsschritten wird auf die jeweils relevanten Kapitel dieser Empfehlung verwiesen.

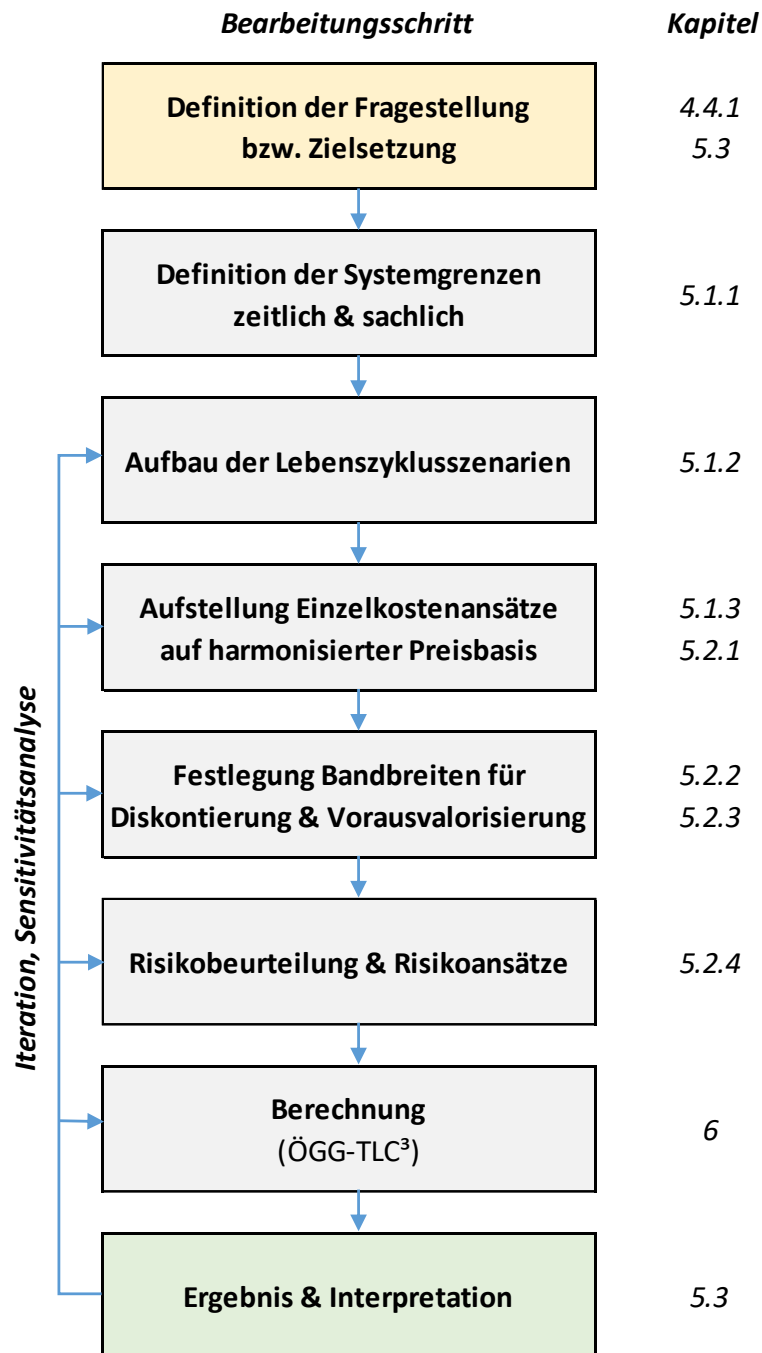


Abbildung 1: methodischer Ablauf der Ermittlung von Lebenszykluskosten von Verkehrstunneln

2. BEGRIFFE

Für das Gesamtverständnis wesentliche und in dieser Empfehlung verwendete Begriffe sind nachfolgend zusammengestellt. Dabei werden vorhandene Regelwerke berücksichtigt. Nach Möglichkeit wurden bestehende Begriffsdefinitionen also direkt übernommen – insbesondere aus europäischen und nationalen Normen. Besonders erwähnenswert sind hierbei die

- ÖNORM EN 13306: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung [5]
- DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung [7], und die
- ÖGG-Richtlinie für die Kostenermittlung für Projekte der Verkehrsinfrastruktur [1]

Aus der bei jedem Begriff angeführten [Quelle] ist ersichtlich, ob es sich um eine wörtliche Übernahme der Definition aus dem angeführten Regelwerk, um eine Definition „in Anlehnung“ an die zitierte Quelle oder bei Fehlen einer Quellenangabe um eine Eigendefinition der Arbeitsgruppe handelt.

Abnutzung [7]

Abbau des Abnutzungsvorrats, hervorgerufen durch chemische und/oder physikalische Vorgänge.

Anmerkung 1: Solche Vorgänge, die durch unterschiedliche Beanspruchungen hervorgerufen werden, sind z. B. Reibung, Korrosion, Ermüdung, Alterung, Kavitation, Bruch usw.

Anmerkung 2: Abnutzung ist unvermeidbar.

Anmerkung 3: Beispiel für Abbau des Abnutzungsvorrats siehe Abbildung 2

Abnutzungsgrenze [7]

Vereinbarter oder festgelegter Mindestwert des Abnutzungsvorrats.

Anmerkung 1: vgl. auch Abbildung 2

Abnutzungsprognose [7]

Vorhersage über das Abnutzungsverhalten eines Objekts, die mit Hilfe der Abnutzungsmechanismen aus den bekannten oder angenommenen Belastungen der zukünftigen Bedarfsforderungen ermittelt wird, ausgehend von einem Istzustand des Objekts.

Anmerkung 1: Das Abnutzungsverhalten wird durch die Abbaukurve des Abnutzungsvorrats beschrieben.

Abnutzungsvorrat [7]

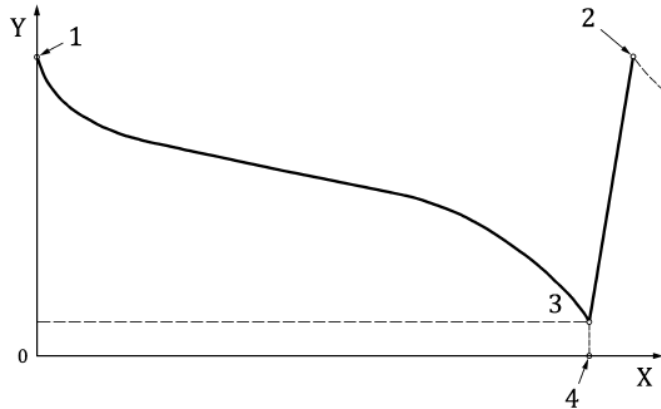
Vorrat der möglichen Funktionserfüllungen unter festgelegten Bedingungen, der eines Objekts aufgrund der Herstellung, Instandsetzung oder Verbesserung innewohnt.

Anmerkung 1: vgl. auch Abbildung 2

Abnutzungsbedingter Ausfall in Anlehnung an [5]

Ausfall, dessen Auftretswahrscheinlichkeit mit der Betriebszeit oder mit der Anzahl der Betriebseinsätze des Objekts und den damit verbundenen Beanspruchungen zunimmt

Anmerkung 1: Abnutzung ist eine physikalische und/oder chemische Erscheinung, die zu Verlust oder Verformung oder Zustandsänderung des Werkstoffs führt.



Legende:

- X Zeit
- Y Abnutzungsvorrat
- 1 Ausgangszustand nach Herstellung
- 2 Ausgangszustand nach Instandsetzung oder Schwachstellenbeseitigung
- 3 Abnutzungsgrenze
- 4 Ausfall

Abbildung 2: Abbau des Abnutzungsvorrats und seine Erstellung durch Instandsetzung oder Verbesserung

Barwert

Siehe Kap. 5.2.3

Basiskosten [1]

Plankosten zu einer definierten Preisbasis unter definierter Annahme von bekanntem Projekteinhalt, Projektterminen und Marktsituation, ohne Kostenansätze für Wertanpassung und Gleitung, Risiken und Vorausvalorisierung.

Brauchbarkeitsdauer in Anlehnung an [5]

Zeitspanne, beginnend ab der ersten Verwendung einer spezifischen Anlage oder Komponente und endend mit dem Zeitpunkt, an dem diese den Grenzzustand erreicht.

Anmerkung 1: Der Grenzzustand kann von Ausfallrate, Erfordernissen der Instandhaltungsunterstützung, Zustand, Wirtschaftlichkeit, Alter, Veralterung/Obsoleszenz, Änderungen der Anforderungen des Betriebes oder anderen einschlägigen Faktoren abhängen.

Anmerkung 2: Der Grenzzustand kann durch Änderungen der Einsatzbedingungen (z.B. Lichtraum, Verkehrsart) neu definiert werden.

Anmerkung 3: In diesem Zusammenhang schließt die „erste Verwendung“ Prüfmaßnahmen vor der Übergabe des Objekts an den Endanwender aus.

Anmerkung 4: Das Erreichen der Abnutzungsgrenze stellt einen Grenzzustand dar.

Diskontierung

siehe Kap. 5.2.3

Erhaltung

Durchführung aller Maßnahmen der Instandhaltung zur Sicherstellung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit/Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Anlage bzw. Komponente über die Brauchbarkeitsdauer. Davon ausgenommen sind Maßnahmen am Ende der Nutzungsdauer wie z.B. Erneuerung oder Entsorgung.

Erneuerung

Ersatz von Bauwerksteilen, Anlagenkomponenten oder Ersatz eines ganzen Bauwerks durch Abbruch und/oder Neubau.

Ertüchtigung

Alle baulichen Maßnahmen die zur Erhöhung der Tragfähigkeit, Funktionssicherheit oder der Erfüllung anderer geänderter bzw. erhöhter Anforderungen (z.B. einer erhöhten Leistungsfähigkeit oder Verlängerung der Brauchbarkeit über die Nutzungsdauer hinaus) dienen.

Instandhaltung in Anlehnung an [5]

Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objekts, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung seines funktionsfähigen Zustands dienen, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann.

Instandsetzung in Anlehnung an [5]

Teil der Instandhaltung. Physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion einer fehlerhaften Einheit wiederherzustellen.

Lebenszyklus (Life Cycle) in Anlehnung an [5]

Abfolge von Phasen, die ein Objekt durchläuft, beginnend mit der Konzeption und endend mit der Verwertung/Entsorgung.

Beispiel: Ein typischer System-Lebenszyklus besteht aus Erwerb, Betrieb, Instandhaltung, Modernisierung, Außerbetriebnahme und/oder Verwertung/Entsorgung.

Anmerkung: Die jeweiligen Phasen variieren je nach Anwendung.

Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs) [5]

Summe der Kosten, die während des Lebenszyklus des Objekts auftreten.

Anmerkung: Für einen Nutzer oder Eigentümer eines Objekts können die gesamten Lebenszykluskosten nur die Kosten einschließen, die den Beschaffungsvorgang, den Betrieb, die Instandhaltung und die Entsorgung betreffen.

Lebenszyklusmanagement (Life Cycle Management)

Lebenszyklusmanagement ist ein strategischer und operativer Ansatz zur Verwaltung aller Lebenszyklusphasen einer oder mehrerer ineinandergreifender Bauwerke oder Komponenten mit dem Ziel, Effizienz, Qualität, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren.

Modernisierung [5]

Änderung oder Verbesserung des Objekts unter Berücksichtigung technologischer Fortschritte, um neue und/oder geänderte Anforderungen zu erfüllen.

Nutzungsdauer in Anlehnung an [8] und [9]

Unter Nutzungsdauer wird jene durchschnittliche erwartete Zeitspanne verstanden, während derer eine Anlage oder Komponente bei ordnungsgemäßer Instandhaltung ohne Erneuerung für den Betrieb genutzt werden kann. Hierbei kann unterschieden werden zwischen:

- technische Nutzungsdauer: erwarteter Zeitraum, in dem Anlagen oder Komponenten technisch in der Lage sind, ihre Funktion bzw. ihren Verwendungszweck zu erfüllen.
- betriebsgewöhnliche (bilanzielle) Nutzungsdauer: erwarteter Zeitraum, welcher in der Buchhaltung und Kostenrechnung direkt den Abschreibungszeitraum für das betreffende Anlagevermögen bestimmt.

Preisbasis Jahr [1]

Bezugszeitpunkt für das Preisniveau, welches den Kosten zugrunde gelegt ist.

Risiko [1]

Risiken sind die Auswirkungen von Unsicherheiten auf Ziele. Risiken sind zu unterscheiden in Gefahren und Chancen.

Risikokosten (R) [1]

Risikokosten sind der Kostenbestandteil zur monetären Berücksichtigung von Risiken. Die Risikokosten teilen sich in identifizierte Risiken und Unbekanntes.

Unbekanntes [1]

Als Unbekanntes werden sämtliche Risikokosten bezeichnet, die nicht identifizierbar sind oder in der entsprechenden Projektphase nicht identifiziert wurden.

Technische Instandhaltungsmaßnahmen in Anlehnung an [5]

Diese umfassen die Beobachtung und Analyse des Zustands eines Objekts (z.B. Inspektion, Überwachung, Prüfung, Diagnose, Prognose) sowie aktive Instandhaltungsmaßnahmen (z.B. Wartung, Instandsetzung, Aufarbeitung).

Vorausvalorisierung in Anlehnung an [1]

Methodischer Ansatz zur Berücksichtigung der angenommen zukünftigen Marktpreisentwicklung ab einem Stichtag bis zum Ende des jeweiligen Betrachtungszeitraums.

Wertanpassung und Gleitung [1]

Methodischer Ansatz zur Berücksichtigung der bis zu einem Bezugszeitpunkt bereits eingetretenen Marktpreisentwicklung. Wertanpassung findet in der vorvertraglichen Phase statt, Gleitung in der vertraglichen Phase.

3. ABKÜRZUNGEN

Bezeichnung	Abkürzung
Basiskosten	B
Betriebs- und Sicherheitstechnik	BuS
Barwert	BW
Diskontierung	D
elektromaschinelle Ausstattung	E&M
European Train Control System	ETCS
Wertanpassung und Gleitung	G
Gebirgsverhaltenstyp	GVT
Interner Zinsfuß (Internal Rate of Return)	IRR
Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs)	LCC
Lebenszyklusmanagement (Life Cycle Management)	LCM
Kapitalwert (Net Present Value)	NPV
Kostenansatz für Risiken	R
Vorausvalorisierung	V

4. LEBENSZYKLUS

4.1. Lebenszyklus von Tunneln der Verkehrsinfrastruktur

Der Lebenszyklus eines Tunnels wird abhängig vom Blickwinkel bzw. Modell in unterschiedlich viele Phasen unterteilt, wobei folgende Gliederung im Sinne der gegenständlichen Empfehlung zweckmäßig erscheint. Dazu sei angemerkt, dass in der Praxis fließende Übergänge, Überlappungen, wiederholende Phasen und abweichende Bezeichnungen üblich sind:

- Entwicklung/Planung
- Ersterrichtung/Herstellung
- Betrieb/Nutzung
- Erneuerung/Ertüchtigung
- Rückbau/Verwertung/Nachnutzung

Am Beginn des Lebenszyklus steht eine Entwicklungs- und Planungsphase, die sich mit der Strategie, der Konzeption und der Planung des Tunnelbauwerks beschäftigt. Wird diese Phase erfolgreich abgeschlossen, folgt die Herstellungsphase, die auch als Errichtungs-, Umsetzungs-, Ausführungs- oder Realisierungsphase geläufig ist. Beide Phasen umspannen im gesamten Lebenszyklus eines Tunnels zwar eine recht kurze Zeitspanne, gehen aber gleichzeitig mit hohen Erst- bzw. Initialkosten einher.

Nach Inbetriebnahme des Tunnels beginnt üblicherweise eine lange Betriebs- bzw. Nutzungsphase, deren Zeitdauer im Wesentlichen von der Ausgangsqualität, den Einflüssen von außen, dem Betrieb, der Instandhaltungsstrategie und den Anforderungen an das Tunnelsystem abhängt (siehe Kap. 0). Die Betriebsphase ist mit Folgekosten in Form von Betriebs- und Nutzungskosten verbunden, die üblicherweise bereits ab Inbetriebnahme des Bauwerks anfallen. Hierzu sind neben Inspektion, Wartung und Instandsetzung auch sämtliche sonstige Aufwände der baulichen und betrieblichen Unterhaltung des Bauwerks samt der technischen Ausrüstung zu zählen.

Gelangen ein Tunnel bzw. einzelne Bauteile, (Teil-)Gewerke oder Komponenten desselben schließlich an das voraussichtliche Ende der Brauchbarkeit, folgen strategieabhängig eine Erneuerungsphase (Ertüchtigung oder Modernisierung) und/oder eine Rückbau- bzw. Verwertungsphase, die sich mit der Stilllegung oder Nachnutzung des Tunnels auseinandersetzt und mit dementsprechenden Kosten verbunden ist. Naturgemäß sind diese beiden Phasen sehr eng miteinander verflochten und mitunter sehr komplex. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Gewerke, Bauteile und Komponenten i.d.R. unterschiedliche Lebenszyklen aufweisen. So sind neben gewerkeübergreifenden „Generalerneuerungen“ des Tunnels inkl. einer Verlängerung der Brauchbarkeitsdauer bzw. des Lebenszyklus auch Teilerneuerungen einzelner Gewerke bzw. Komponenten mit und ohne Anpassung der Brauchbarkeitsdauer möglich. Generell kann eine Erneuerungsphase auch mehrmals in einem Lebenszyklus auftreten und ist sehr stark von der jeweiligen Instandsetzungsstrategie abhängig (z.B. regelmäßige Maßnahmen kleineren Umfangs im Unterschied zu umfangreichen, aber seltenen Erneuerungen oder einer Minimierung sämtlicher Maßnahmen bis zum geplanten Neubau). Letztlich müssen dabei auch die Fragen beantwortet werden, ob eine geplante Erneuerung im Vergleich zu einem Neubau vertretbar ist, ob der Rückbau eines Bauwerks überhaupt in Frage kommt und welche Strategie langfristig verfolgt werden soll.

Zusammenfassend ist die Gestaltung aller Lebenszyklusphasen für die Anlagenverantwortlichen unter Berücksichtigung der begrenzten Ressourcen sehr komplex, bietet jedoch gleichzeitig viel Potential für nachhaltige Entscheidungen und mögliche Kostenoptimierungen. Die kontinuierliche Betrachtung des gesamten Lebenszyklus stellt dabei eine solide und transparente Entscheidungsgrundlage dar und kann auch die Maßnahmenfinanzierung erleichtern.

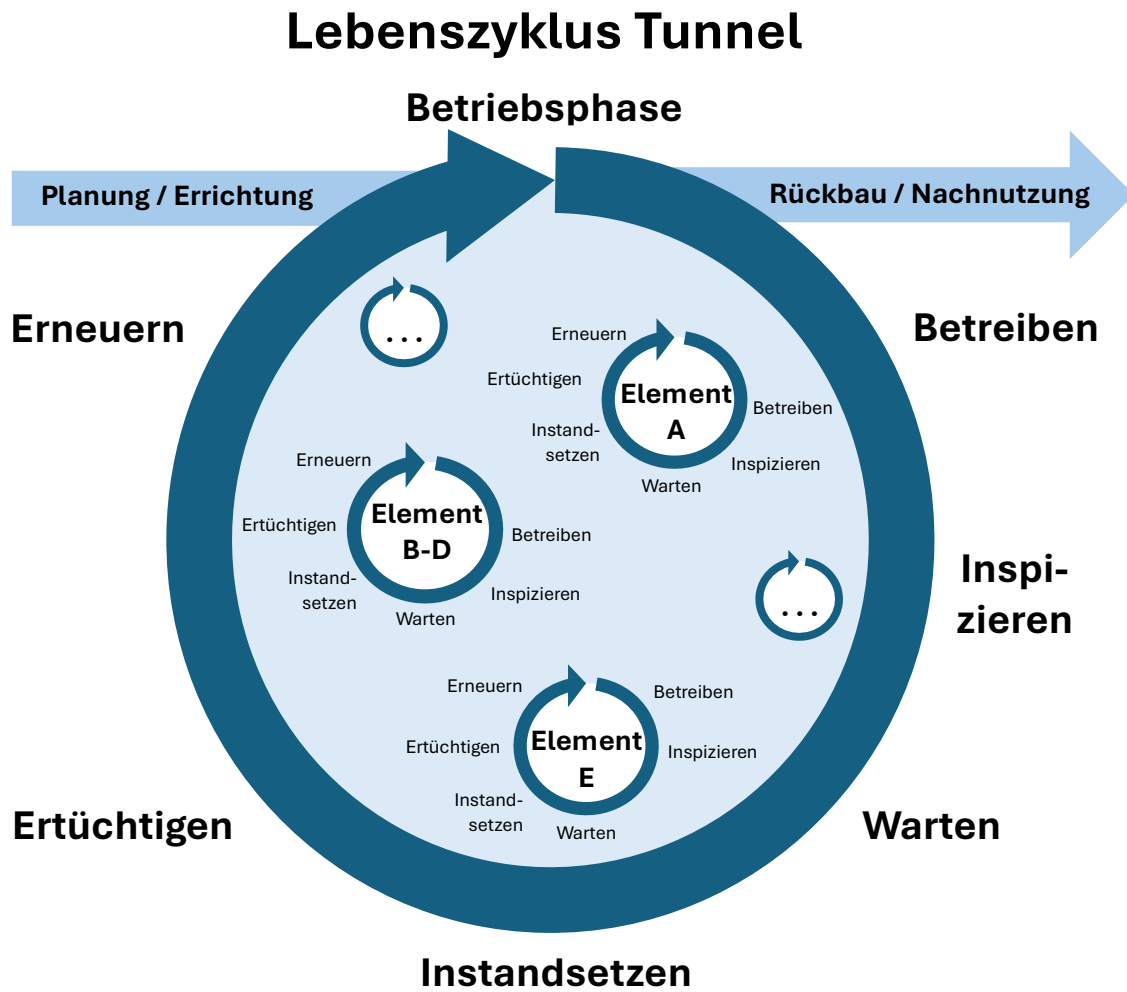


Abbildung 3: Lebenszyklus des Verkehrstunnels und seiner Einzelkomponenten

4.2. Einflussfaktoren auf Lebenszyklus und Brauchbarkeitsdauer

4.2.1 Grundsätzliche und planerische Einflussfaktoren

Die Brauchbarkeitsdauer und damit einhergehend die Instandhaltungszyklen eines Tunnels unterliegen unterschiedlichsten Einflüssen.

Ein einseitiger Fokus auf die Optimierung der Errichtungskosten kann die Ausgangsqualität des Tunnels mindern und zu unverhältnismäßig hohen Anforderungen an die spätere Instandhaltung sowie einer reduzierten technischen Resilienz führen. Über den gesamten Lebenszyklus kann ein derart „optimiertes“ Projekt infolge erhöhter Betriebs- und Erhaltungsaufwände zu signifikant höheren Lebenszykluskosten und reduzierter Anlagenverfügbarkeit führen.

Umgekehrt kann eine inhaltlich wie zeitlich gesamtheitliche Betrachtung bei Planung und Bau eines Tunnels mit Berücksichtigung

- von Systemen für eine einfache und möglichst nicht betriebsbehindernde Instandhaltung,
- einer hohen Qualität der eingebauten Materialien und Systeme,
- möglicher Ertüchtigungsmaßnahmen (z.B. Interventionsraum für Einbau einer Innenschale nach Brandereignis oder am Ende der Brauchbarkeitsdauer)
- einer Optimierung des Restrisikos infolge geänderter Anforderungen an das Bauwerk (z.B. Platz für zusätzliche Kabel oder Reserven für nicht gesichert prognostizierbare geotechnischen Einwirkungen wie Quellen oder druckhaftes Gebirge)

zu einer längeren Brauchbarkeitsdauer des Tunnels und in Summe zu geringeren Lebenszykluskosten führen.

Daher sollte auch im Sinne der Nachhaltigkeit nicht nur auf die Errichtungskosten, sondern auf die Gesamtheit der Lebenszykluskosten geachtet werden.

4.2.2 Technische und betriebliche Einflussfaktoren

Der Lebenszyklus physischer Komponenten in Straßen- oder Bahntunneln ist geprägt durch – mit zunehmendem Alter und Betriebszeit einhergehenden – Veränderungen ihrer ursprünglichen Eigenschaften. Es handelt sich hierbei zumeist um chemische und physikalische Alterungs- und Verschleißprozesse (z.B. chloridinduzierte Korrosion, Frost-Tau-Wechsel, Ermüdung), die zu einer fortschreitenden Schädigung der Werkstoffe oder Einschränkung ihrer Funktionsfähigkeit führen. Auch geomechanische und hydrogeologische Prozesse können den Lebenszyklus von baulichen und elektromaschinellen Anlagenkomponenten erheblich beeinflussen.

Es handelt sich im Wesentlichen um folgende (elektro-)chemischen und physikalischen Umwelt- und Betriebsbedingungen, welche die Degradationsprozesse (d.h. die Zustandsverschlechterung) im Tunnel bzw. in Tunnelkomponenten beeinflussen:

- (elektro-)chemisches Milieu
 - aus (hydro-)geologischen Bedingungen und Tunnelbetrieb
 - Sinterneigung
 - Alkalität/pH, lösende oder treibende Ionen (HCO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+), Feuchtigkeit, Kontakt zwischen Materialien verschiedenen elektrochemischen Potenzials

- physikalisches Milieu
 - aus klimatischen Bedingungen und Tunnelbetrieb
 - Frost, hohe Temperatur, Temperaturwechsel
 - Brand
 - Verschleiß
 - Osmose
 - mechanische Beanspruchung und Ermüdung
 - Staub, Ruß
- geomechanisches Umfeld
 - Umlagerungen, Gebirgsdruck, quellfähiges Gebirge (z.B. Anhydrit)

Einige der Einflüsse sind abhängig von Art und Ausmaß der Verkehrsstärke und des Betriebs (z.B. Verschleiß, Chloridbelastung, Erhaltungsmaßnahmen), andere wiederum von übergeordneten Randbedingungen (wie z.B. qualitative und quantitative Bergwasserverhältnisse, Frost-Tau-Wechsel). Die verwendeten Bau- und Werkstoffe, die Qualität der Verarbeitung und des Einbaus sowie die Art der Konstruktion bestimmen die Widerstandsfähigkeit der Bauteile gegenüber diesen Einflüssen.

Die Dauerhaftigkeit kann in erster Linie durch Verwendung geeigneter Baustoffe, Konstruktionen und Bauprodukten sowie durch Sicherstellung einer hohen Ausführungsqualität bei Errichtung und Erneuerung beeinflusst werden. Während der Betriebsphase kann die Brauchbarkeitsdauer mittels entsprechender Erhaltungsmaßnahmen verlängert werden, wobei bei baulichen Komponenten hinhaltende Instandsetzungsmaßnahmen eher möglich sind als bei Ausrüstungsgewerken. Die Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit von Ausrüstungsgewerken wird durch konsequente Wartungs- und Reinigungszyklen wesentlich beeinflusst. Oft steht auch eine Erneuerung gesamter Gewerke statt einer Instandsetzung im Vordergrund (vgl. dazu Kap. 0).

Eine Rolle spielt auch der Aspekt der sogenannten Instandhaltbarkeit. Für spätere Verstärkungen oder sonstige Interventionen können entsprechende geometrische Reserven („bautechnischer Nutzraum“) hilfreich bzw. entscheidend sein. Auch die Zugänglichkeit der instandzuhaltenden Komponenten ist hier wesentlich (z.B. Entwässerungssystem).

Darüber hinaus können Unfall- und Brandereignisse oder Vandalismus die Brauchbarkeitsdauer von Einzelkomponenten reduzieren bis frühzeitig beenden.

Auch wenn eine Komponente oder ein Bauteil abgetragen werden muss, um ein anderes Bauteil inzusetzen, kann dies den Lebenszyklus verkürzen. Die engen räumlichen und funktionalen Verschränkungen der in Verkehrstunneln verbauten Komponenten kann dazu führen, dass deren technische Nutzungsdauer oft nicht zur Gänze ausschöpfbar ist (vgl. Kap. 4.4.2).

4.2.3 Sozio-ökonomische und rechtliche Einflussfaktoren

Die rechtlichen und normativen Randbedingungen unterliegen einem laufenden Wandel. Gesetzliche Vorschriften (z.B. Richtlinie 2004/54/EG [13] bzw. RVS 09.03.11 bei Straßentunnel [12] oder die TSI-SRT bei Eisenbahntunnel [14]) bestimmen maßgebend den Ausstattungsgrad. Technologien und Standards (z.B. ETCS) entwickeln sich schneller weiter als der Lebenszyklus der betroffenen Komponenten.

Dies kann dazu führen, dass Ersatzteile nicht mehr verfügbar sind und ggf. Anlagenteile erneuert werden müssen, obwohl deren Nutzungsdauer noch nicht erreicht ist, um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten.

Auch geänderte makroökonomische Randbedingungen können Änderungen an Anlagen oder Anlagenteilen vor dem Erreichen der Nutzungsdauer erforderlich machen (z.B. Änderung der Verkehrsstärke und/oder Verkehrsart, der Traktion bei der Bahn, des Schwerverkehrsanteils bei der Straße oder des Lichtraumprofils).

Letztlich können auch fehlende Möglichkeiten zur Durchführung von erforderlichen Instandsetzungen, wie z.B. ein fehlender Interventionsraum oder ein gesamtgesellschaftliches Interesse an uneingeschränkter Nutzung zur Aufrechterhaltung des Betriebs die Brauchbarkeitsdauer reduzieren.

4.3. Alterungsverhalten

4.3.1 Allgemeines

Die Kenntnis oder zumindest eine Einschätzung des Alterungsverhaltens der verbauten Komponenten ist für die Erstellung von Prognosen zwingend erforderlich. Diese wiederum sind notwendige Voraussetzung für eine vorausschauende Bewirtschaftung und die Entwicklung von mittel- und langfristigen Instandhaltungsstrategien sowohl am Bauteil, Einzelobjekt als auch am Tunnelportfolio.

Die Brauchbarkeitsdauer eines Tunnels kann hinsichtlich der Störungshäufigkeit in drei Phasen unterschieden werden (vgl. auch Abbildung 5):

- abnehmende Störungshäufigkeit - frühe Ausfälle
- konstante Störungshäufigkeit - Zufallsausfälle
- zunehmende Störungshäufigkeit - Alterserscheinung

4.3.2 Bautechnische Komponenten

Eine Folge der Alterung ist in der Regel ein allmählicher Abbau des Abnutzungsvorrats und somit beispielsweise der Zuverlässigkeit bzw. vorhandener Reserven der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit. Diese Zustandsänderung wird meist in Form von Zustandsnoten (z.B. nach RVS 13.03.31 [10]) beschrieben.

Erfahrungsgestützt können bauteilspezifische Alterungskurven abgeleitet werden, welche als Grundlage für Prognosen dienen. Sie bilden meist in einer bauteilspezifischen Metrik (z.B. Zustandsnoten) das Alterungsverhalten ohne Maßnahmen („Do-Nothing“-Szenario) ab und können für verschiedene Bauteile und je nach Umwelt- und Betriebsbedingungen sehr unterschiedlich sein. Der tatsächliche Verlauf lässt sich nur stark vereinfacht und repräsentativ für eine Grundgesamtheit eines Bauteils eines bestimmten Tunnelportfolios abbilden. So kann der Verlauf beispielsweise der Abbildung 4 entsprechen, oder eine andere Kurvenform annehmen (z.B. mit schnellerer Anfangsalterung, anschließend langsamere Alterung vor beschleunigter Alterung bis zum Erreichen eines Grenzzustands). Alterungskurven sollten daher stets auf Grundlage des betreffenden Tunnelportfolios und der tatsächlich erhobenen historischen Zustandsentwicklung abgeleitet werden.

Eine höhere Ausführungsqualität neuer Bauteile beeinflusst wesentlich den Verlauf ihrer Alterungskurven gegenüber jenen von älteren, bereits bestehenden Bauteilen, die ggf. in geringerer Qualität errichtet wurden.

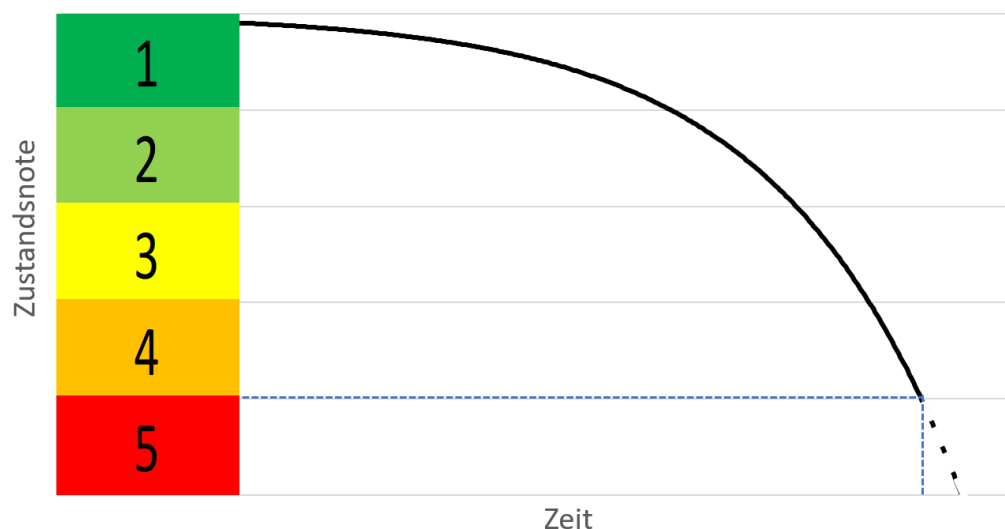


Abbildung 4: Beispiel einer Alterungskurve

Die zu erwartende technische Nutzungsdauer oder die tatsächliche Brauchbarkeitsdauer ist erreicht, sobald der Anlagenzustand ein noch akzeptiertes Niveau erreicht (z.B. am Übergang von Note 4 zu Note 5). Bleibt eine Instandsetzung oder eine Erneuerung des betreffenden Bauteils vor Erreichen dieser Eingriffsschwelle aus und ist das Bauteil für den sicheren Betrieb des Tunnels erforderlich, droht eine Sperre des Tunnels. Umgekehrt kann die Brauchbarkeitsdauer durch Ertüchtigungsmaßnahmen über die technische Nutzungsdauer hinaus verlängert werden.

4.3.3 Technische Ausrüstung

Unter der technischen Ausrüstung wird hier die elektromaschinelle Ausstattung verstanden (E&M). Bei Straßentunneln sind dies die nicht-bauliche Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (z.B. Lüftungsanlage, Beleuchtung, Notruf etc.), bei Bahntunneln sind dies beispielsweise die Leit- und Sicherungstechnik, Telematik, Oberleitung und sonstige elektrotechnische und maschinelle Ausrüstungen.

Anlagen der technischen Ausrüstung weisen sehr unterschiedliche Alterungscharakteristika auf, die sich anhand der verschiedenen Degradationsverläufe und der damit verbundenen Auswirkungen typisieren lassen. Grundsätzlich lassen sich für die elektromaschinellen Anlagen in einem Verkehrstunnel die folgenden Charakteristika identifizieren:

- **Alterung mit Auswirkungen auf den Zustand:** Bestimmte Anlagen zeichnen sich durch eine lineare Degradation aus, die sich direkt auf den Zustand und damit auch auf die Beeinträchtigung der vorgegebenen Anlagenfunktion auswirkt (z.B. Verschmutzung der Beleuchtungsanlage). Der Zustand der Anlage verschlechtert sich kontinuierlich, bis eine zustandsverbessernde Maßnahme umgesetzt wird.
- **Alterung mit Auswirkungen auf die Brauchbarkeitsdauer:** Insbesondere bei Anlagen mit einem hohen Anteil mechanischer Komponenten (z.B. Strahlventilatoren) spielt der sogenannte „Abnutzungsvorrat“ eine zentrale Rolle in der Erhaltungsplanung. Dieser bezeichnet den verbleibenden Vorrat an möglichen Funktionserfüllungen unter vorgegebenen Bedingungen. Ohne angemessene Erhaltungstätigkeiten ist eine Anlage so abgenutzt, dass sie die ihr zugeschriebene Funktion nicht mehr länger erfüllen kann. Die Brauchbarkeitsdauer dieser Anlage hängt somit stark von den periodischen Instandhaltungsmaßnahmen ab, wie zum Beispiel Reinigung oder Schmierung.
- **Alterung mit Auswirkungen auf Ausfallrate und Verfügbarkeit:** Funktionsausfälle und damit verbundene Nichtverfügbarkeiten von Anlagen sind unvorhersehbare Ereignisse, die typischerweise eng mit der Alterung einhergehen und deren Häufigkeit über die Nutzungsdauer einer Anlage variiert (vgl. Badewannenkurve).

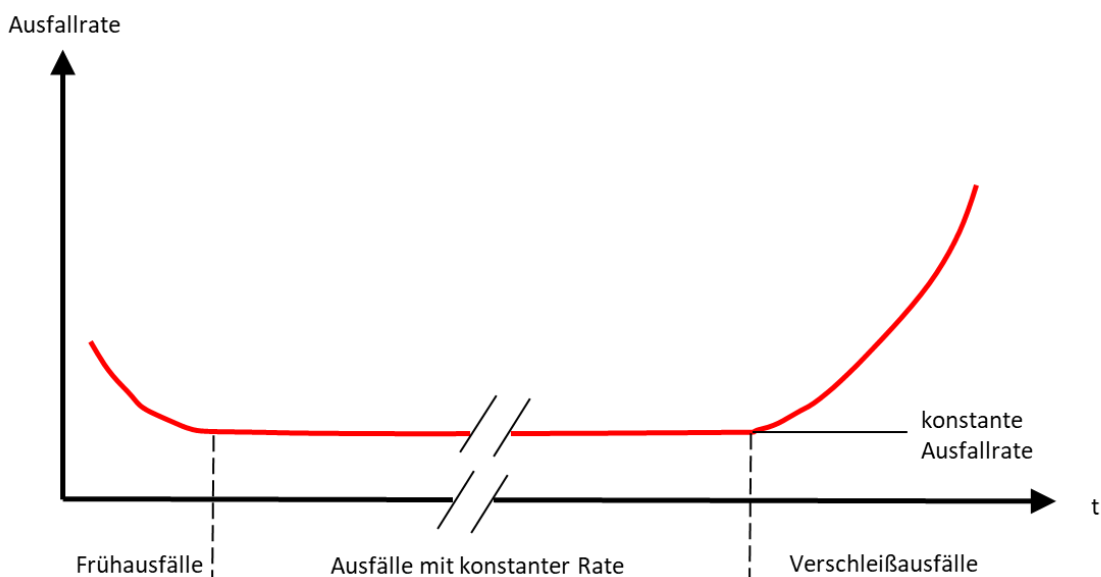


Abbildung 5: Veränderung der Ausfallrate im Verlauf der Zeit (Beispiel, in Anlehnung an [11])

Die Nutzungsdauern der technischen Ausrüstungen unterscheiden sich stark voneinander. Während gewisse Komponenten lediglich eine Nutzungsdauer von nur 10 Jahren aufweisen (z.B. Steuerungen, Videoanlagen), kann diese für andere Komponenten deutlich über 30 Jahre erreichen (z.B. Energieversorgung). Richtwerte für Ausrüstungen von Straßentunneln finden sich beispielsweise in RVS 13.03.41 [11] oder auch in [17]. Für gewisse Komponenten gilt, dass durch Wartung das Erreichen der Nutzungsdauer gewährleistet wird, die Brauchbarkeitsdauer ggf. verlängert und die Ausfallhäufigkeit reduziert werden kann. Dies gilt besonders für Aggregate mit einem hohen Mechanikanteil (z.B. Ventilatoren, Pumpen). Die Restnutzungsdauer bestimmt den Instandhaltungsaufwand solcher Anlagen maßgeblich. Anlagen, welche ihre Brauchbarkeitsdauer erreicht oder überschritten haben, produzieren häufiger Störungen und benötigen erhöhte Instandhaltungszyklen. Sowohl in der Instandhaltung wie auch in der Instandsetzung bedeutet dies für den Betreiber mehr Aufwand. Oft wird aber auch bei neuen Anlagen eine erhöhte Ausfall- oder Störungsrate beobachtet. In der Theorie der Zuverlässigkeitsanalysen beschreibt die Ausfallrate vieler Komponenten die sogenannte Badewannenkurve (vgl. Abbildung 5). Nach anfänglich häufigeren Frühausfällen und einer anschließenden Phase mit konstanter und tiefer Ausfallrate folgt eine Erhöhung der Ausfallrate gegen Ende der Brauchbarkeitsdauer. Die Ausfallsrate einer Anlage wird am Ende des Lebenszyklus irgendwann derart hoch, dass nur noch eine Erneuerung in Frage kommt. Die Restnutzungsdauer bzw. der Zustand haben folglich einen Einfluss auf die Instandhaltung. Anhand von Restnutzungsdauern oder Anlagenzuständen lassen sich aber keine übergeordneten oder pauschalen Instandhaltungsstrategien ableiten – diese sind immer vom jeweiligen Betreiber im Rahmen einer objektspezifischen Instandhaltungsplanung zu definieren. Eine allgemeingültige Regel lässt sich aufgrund der Heterogenität der diversen technischen Ausrüstungen nicht anwenden.

Die Umgebungsbedingungen, welchen die technische Ausrüstung ausgesetzt sind, variieren je nach Aufstellungsort. Komponenten, die sich in der Mitte eines langen Tunnels befinden, erfahren viel konstantere Umgebungsbedingungen als Komponenten in Portalnähe. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Spritzwasser, Staub, Salz und mechanische Belastungen (z.B. Druckstöße, Vibrationen) sind Faktoren, welche je nach Intensität die Brauchbarkeitsdauer von Ausrüstungen stark beeinträchtigen können. Betriebliche Faktoren beeinflussen die Brauchbarkeitsdauer ebenfalls. Beispielsweise führen viele Ein- und Ausschaltzyklen einer Komponente in der Regel zu einer Verminderung der Brauchbarkeitsdauer gegenüber einer identischen Komponente, welche weniger belastet wird. Für gewisse Komponenten ist jedoch gerade der Stillstand kritisch. So weisen Ventilatoren in vielen Tunneln weniger Betriebsstunden pro Jahr auf als vom Hersteller als optimal angegeben wird. Die Umgebungsbedingungen und die betrieblichen Faktoren haben einen Einfluss auf die Instandhaltung, die Zusammenhänge sind jedoch komplex und es lässt sich daraus nicht immer eine übergeordnete Strategie für alle Gewerke der technischen Ausrüstung ableiten.

4.4. LCM-Strategien

4.4.1 Zielsysteme eines optimierten LCM

Ein wesentliches Ziel des Lebenszyklusmanagements bzw. Life Cycle Managements (LCM) liegt in der Ermittlung eines optimalen Erhaltungsintervalls für die Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen im Bereich der bautechnischen Komponenten und der technischen Ausrüstung. Im Spannungsfeld der Entwicklung des Zustands, der Kosten, der Verfügbarkeit von Finanzmitteln und des Erhaltungsrisikos, ist das Zielsystem für die Optimierung der Erhaltungsintervalle der Regellebenszyklen zu definieren.

Grundsätzlich können verschiedene Optimierungsansätze untersucht werden, die auch in unterschiedlichen Managementsystemen und für unterschiedliche Betrachtungsweisen sinnvoll und zweckmäßig erscheinen. Mögliche Zielsystemformulierungen und deren Anwendungsbereiche können sein:

- **Minimierung der Lebenszykluskosten:** Diese Zielsystemformulierung kommt in der Regel dann zur Anwendung, wenn strikte Grenzwerte vorgegeben sind und die hierfür notwendigen Budgetmittel zur Einhaltung der strikten Grenzwerte auf jeden Fall zur Verfügung gestellt werden müssen (z.B. für die Erhaltungsplanung auf Konzessionsstrecken).
- **Maximierung des Levels of Service:** Diese Zielsystemformulierung versucht jenes Erhaltungsintervall zu definieren, das den bestmöglichen Level of Service unter budgetären Restriktionen findet, wobei der Level of Service in der Regel über die Nutzungsanforderungen bestimmt wird.
- **Minimierung der Ausfallrate / Ausfallwahrscheinlichkeit (Maximierung der Zuverlässigkeit):** Diese Zielsystemformulierung geht von der Annahme aus, dass jenes Erhaltungsintervall gefunden werden muss, bei welchem die Kennzahlen für die Bestimmung des Ausfalls zum Minimum werden, wobei in der Regel budgetäre Vorgaben einzuhalten sind. Dieses Zielsystem ist zu unterscheiden von jenem des minimierten Verfügbarkeitsrisikos, welches neben der Ausfallrate auch die Konsequenzen der jeweiligen Ausfälle mitbewertet.
- **Maximierung der Wirtschaftlichkeit:** Diese Zielsystemformulierung versucht, unter budgetären Restriktionen das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis für eine Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen auf einem Objekt und folglich über das gesamte Netz zu finden. Dabei muss ggf. auch auf konstante Intervalle bzw. auf Regellebenszyklen verzichtet werden, da die Abfolge der Maßnahmen mit unterschiedlichen Intervallen die Vielzahl von zu bewertenden Erhaltungsstrategien bestimmt und häufig erst eine Optimierung ermöglicht.
- **Minimierung der Verkehrsbeeinträchtigung (bzw. Maximierung der Streckenverfügbarkeit) und Minimierung der externen Kosten:** Bei dieser Variante der Minimierung werden in erster Linie die Nutzerindikatoren berücksichtigt, sodass die Intervalle ausschließlich von der Wirkung auf den Nutzer abhängig gemacht werden. In den meisten Fällen bedeutet dies eine optimale Lösung im Bereich von langen Erhaltungsintervallen, bei denen der Zustand jener Anlagenteile, die keine direkten Auswirkungen auf die Nutzung aufweisen, häufig vernachlässigt werden. Auch die Investitionen zeigen Lösungen, die oft sehr schnell zu einer Verbesserung führen und tiefgreifende Maßnahmen zeitmäßig nach hinten schieben.
- **Maximale Ausnutzung der Abnutzungsvorräte** im zulässigen Rahmen definierter Grenzzustände: Die Abnutzungsvorräte werden so weit ausgereizt, dass zum letztmöglichen Zeitpunkt eine Erhaltungsmaßnahme vorgenommen wird. Dies bedeutet auch, dass die Erhaltungsintervalle sehr lang werden, sofern nicht durch budgetäre Restriktionen frühere und somit günstigere Maßnahmen (Instandsetzung vs. Erneuerung) erzwungen werden. Auch bei dieser Zielsystemformulierung kann nur mehr bedingt auf Standardintervalle und Regellebenszyklen zurückgegriffen werden.
- **Minimierung der Erhaltungsrisiken (Verfügbarkeitsrisiko):** Durch eine Verknüpfung der Ausfallswahrscheinlichkeit mit der Auswirkung eines Ausfalls ergibt sich hier eine Ansprache von mehreren Zielgrößen im Rahmen der Optimierung. Wird das Erhaltungsbudget als Restriktion verwendet, muss auch in diesem Zusammenhang auf Standardintervalle und Regellebenszyklen verzichtet werden.

Die große Anzahl von möglichen Zielsystemdefinitionen (ein Anspruch auf Vollständigkeit wird an dieser Stelle nicht erhoben) zeigt bereits, dass die Auswahl für die gegenständliche Fragestellung keine einfache

Aufgabe darstellt. Einige der Zieldefinitionen überschneiden sich thematisch, andere stehen in einem Zielkonflikt zueinander.

Die jeweils heranzuziehende Zielsystemdefinition ist somit zum einen auf die strategischen Zielvorgaben des jeweiligen Infrastrukturunternehmens abzustellen. Zum anderen kann diese auch von Fall zu Fall innerhalb eines Anlageportfolios sehr unterschiedlich ausfallen (z.B. Zieldefinition einer Hauptverbindungsstrecke oder einer Nebenstrecke).

4.4.2 Gewerkeübergreifende Optimierung

Heutige Verkehrstunnel sind komplexe Systeme, welche erst in einer engen Abstimmung unterschiedlicher Anlagenkomponenten einen sicheren und verfügbaren Verkehrsweg gewährleisten. Die teils sehr heterogenen Anlagenkomponenten unterliegen jedoch sehr unterschiedlichen Alterungsprozessen und weisen daher stark unterschiedliche Lebenszyklen auf (vgl. Kap. 4.3). Die Folge ist, dass auch die Instandhaltungszyklen stark divergieren und derart zu bündeln sind, dass die Verfügbarkeit des Tunnels nicht zu häufig durch die Erhaltungsmaßnahmen eingeschränkt wird.

Das Erhaltungsmanagement im Allgemeinen und das LCM im Speziellen stehen vor der Herausforderung, Strategien zu entwickeln, die sowohl dem notwendigen Funktionserhalt der Einzelkomponenten über deren jeweiligen Lebenszyklus als auch dem Anspruch einer optimierten Bewirtschaftung des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen gerecht werden. Eine Synchronisierung von Maßnahmen erfolgt dabei im Spannungsfeld einander konkurrierender Zielsetzungen, wie maximierte Anlagenverfügbarkeit, minimale Lebenszykluskosten oder die bestmögliche Ausschöpfung von Abnutzungsvorräten. Bei der Erneuerung oder Instandsetzung einzelner Komponenten sind oft Manipulationen an anderen Komponenten erforderlich, obwohl an diesen betroffenen Teilen eigentlich keine Maßnahmen erforderlich wären. Zahlreiche Komponenten stehen also im Instandsetzungsfall in Wechselwirkung, da sie beispielsweise funktional miteinander verschränkt sind oder weil der physische Zugang zu der zu erneuernden Komponente durch eine andere Komponente eingeschränkt ist.

Die paarweise Wechselwirkung zwischen zwei Komponenten kann beispielsweise anhand einer quadratischen Matrix sichtbar gemacht werden. Wechselwirkungsmatrizen erlauben es, für die Untersuchung von Lebenszyklusstrategien realistische Maßnahmenkombinationen zu wählen. Über die wechselseitige Verknüpfung der Gewerke kann vermieden werden, dass in den untersuchten Instandhaltungsszenarien Maßnahmen an beeinflussten Gewerken übersehen oder unterschätzt werden.

Gemeinsam mit der Untersuchung möglicher Kombinationen und Szenarien kann in weiterer Folge auch versucht werden, jene Gewerke zu identifizieren, bei welchen eine Anpassung der Technologie hohe Wirksamkeit hätte, z.B. durch signifikante Verlängerung oder Verkürzung der bisher angesetzten Nutzungsdauern oder durch zukünftige technische Entkoppelung von anderen Komponenten, mit denen sie heute noch in starker Wechselwirkung stehen.

Die Arten der Wechselwirkung lässt sich an folgenden Beispielen illustrieren:

- Die Erneuerung der Leuchtkörper der Einfahrtsbeleuchtung bedingt in der Regel auch eine Erneuerung der Verkabelung über die entsprechende Länge, einen punktuellen Eingriff in die Niederspannungsverteilung und Steuerungskomponenten.
- Eine Erneuerung der Strahlventilatoren bedingt auf Systemebene einen Eingriff auf die Steuerung, einen punktuellen Eingriff in die Regelung, Steuerung und Messtechnik, die Niederspannungsverteilung, bei Querschlagslüftern ggf. in die Schleusenwände.
- Die Erneuerung der Löschwasserleitung bedingt eine Erneuerung des erhöhten Seitenstreifens, den selbstleuchtenden Leiteinrichtungen über die entsprechende Länge, einen geringeren Eingriff in den Kabelkanal, in die Hydranten der Feuerlöschnischen, die Absperrschieber, sowie einen punktuellen Eingriff in den Löschwasserbehälter und die Tunnelsteuerung.
- Die Erneuerung der Fahrbahn bedingt eine Erneuerung der Bordsteine, der erhöhten Seitenstreifen, der Schlitzrinne oder Einlaufschächte, der Frostkofferentwässerung und von Einlaufschächten.
- Die Erneuerung des Oberbaus kann auch Maßnahmen an der eisenbahntechnischen Ausstattung (Balisen, Signale etc.) bedingen.

Ein Instandhaltungsszenario, welches die Erneuerung einer Komponente beinhaltet, muss somit entsprechende Aufwendungen an den betroffenen Komponenten mitberücksichtigen.

4.4.3 Anlagenverfügbarkeit vs. Kosten

Die Auswahl von optimalen Zeitpunkten für das Durchführen von Erhaltungsmaßnahmen im Bereich von Tunnelobjekten ist eine komplexe Aufgabe, die von einer großen Anzahl von Einflussgrößen abhängig ist, die in folgende Kategorien unterteilt werden können:

- bautechnischer bzw. technischer Zustand der Gewerke und der Anlagenteile
- Auswirkungen einer Erhaltungsmaßnahme auf den Betrieb und den Verkehrsablauf im Tunnelobjekt sowie ggf. Auswirkungen auf Umleitungsstrecken bei Tunnelsperren oder intensiven verkehrlichen Beeinträchtigungen (Stichwort Umgehungsverkehr)
- Erhaltungsrisiko als Funktion der Wahrscheinlichkeit des Ausfalls einer Anlage und der damit verbundenen Konsequenzen
- Steigerung der Verfügbarkeit durch bauliche Maßnahmen
- Personal und Budget

Diese Gruppierung zeigt bereits deutlich, dass die Anforderungen oft in Konkurrenz stehen und die Auswahl eines optimalen Erhaltungszeitpunkts nicht für jeden Teilbereich die optimale Lösung darstellen kann. Aus der Sicht der Verkehrsbeeinträchtigung ist jenes Szenario die optimale Lösung, welches keinerlei Beeinträchtigung mit sich zieht, was jedoch in fast allen Fällen eine unmögliche Lösung darstellt. Die Abschätzung und letztendlich die Auswahl eines optimalen Regellebenszyklus stellt somit immer einen Kompromiss dar, in welchem zwischen Ausfallswahrscheinlichkeit und den Konsequenzen abgewogen werden muss. In diesem Sinn ist auch das Zielsystem für die Optimierung zu wählen, wobei die Einflussfaktoren für die Definition des Verfügbarkeitsrisikos entscheidend sind.

Die Beurteilung der Anlagenverfügbarkeit als Zielgröße sollte sich daher nicht auf die Verfügbarkeitseinschränkung zufolge planbarer Instandhaltungsmaßnahmen beschränken, sondern das Ausfallsrisiko miteinbeziehen. Dieses kann im Sinne eines risikobasierten Ansatzes als Produkt aus einer zustandsabhängigen Ausfallswahrscheinlichkeit mit der Konsequenz auf die Verfügbarkeit definiert werden.

Darüber hinaus spielen auch die jeweiligen strategischen Vorgaben des Infrastrukturunternehmens eine wesentliche Rolle. Die Vermeidung der Beeinträchtigung hängt nicht nur von der Verkehrsbelastung selbst, sondern auch von der Örtlichkeit des Tunnels ab (Korridor) und dem Zeitpunkt, wann die Erhaltungsmaßnahme vorgenommen wird (Stichwort tägliche und saisonale Verkehrsnachfrage).

5. KOSTEN

5.1. Grundlagen der Kostenermittlung

5.1.1 Systemgrenzen und Strukturierung

Sachliche Systemgrenzen:

Im Rahmen dieser Empfehlung wird nur auf die unmittelbar für das Tunnelobjekt anfallenden bzw. diesem zuordenbaren internen Kosten für Aufwendungen des Baulastträgers bzw. Infrastrukturbetreibers Bezug genommen – unabhängig davon, ob diese in Eigenleistung durch eigene Ressourcen oder über beauftragte Dienstleister oder Lieferanten erbracht werden.

Für das Einmelden, das Beschaffen, die Angebotskalkulation und die Abrechnung werden Kosten üblicherweise strukturiert nach den Regeln der Baukalkulation (z.B. gem. ÖNORM B 2061 [6]) ermittelt. Neben Einzelkosten von Teilleistungen stellen die nicht unmittelbar den Teilleistungen zuordenbaren Baustellengemeinkosten mitunter höchst signifikante Kostenanteile dar, die entsprechend Teil der internen Aufwendungen und somit der Lebenszykluskosten sind. Dasselbe gilt für Kosten des internen wie externen Projektmanagements, der Planung, der Überwachung der Ausführung oder der Erkundung.

Je nach Fragestellung kann sich eine Lebenszykluskostenermittlung auf Teile dieser internen Kosten beschränken oder auch die Zielsetzung verfolgen, die internen Kosten möglichst ganzheitlich zu erfassen.

Externe oder volkswirtschaftliche Effekte werden hier nicht als Teil der engeren Lebenszykluskosten behandelt, wiewohl sie jedoch bei der Entwicklung von LCM-Strategien gerade bei Verkehrsinfrastruktur von hoher Bedeutung sein können und von Fall zu Fall gesondert zu betrachten sind (vgl. Kap. 0).

Die gegenständliche Empfehlung berücksichtigt immer die vollständigen Kosten wie Sach- und Personalaufwand und Betriebsmittel, unabhängig davon, ob sie in Eigenleistung erbracht oder extern beschafft werden.

Zeitliche Systemgrenzen:

Je nach Anwendungsfall können bei Lebenszyklusbetrachtungen entweder der gesamte Lebenszyklus oder nur Teile davon von Interesse sein. Gerade bei bereits bestehenden Tunnelobjekten rückt ggf. nur der zukünftige Mittelbedarf über den zukünftigen Restlebenszyklus in den Vordergrund, während bereits getätigte Aufwendungen, wie z.B. die ursprünglichen Errichtungskosten, weniger relevant sein können. Die zeitlichen Grenzen der Lebenszyklusbetrachtungen sind somit entsprechend der Fragestellung anzupassen.

Strukturierung:

Für jegliche Kostenermittlung sind das Tunnelobjekt und deren Kostenarten je nach Kostenermittlungsmethode (z.B. Kennwertmethode, Elementmethode, vgl. [1]) zu strukturieren. Die Granularität richtet sich nach der angestrebten Kostenschärfe und jeweiligen Fragestellung. Sie kann aber auch durch die verfügbaren Kostenansätze (Erfahrungswerte, interne Kostenkataloge aus Nachkalkulationen etc.) begrenzt sein. Im Gegensatz zur Kostenstrukturierung bei Neubauvorhaben ist bei der Strukturierung Bedacht zu nehmen, dass neben der angestrebten Genauigkeit der Kostenermittlung auch die Zeitlichkeit der betreffenden Aufwendungen im Lebenszyklus bzw. im Betrachtungszeitraum darstellbar sein muss (zu Unschärfen und Unsicherheiten siehe Kap. 5.2.4.).

5.1.2 Aufbau des Lebenszyklus

Unverzichtbare Grundlage einer Lebenszyklusbetrachtung ist eine Aufstellung der jeweiligen kostenauslösenden Maßnahmen und Mitteleinsätze in jedem Jahr während des Betrachtungszeitraums für jedes betrachtete Anlagenelement. Da die technischen Nutzungsdauern der Elemente sehr unterschiedlich sind (vgl. Kap. 4.3), muss spätestens hier eine zeitliche Bündelung von Maßnahmen derart erfolgen, dass sie den Zielsetzungen des gewerkeübergreifenden Lebenszyklusmanagements entspricht (vgl. Kap. 0).

5.1.3 Datengrundlagen

Um die Kostenermittlung durchführen zu können, sind vor allem Kostenwerte notwendig. Hierbei sind Kosten für die entsprechenden Zeiträume zu ermitteln und gewerkespezifisch bzw. bauteilspezifisch zusammenzustellen.

Das kann naturgemäß nur im Zusammenhang mit den im jeweiligen Unternehmen befindlichen Systemen der Kostenkontrolle und Buchhaltung geschehen. Dabei werden überwiegend Kostenrahmen und Untergliederungen verwendet, die für Managementaufgaben definiert wurden. Technische Strukturierungen sind weitgehend im Detail nicht vorhanden.

Hier sollte in enger Abstimmung mit den Kostenverantwortlichen eine Überprüfung der bestehenden Systeme erfolgen und auch die technische Detaillierung berücksichtigt werden. Eine anlagenspezifische Zuordnung zu den jeweiligen Bereichen sollte normalerweise möglich sein, eine detailliertere Zuordnung auf einzelne Bauteile oder sogar Elemente kann unter Umständen aber sehr schwierig werden. Insbesondere beim Tunnel als Linienbauwerk können die Tätigkeiten meist nicht auf einzelne Laufmeter oder Blöcke heruntergebrochen werden und umfassen auch immer mehrere unterschiedliche Bauteile und gegebenenfalls auch mehrere Gewerke gleichzeitig. Hier muss dann ein vernünftiger Verteilungsschlüssel für die Zuordnung gefunden werden.

Aus mehreren Projekten hat sich aber auch gezeigt, dass in einigen Bereichen der Ansatz auf Blöcke erfolgversprechend ist und weiterverfolgt werden sollte.

Dies hängt sehr stark von der jeweiligen Organisationsstruktur des Unternehmens ab. Privatwirtschaftlich organisierte Unternehmen können teilweise flexibler agieren als staatliche Organisationen, denen die Systeme aufgrund der Haushaltsstrukturen strikt vorgegeben sind.

In vielen Unternehmen besteht auch ein System zur Auftragsbearbeitung, welches dann als Eingangssystem für die Buchhaltung und Zuordnung zu einzelnen Kostenblöcken verwendet wird.

Hier kann man versuchen, durch zusätzliche Buchungsschlüssel eine bessere und detailliertere Zuordnung zu erreichen.

Dies kann zu einem höheren Verwaltungsaufwand führen, macht aber die Auswertung und Detailberechnung erst auf der gewünschten Ebene möglich. Wenn die Optimierung einzelner Bauteile oder Elemente gewünscht wird, müssen auch die dafür notwendigen Kostenanteile ermittelbar sein.

5.2. Kostenbestandteile

Die nachfolgenden Kostenbegriffe sowie die Strukturierung der Kosten werden in Anlehnung an die RVS 13.05.11 [8], die ÖNORMEN B 1801-1 [2] und B 1801-2 [3] sowie die ÖGG-Richtlinie [1] verwendet (siehe auch Kap. 2). In letzterer sind unterschiedliche Methoden zur Kostenermittlung für die einzelnen Projektphasen von Infrastrukturbauten bis zu deren Errichtung beschrieben.

In Anlehnung an die üblichen Vorgaben für die Erstellung von Kostenermittlungen werden folgende allgemeine Empfehlungen ausgesprochen:

- Berücksichtigung sämtlicher Kosten als Netto-Kosten
- keine Berücksichtigung von Finanzierungskosten
- keine Berücksichtigung allfälliger Erträge

Hinweis gemäß ÖNORM B 1801-4 [4]: Die Berücksichtigung von Abschreibung und Kapitalkosten im Sinne des Blickwinkels der Erfolgsrechnung ist möglich, jedoch nicht Gegenstand dieser Empfehlung.

5.2.1 Basiskosten (B)

Basiskosten sind jener Teil der prognostizierten Projektkosten, der den bekannten Projekteinhalt abbildet. Diese sind auf einen Stichtag zu beziehen und beinhalten die im Zuge der Projektbearbeitung bereits angefallenen Kosten (IST-Kosten) sowie die zukünftig erwarteten Prognosekosten. Die Basiskosten stellen somit die Plankosten (Plankosten = IST-Kosten + Prognosekosten) zu einem bestimmten Stichtag dar und beinhalten die Einschätzung des allgemeinen Preisniveaus zu einem bestimmten Zeitpunkt.

In der Regel enthalten Basiskosten einen Zuschlag für Unberücksichtigtes, d.h. Leistungen, welche entsprechend dem Projektkenntnisstand erwartet, zum Zeitpunkt der Kostenermittlung aber noch nicht im Detail dargestellt werden können.

5.2.1.1. Kostenarten vor Inbetriebnahme

In Anlehnung an die in der ÖN B1801-1 [2] primär für Hochbauten definierten Kostengliederung wird folgende Gliederung für Tunnelinfrastrukturbauwerke empfohlen:

Tabelle 1: empfohlene zu berücksichtigende Kostenbereiche vor Inbetriebnahme
(Basiskosten B)

Kostenbereiche (vor Inbetriebnahme)	Kostengruppen für Basiskosten B				
	Bauwerkskosten	Baukosten	Errichtungskosten	Gesamtkosten	Anschaffungskosten
Finanzierung					
Grund					
Aufschließung					
Bauwerk-Bautechnik					
Bauwerk-Technische Ausrüstung					
Deponie					
Außenanlagen					
Projektmanagement u. Dienstleisterkosten					
Umweltbegleitmaßnahmen					
Projektnebenleistungen					
Reserven (Anmerkung: siehe 5.2.4)					

Legende: rote Umrahmung: Basiskosten gem. Empfehlung ÖGG; graue Felder: Berücksichtigung gem. ÖNORM B1801-1

Gemäß ÖNORM B 1801-4 [4] wird die Ermittlung von Lebenszykluskosten im Grundmodell für die Errichtungskosten durchgeführt, wobei eine Erweiterung um Grundeinlösekosten und/oder Finanzierungskosten möglich ist.

Da bei Verkehrsinfrastruktur die Grundeinlösekosten einen wesentlichen Anteil ausmachen können, wird die Verwendung der „Gesamtkosten“ im Sinne der ÖNORM B1801-1 für die Ermittlung der Lebenszykluskosten empfohlen.

Nicht exakt ermittelbare und/oder unbekannte Kosten, welche je nach Norm oder Regelwerk z.B. als „Reserven“ oder „Risikokosten“ bezeichnet sind, werden im Sinne der *ÖGG-Richtlinie für die Kostenermittlung für Projekte der Verkehrsinfrastruktur* [1] und im Sinne der ggst. ÖGG-Empfehlung einheitlich und umfassend unter dem Kostenanteil „Risiko (R)“ behandelt und abgebildet (siehe Kap. 5.2.4).

5.2.1.2. Kostenarten nach Inbetriebnahme

Die mit der Planung festgelegte Ausgestaltung von Bauwerken hat nicht nur maßgeblichen Einfluss auf die Errichtungs- bzw. Gesamtkosten, sondern auch auf die Kosten nach Inbetriebnahme. Die jeweiligen Auswirkungen der Ausgestaltung auf die Kosten für Errichtung, Betrieb und Abbruch sollten daher bei Variantenstudien sowie bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten von Bauwerken jedenfalls berücksichtigt werden.

Die Basiskostenkomponenten nach Inbetriebnahme stellen die Objektfolgekosten dar, welche wie folgt gegliedert werden können:

- Kosten während der Betriebsphase („Betriebskosten“, „Nutzungskosten“)
 - Instandhaltungskosten
 - Wartung
 - Inspektion
 - Instandsetzung (Reparatur)
 - Ertüchtigung
 - Energiekosten
 - Sonstige Kosten
- Abbruchkosten
- Adaptierungskosten für allfällige Nachnutzung

In den nachfolgenden Kapiteln werden die jeweiligen Kostenkomponenten anhand von Beispielen erläutert.

Tabelle 2: empfohlene zu berücksichtigende Kostenbereiche nach Inbetriebnahme (Basiskosten B)

Kostenbereiche (nach Inbetriebnahme)	Kostengruppen für Basiskosten B			
	Instandhaltungskosten	Sonstige Kosten	Betriebskosten, Nutzungskosten	Objektfolgekosten
Wartung				
Inspektion				
Instandsetzung (Reparatur)				
Ertüchtigung				
Energiekosten				
Überwachung, Steuerung				
Abbruchkosten				
Adaptierungskosten für Nachnutzung				

Legende: rote Umrahmung: Basiskosten gem. Empfehlung ÖGG; graue Felder: Berücksichtigung gem. ÖNORM B1801-1

5.2.1.3. Kosten während der Betriebsphase

Die Kosten während der Betriebsphase beinhalten alle zwischen Errichtung bzw. Inbetriebnahme und Abbruch eines Tunnelobjekts anfallenden Kosten. Diese werden gem. ÖNORM B1801-2 [3] auch als „Nutzungskosten“ bzw. gem. RVS 13.05.11 [8] als „Betriebskosten“ bezeichnet.

Instandhaltung

Instandhaltung im Sinne der RVS 13.05.11 [8] ist die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objekts, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung seines funktionsfähigen Zustands dient, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann. Dazu zählen beispielsweise die folgenden Aktivitäten und Maßnahmen:

- Reinigungsmaßnahmen
- Spülen von Drainagen
- Entfernung von Bewuchs
- Inspektionen, Prüfungen, Befunde
- Lüfterrevision
- Betoninstandsetzungen

Ertüchtigungen

Ertüchtigungen können nicht zuletzt aufgrund des technologischen und regulatorischen Wandels oder aufgrund geänderter Betriebsanforderungen bei Tunnelobjekten beispielsweise sein:

- Verstärkung der Innenschale
- Verbesserung der Lüftungsanlage
- Anpassung des Lichtraums für neue Fahrzeugabmessungen

Energiekosten

Je nach Verkehrsträger können Kosten für Energie anfallen, die direkt einem Tunnel zuordenbar sind und alle für einen sicheren Betrieb des Bauwerks anfallenden Aufwendungen für elektrische oder thermische Energie umfassen (z.B. Heizung, Kühlung, Be- und Entlüftung, Beleuchtung, Pumpen etc.):

- Kosten für Energiebezug
- Kosten durch Energieerzeugung

Ob hierunter auch Kosten für Traktionsstrom, Signal-, Leit- und Sicherungstechnik etc. fallen, ist projektspezifisch mit dem Betreiber festzulegen. Sinngemäß gilt dies auch für die Berücksichtigung allfälliger Erträge aus Geothermie, Photovoltaik, Klein-Wasserkraftwerken etc.

Sonstige Kosten

Sonstige Kosten können durch die tunnelspezifische Betriebsführung anfallen, wie z.B. die dem Tunnelobjekt zuschlagbaren Kosten für Überwachung und Steuerung (Überwachungszentrale, Warte etc.).

Auch Aufwendungen für Übungen oder spezielle Ausrüstungen zur Einsatzbewältigung (z.B. Rettungszüge, besondere Feuerwehrausrüstung) sind Kosten, die einem Tunnelobjekt zumindest anteilig zuordenbar sind.

5.2.1.4. Abbruchkosten

Kosten für Rückbau oder Abbruch eines Bauwerks fallen am Ende des Lebenszyklus eines Bauwerks an und sind daher in der Lebenszykluskostenanalyse entsprechend der jeweils zu beantwortenden Fragestellung mitzubetrachten.

5.2.1.5. Adaptierungskosten für Nachnutzung

Die Berücksichtigung von Adaptierungskosten für die Nachnutzung eines Verkehrstunnels ist im Einzelfall projektspezifisch zu beurteilen.

5.2.2 Vorausvalorisierung (V)

Die Vorausvalorisierung der Kosten ist gemäß Kostenermittlungsrichtlinien (z.B. [1]) und Vorgaben der Auftraggeber- oder Bestellerorganisation durchzuführen. Dies gilt naturgemäß auch für alle noch weiter in der Zukunft liegenden Kosten nach der Inbetriebnahme.

Von der Vorausvalorisierung für zukünftige Kosten zu unterscheiden sind die auf einer historischen Preisbasis vorgenommene Wertanpassung und ggf. Gleitung. Im Rahmen einer in der Regel zukunftsgerichteten Lebenszyklusbetrachtung beschränkt sich die Rolle einer historischen Wertanpassungen und Gleitung auf die Vereinheitlichung der Preisbasis der herangezogenen Kostenansätze. Diese stammen meist aus diversen Kostenkatalogen unterschiedlichen Alters und bedürfen somit einer entsprechenden Harmonisierung der Preisbasis mittels Wertanpassung.

5.2.3 Diskontierung (D)

Die Diskontierung ermöglicht die Vergleichbarkeit zukünftiger Zahlungen, indem diese auf ihren Barwert mit dem Diskontierungszinssatz (r) abgezinst werden. Nach ÖNORM B 1801-4 [4] wird der Barwert (BW) einer zukünftigen Zahlung (Z) im Jahr n nach der Formel $BW = Z / (1 + r)^n$ berechnet. Die Norm fordert eine transparente und konsistente Anwendung marktüblicher Zinssätze, um langfristige Kosten realistisch zu bewerten. Während die Vorausvalorisierung die zukünftigen Preisentwicklungen abbildet, reduziert die nominale Diskontierung diese auf ihren heutigen Wert. Siehe dazu auch 5.3.2. Bei der Anwendung des Diskontierungszinssatzes ist daher darauf zu achten, ob ein realer oder nominaler Zinssatz gemeint ist. Bei der hier vorgeschlagenen gesonderten Berücksichtigung der Vorausvalorisierung ist ein Nominalzinssatz heranzuziehen, da sonst künftige Preisentwicklungen doppelt berücksichtigt würden.

5.2.4 Risiko (R)

Aufgrund der langen Betrachtungs- und Prognosezeiträume unterliegen die Eingangsgrößen von Lebenszyklusbetrachtungen naturgemäß entsprechenden Unsicherheiten. Besonders herausfordernd ist der Umgang mit jenen Unsicherheiten, deren Auswirkungen mit der Zeit zunehmend schwerer abschätzbar werden. Ein zentraler Aspekt ist die zeitliche Unsicherheit, etwa bei tatsächlichen Brauchbarkeitsdauern von Bauteilen oder technischen Anlagen. Abweichungen der Brauchbarkeitsentwicklung von erwarteten Nutzungsdauern können zu unerwarteten Ersatz- oder Reparaturkosten führen. Ebenso sind zukünftige Betriebskosten wie Energiepreise und Wartungskosten schwieriger vorhersehbar und unterliegen zunehmenden Schwankungsbreiten.

Neben zeitlichen Unsicherheiten spielen auch quantitative Unsicherheiten eine Rolle, insbesondere Entwicklungen bei Baukosten, regulatorische Änderungen oder technologische Entwicklungen. Solche Faktoren können sich kumulieren oder gegenseitig kompensieren und signifikante Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten haben.

Die Unsicherheiten schlagen sich also als Risiken nieder, welche zumindest teilweise als Risikokosten monetarisiert werden können.

Um Risiken systematisch zu berücksichtigen, empfiehlt sich eine Kategorisierung in zeitabhängige (z.B. Nutzungsszenarien), technische (z.B. Verschleiß), regulatorische (z.B. Gesetzesänderungen) und ökonomische (z.B. Preissteigerungen) Unsicherheiten. Besonderes Hauptaugenmerk sollte man jenen Risiken widmen, die mit zunehmender Zeit immer schwerer prognostizierbar werden, wie Materialermüdung oder zukünftige Instandhaltungsstrategien.

Sowohl die ÖNORM B 1801-1 [2] als auch die ÖGG-Kostenermittlungsrichtlinie [1] sehen eine Berücksichtigung von Risiken vor, ungeachtet der teilweise unterschiedlichen Begrifflichkeiten. Es liegt somit nahe, relevante Risiken in Lebenszyklusbetrachtungen einzubeziehen.

Bei dem dieser Empfehlung beigestellten Berechnungstool ÖGG-TLC³ können Risiken und Unsicherheiten mit aufgenommen und auf verschiedene Weise berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass ein einzelnes Risiko oder eine Unsicherheit mehrfach auftreten kann, beispielsweise an verschiedenen Stellen im Lebenszyklus oder unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen. Durch die Erfassung von Risiken und eine kontinuierliche Überprüfung der Annahmen können Unsicherheiten und Risiken zwar nicht eliminiert, aber

gezielter mitkalkuliert werden und deren Einfluss beispielsweise im Rahmen von Sensitivitätsanalysen besser erfasst werden.

Die nachstehende Sammlung von Unsicherheiten bietet eine Grundlage, um spezifische Risiken gezielt identifizieren und Sensitivitätsanalysen durchführen zu können. Zu beachten ist, dass die Risikolandschaft und die Unsicherheiten stets spezifisch für das jeweilige Tunnelobjekt und die jeweilige Fragestellung der Lebenszyklusbetrachtung zu ermitteln sind.

Tabelle 3: Unsicherheiten und Auswirkungen - Übersicht

Unsicherheiten	Beispiel	Kategorie						Art der Unsicherheit		Einfluss auf		
		(hydro-)geologisch	betriebl.	technologisch	ökonomisch	regulatorisch	zielabhängig	epistemisch, (identifizierbar)	aleatorisch, (quantifizierbar)	Zeitpunkt Maßnahme	Maßnahmenumfang	Kosten
Zustand: Zeitlichkeit-Umfang der Maßnahme	Bauteil degradiert schneller/langsamer als zu erwarten						x		x	x	x	
	Verschleiß aus Verkehr ist anders als erwartet (da mehr/weniger Verkehr)		x				x		x	x	x	
	Ausmaß des Instandsetzungsbedarfes ist höher als erwartet		x				x		x		x	x
	Ursprungsqualität schwankt (Ausführungsqualität)									x	x	x
Entwicklung Preisbigerungen	Baukostenindex/Marktpreise entwickeln sich anders als erwartet				x		x		x			x
	Streuung tatsächlicher Einkaufspreise				x							x
Finanzmarkt	Kalkulationszinssfuß ändert sich wesentlich				x		x		x			x
	Ersatzteile sind nicht mehr verfügbar, da der Markt die verbaute Technologie nicht mehr anbietet		x		x		x		x	x	x	x
Gebirgsverhältnisse	anhaltende Gebirgsumlagerungen führen zu Lichtraumproblemen (Squeezing, Quellen, Schwellen,...)	x						x	x	x	x	x
	Gebirgsverhältnisse erschweren Instandsetzung der Tunnelschale	x						x	x		x	x
funktionale Anforderungen	Bewässerungsmass führt zu erhöhtem Erhaltungsaufwand bei Drainagen	x	x						x	x	x	x
	Die Anforderungen an die Funktion/Leistungsfähigkeit der Anlage ändern sich (z.B. neue Sicherheitsbestimmungen, neue Geschwindigkeitsanforderung)		x					x		x	x	x
betriebliche Randbedingungen	Anspruch an die Anlagenverfügbarkeit/Streckenverfügbarkeit ändert sich.		x					x		x	x	x
	Die Interventionsmöglichkeiten für IH-Maßnahmen ändern sich aufgrund der Netztopologie: z.B. nur noch kurze Nachsperrungen möglich anstelle längerer Sperrungen		x					x		x	x	x
Verfügbarkeit/Ressource	Netz/Korridorplanung beeinflusst Interventionszeitpunkt		x						x	x	x	x
	Die verfügbaren Budgets für Instandhaltung ändern sich (+/-)					x	x			x	x	x
rechtliche Anforderungen	Personalverfügbarkeit (extern und intern)					x				x	x	x
	Arbeitnehmerschutz Betrieb und/oder Instandhaltung										x	x
technologischer Fortschritt	Normen/Stand der Technik										x	x
	neue, noch nicht bekannte Materialien und/oder Methoden sehen zur Verfügung			x	x			x		x	x	x
Bestandsinformation	Kennntis Bestandsverhältnisse										x	x
	Umfang + Qualität Bestandsdokumentation										x	x
Strategie	Änderung der IH-Strategie							x		x	x	x

5.3. Ergebnisgrößen

Die wirtschaftliche Bewertung von Infrastrukturanlagen, insbesondere solcher mit sehr langen Nutzungs- bzw. Brauchbarkeitsdauern, ist ein komplexer Prozess, der sorgfältige Überlegungen und dynamische Bewertungsmethoden erfordert, die sich nach der jeweiligen Fragestellung richtet. Die Lebenszykluskosten können daher nur entsprechend der jeweiligen Problemstellung (vgl. 1.2) und Systemgrenzen (vgl. 5.1.1) ermittelt werden. Die Ergebnisgröße, ihre Einheit und Aussagekraft können daher von Fall zu Fall unterschiedlich sein.

Es werden daher im Folgenden die Bedeutung dynamischer Bewertungsmethoden und der Einfluss des Diskontierungszinssatzes auf die Bewertung von Infrastrukturanlagen vertieft.

5.3.1 Dynamische Bewertungsmethoden

Infrastrukturanlagen haben oft Nutzungsdauern, die mehrere Jahrzehnte und mehr umfassen. Die Bewertung solcher Anlagen erfordert daher eine langfristige Perspektive, die statische Bewertungsmethoden nicht bieten können. Dynamische Bewertungsmethoden wie die Kapitalwertmethode (Net Present Value, NPV), die Annuitätenmethode oder die interne Zinsfußmethode (Internal Rate of Return, IRR), berücksichtigen die zeitliche Verteilung der Kosten und Erträge über den gesamten Lebenszyklus der Anlage.

Dynamische Bewertungsmethoden weisen v.a. folgende Vorteile auf:

1. **Zeitwert des Geldes:** Dynamische Methoden berücksichtigen den Zeitwert des Geldes, indem sie zukünftige Zahlungsflüsse auf den heutigen Wert abzinsen. Dies ist besonders wichtig bei langen Nutzungsdauern, da der Wert zukünftiger Erträge und Kosten stark von der Zeit abhängt.
2. **Risikobewertung:** Durch die Berücksichtigung von Unsicherheiten und Risiken über die Zeit können dynamische Methoden eine realistischere Einschätzung der Wirtschaftlichkeit einer Investition bieten (vgl. auch 5.2.4).
3. **Kapitalbindung:** Zusätzlich wird auch die Kapitalbindung berücksichtigt. Dies bezieht sich auf das Kapital, das in einer Investition gebunden ist und somit nicht für andere Zwecke zur Verfügung steht. Bei Infrastrukturanlagen mit langen Nutzungsdauern ist die Kapitalbindung besonders relevant, da große Summen über einen langen Zeitraum hinweg investiert werden.

5.3.2 Diskontierungszinssatz

Der Diskontierungszinssatz spielt eine zentrale Rolle bei der dynamischen Bewertung von Infrastrukturanlagen. Er wird verwendet, um zukünftige Zahlungsflüsse auf ihren heutigen Wert (Barwert, BW) abzuzinsen und somit die wirtschaftliche Rentabilität einer Investition zu bestimmen und Investitionsvarianten miteinander vergleichen zu können.

Einflussfaktoren auf den Diskontierungszinssatz:

- **Kapitalbeschaffungskosten:** Der Diskontierungszinssatz spiegelt die Kosten wider, die ein Unternehmen für die Beschaffung von Kapital aufwenden muss. Höhere Kapitalbeschaffungskosten führen zu einem höheren Diskontierungszinssatz. Die bei Infrastrukturträgern unterschiedlichen Kapitalbeschaffungskosten bilden sich somit anteilig im angesetzten Diskontierungszinssatz implizit ab.
- **Inflation:** Der Diskontierungszinssatz muss die erwartete Inflation berücksichtigen, um den realen Wert zukünftiger Zahlungsflüsse zu bestimmen.
- **Risiko:** Je höher das Risiko einer Investition, desto höher sollte der Diskontierungszinssatz sein, um das zusätzliche Risiko zu kompensieren, sofern dies nicht bereits gesondert berücksichtigt ist (vgl. Kap. 5.2.4).

Auswirkungen des Diskontierungszinssatzes:

- **Wert der Investition:** Ein höherer Diskontierungszinssatz führt zu einem niedrigeren Barwert zukünftiger Zahlungsflüsse, was die Attraktivität einer Investition verringern kann.

- Entscheidungsfindung: Der Diskontierungszinssatz beeinflusst die Entscheidung, ob eine Investition getätigt wird oder nicht. Ein zu hoher Zinssatz kann dazu führen, dass potenziell rentable Projekte abgelehnt werden, während ein zu niedriger Zinssatz zu Fehlinvestitionen führen kann.

5.3.3 Annuitäten

Annuitäten sind regelmäßige, gleichbleibende (fiktive) Zahlungen, die über einen bestimmten Zeitraum hinweg geleistet werden. Sie spielen eine wichtige Rolle bei der Bewertung von Infrastrukturanlagen, da sie eine gleichmäßige Verteilung der Kosten (und allfälliger Erträge) über die Nutzungsdauer ermöglichen.

Die Berechnung der Annuitäten erfolgt durch die Umwandlung des Barwerts einer Investition in gleichmäßige jährliche (fiktive) Zahlungen. Diese Umrechnung erfolgt mit dem sogenannten Annuitätenfaktor (vgl. z.B. [16]).

Eine Annuitätenbetrachtung bietet folgende Vorteile:

- Planungssicherheit: Annuitäten bieten eine hohe Planungssicherheit, da die Zahlungen konstant bleiben und somit leicht in die Finanzplanung integriert werden können.
- Finanzierung: Annuitäten können auch als Finanzierungsinstrument genutzt werden, um die Kosten einer Investition über die Zeit zu verteilen und die Liquidität des Unternehmens zu schonen.
- Vergleichbarkeit: Durch die Umwandlung von unregelmäßigen Zahlungsflüssen in gleichmäßige Annuitäten wird die Vergleichbarkeit verschiedener Investitionsprojekte erleichtert. Die verschiedenen Bewertungsmethoden erfordern oft bestimmte Voraussetzungen (gleiche Nutzungsdauern, ähnliche Investitionsgrößen usw.), damit die Ergebnisse verglichen werden können. Bei Annuitäten ist sofort eine direkte Vergleichbarkeit gegeben, beispielsweise auch bei unterschiedlichen Nutzungsdauern.

5.3.4 Fazit

Die wirtschaftliche Bewertung von Infrastrukturanlagen mit langen Nutzungsdauern erfordert dynamische Bewertungsmethoden, um den Zeitwert des Geldes und die damit verbundenen Risiken angemessen zu berücksichtigen. Der Diskontierungszinssatz spielt dabei eine entscheidende Rolle, da er die Abzinsung zukünftiger Zahlungsflüsse bestimmt und somit die wirtschaftliche Rentabilität einer Investition maßgeblich beeinflusst. Annuitäten bieten eine Möglichkeit, die Kosten und Erträge gleichmäßig über die Nutzungsdauer zu verteilen und somit die Planungssicherheit und Vergleichbarkeit zu erhöhen. Eine sorgfältige Auswahl und Anwendung dieser Methoden und Parameter ist daher unerlässlich, um fundierte Investitionsentscheidungen zu treffen. In der Regel sind daher Sensitivitätsanalysen zu empfehlen, um den Einfluss des Diskontierungszinssatzes auf das Gesamtergebnis zu erfassen.

6. **BERECHNUNGSTOOL ÖGG-TLC³**

Mit der vorliegenden ÖGG-Empfehlung wird auch das Berechnungstool ÖGG-TLC³ (ÖGG Tunnel LCC-Calculator) zur Verfügung gestellt.

Die Funktionalität und die Ein- und Ausgaben sind im gesonderten Benutzerhandbuch beschrieben.

Das Berechnungstool wird kostenfrei über www.oegg.at zur Verfügung gestellt. Für die Richtigkeit der Berechnung wird seitens der ÖGG keine Haftung übernommen. Für die korrekte Anwendung sind einzig die Anwendenden verantwortlich.

7. FIKTIVES BEISPIEL: STRASSENTUNNEL NEUBAU MIT VARIANTENBETRACHTUNG

7.1. Einleitung

Das folgende Beispiel dient der Illustration der Systematik der gegenständlichen Empfehlung sowie der Anwendung des zur Verfügung gestellten Berechnungstools ÖGG-TLC³. Es handelt sich um einen Straßentunnel in einer für österreichische Verhältnisse typischen Bauweise und Ausstattung. Im Beispiel werden zwei Varianten der technischen Ausbildung betrachtet und deren Einfluss auf die Lebenszykluskosten untersucht.

Es wird ein Betrachtungszeitraum von 68 Jahren gewählt, was zwei großen Generalinstandsetzungszyklen entspricht (siehe nachfolgend):

Die Kosten des Beispiels haben die Preisbasis 2024. Für Baujahr und Beginn der Lebenszyklusbetrachtung wird das Jahr 2024 angenommen.

Hinweis: Die in diesem Beispiel hinterlegten Kosten- und Risikoansätze, Maßnahmenzyklen und -faktoren über den Lebenszyklus sind exemplarisch und stellen ein fiktives Beispiel dar. Sie sind je nach Anwendungsfall durch die Anwendenden auf Grundlage der anlagenspezifischen technischen/betrieblichen Randbedingungen, auf Grundlage der jeweiligen netzspezifischen Erfahrungen sowie unter Berücksichtigung der jeweiligen Instandhaltungsstrategie des Lebenszyklusmanagements zu wählen!

7.2. Beschreibung des Tunnelobjekts

Das fiktive Beispiel ist ein einröhriger Straßentunnel (Gesamtlänge 1.000 m) in bergmännischer Bauweise (Neue Österreichische Tunnelbauweise, l=952 m) mit kürzeren offenen Bauweisen an beiden Portalen (jeweils l=24 m). Die Fahrbahnbreite des zweistreifigen Tunnelquerschnitts beträgt 8,0 m. Für Innenausbau und Ausstattung wird ein den aktuellen österreichischen Richtlinien und Vorschriften entsprechender Standard angenommen.

Für die bergmännische Bauweise wird von einem Festgesteinsvortrieb ausgegangen mit guten bis mittelmäßigen Gebirgsverhältnissen (vorherrschender Gebirgsverhaltenstyp GVT 3 im Sinne der ÖGG-Richtlinie Geotechnische Planung von Untertagebauten Zyklischer und Kontinuierlicher Vortrieb [15]). Die Gebirgsverhältnisse lassen aus geomechanischer Sicht eine offene Sohle zu.

Es werden zwei technische Varianten untersucht, die sich hinsichtlich folgender Bauteile unterscheiden:

Tabelle 4: Unterscheidung Beispielrechnung Variante „Drainiert“ zu Variante „WDI“ (wasserundurchlässige Innenschale)

Bauteile	Variante „Drainiert“	Variante „WDI“
Ausbruch und Sicherung	ohne Sohlgewölbe/offene Sohle	mit flachem Sohlgewölbe
Innenausbau	unbewehrte Innenschale	bewehrte Innenschale mit flachem Sohlgewölbe
Abdichtung und Entwässerung (Bergwasser)	Kunststoffabdichtungsbahn, Ulmendrainagen, Tunnelhauptentwässerung	WDI-Innenschale ohne Abdichtungsfolie und ohne Drainage
Tunnelanstrichsystem	auf Flächenspachtelung in offenen Bauweisen und in Bodenzone der bergm. Bauweisen, restliche Flächen auf Porenspachtelung	zur Gänze auf Flächenspachtelung

Die übrigen baulichen Anlagen sind identisch zwischen beiden Varianten:

- Betonfahrbahn
- erhöhte Seitenstreifen mit darunterliegendem Kabeltrog
- Fahrbahmentwässerung mittels Schlitzrinnen, Tauchwandschächten und Sammelleitung
- Löschwasserleitung
- Portalbereich:
 - Betriebsgebäude
 - Gewässerschutzanlage
 - Löschwasserbecken
 - sonstige Vorportaleinrichtungen (Fahrzeugrückhaltesysteme, Haltebuchten, Fundamente für Verkehrszeichen und -brücken u.dgl.)

Die technische Ausstattung (betriebs- und sicherheitstechnische Ausrüstung) ist bei beiden Varianten ebenfalls gleich:

- mechanische Längslüftung mittels Strahlventilatoren sowie Komponenten zur Regelung/Steuerung und Luftüberwachung
- Energieversorgung Mittel-, Niederspannung und Sicherheitsstromversorgung und Verteilung
- Einfahrts- und Innenstreckenbeleuchtung
- Verkehrsüberwachung: Video, Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen, Lichtsignalanlagen, Verkehrszählung
- Notruf
- Funk
- Beschallung
- Brandmeldeanlage
- Tunnelsteuerung
- Türen und Tore

7.3. Elementkatalog

Die folgenden Bauteile und Ausrüstungskomponenten wurden im Blatt **rd01.ElementeGES** angelegt:
Bauliche Komponenten

rd01.Element	Export	Import	rd01.Ebene 1	rd01.Ebene 2	rd01.Ebene 3	rd01.Ebene 4	rd01.Ebene 5
ASF_GBW_Ausbruch und Sicherung_Profil_			ASF	GBW	Ausbruch und Sic	Profil	
ASF_GBW_Ausbruch und Sicherung_Sohlgewölbe_			ASF	GBW	Ausbruch und Sic	Sohlgewölbe	
ASF_OBW_Baugrube Neubau_0_0			ASF	OBW	Baugrube Neuba	0	0
ASF_GBW_Innenschale und Abdichtung_unbewehrt_			ASF	GBW	Innenschale und	unbewehrt	
ASF_GBW_innenschale und Abdichtung_bewehrt_			ASF	GBW	innenschale und	bewehrt	
ASF_OBW_Gewölbe und Abdichtung_0_			ASF	OBW	Gewölbe und Abc	0	
ASF_Bauliche Ausrüstung_Beschichtung_SE2			ASF		Bauliche Ausrüst	Beschichtung	SE2
ASF_Bauliche Ausrüstung_Beschichtung_SE1			ASF		Bauliche Ausrüst	Beschichtung	SE1
ASF_Fahrbahn_Beton_			ASF		Fahrbahn	Beton	
ASF_erh.Seitenstr._inkl.Schlitzr_Bordst_Abdeckpl_Gussasphalt_			ASF		erh.Seitenstr.	inkl.Schlitzr_Bor	
ASF_Bergwasser_Ulmdrainage_			ASF		Bergwasser	Ulmdrainage	
ASF_Bergwasser_Sammler inkl. Schächte_			ASF		Bergwasser	Sammler inkl. Schächte	
ASF_Fahrbahnwasser_Sammler inkl. Schächte_			ASF		Fahrbahnwasser	Sammler inkl. Schächte	
ASF_Fahrbahnwasser_GSA_			ASF		Fahrbahnwasser	GSA	
ASF_Löschwasser_LÖWA-Leitung_			ASF		Löschwasser	LÖWA-Leitung	
ASF_Löschwasser_LÖWA-Becken_			ASF		Löschwasser	LÖWA-Becken	
ASF_Betriebsgebäude_0_			ASF		Betriebsgebäude	0	
ASF_Vorportal baulich_0_			ASF		Vorportal baulich	0	

Elektromaschinelle Komponenten

rd01.Element	Export	Import	rd01.Ebene 1	rd01.Ebene 2	rd01.Ebene 3	rd01.Ebene 4	rd01.Ebene 5
ASF_Bauliche Ausrüstung_Beschichtung_SE2			ASF		Bauliche Ausrüst	Beschichtung	SE2
ASF_Bauliche Ausrüstung_Beschichtung_SE1			ASF		Bauliche Ausrüst	Beschichtung	SE1
ASF_Fahrbahn_Beton_			ASF		Fahrbahn	Beton	
ASF_erh.Seitenstr._inkl.Schlitzr_Bordst_Abdeckpl_Gussasphalt_			ASF		erh.Seitenstr.	inkl.Schlitzr_Bor	
ASF_Bergwasser_Ulmdrainage_			ASF		Bergwasser	Ulmdrainage	
ASF_Bergwasser_Sammler inkl. Schächte_			ASF		Bergwasser	Sammler inkl. Schächte	
ASF_Fahrbahnwasser_Sammler inkl. Schächte_			ASF		Fahrbahnwasser	Sammler inkl. Schächte	
ASF_Fahrbahnwasser_GSA_			ASF		Fahrbahnwasser	GSA	
ASF_Löschwasser_LÖWA-Leitung_			ASF		Löschwasser	LÖWA-Leitung	
ASF_Löschwasser_LÖWA-Becken_			ASF		Löschwasser	LÖWA-Becken	
ASF_Betriebsgebäude_0_			ASF		Betriebsgebäude	0	
ASF_Vorportal baulich_0_			ASF		Vorportal baulich	0	
ASF_BuS_Energieversorgung_MSP_			ASF	BuS	Energieversorgur	MSP	
ASF_BuS_Energieversorgung_NSP_			ASF	BuS	Energieversorgur	NSP	
ASF_BuS_Energieversorgung_SSV-Anlage_			ASF	BuS	Energieversorgur	SSV-Anlage	
ASF_BuS_Energieversorgung_Erdung/Pot.ausgleich_			ASF	BuS	Energieversorgur	Erdung/Pot.ausg	
ASF_BuS_Lüftung_Strahlv. Mech_			ASF	BuS	Lüftung	Strahlv. Mech	
ASF_BuS_Lüftung_Stralv. Elektrotechn._			ASF	BuS	Lüftung	Stralv. Elektrotec	
ASF_BuS_Lüftung_Regelung, Steuerung_			ASF	BuS	Lüftung	Regelung, Steuer	
ASF_BuS_Lüftung_Gebäudelüftung, Klimaanlage_			ASF	BuS	Lüftung	Gebäudelüftung,	
ASF_BuS_Messeinrichtung_CO-Messung_			ASF	BuS	Messeinrichtung	CO-Messung	
ASF_BuS_Messeinrichtung_Trübsichtmessung_			ASF	BuS	Messeinrichtung	Trübsichtmessung	
ASF_BuS_Messeinrichtung_LG-Messung_			ASF	BuS	Messeinrichtung	LG-Messung	
ASF_BuS_Beleuchtung_Einfahrt_			ASF	BuS	Beleuchtung	Einfahrt	
ASF_BuS_Beleuchtung_Innenstreckenbeleuchtung_			ASF	BuS	Beleuchtung	Innenstreckenbeleuchtung	
ASF_BuS_Beleuchtung_Fluchtweghinweis-/orientierungsleuchten_			ASF	BuS	Beleuchtung	Fluchtweghinweis-/orientierungsle	
ASF_BuS_Beleuchtung_Regelung/Messwerterfassung_			ASF	BuS	Beleuchtung	Regelung/Messwerterfassung	
ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_Straßenverkehrszeichen_			ASF	BuS	Überwachung / L	Straßenverkehrszeichen	
ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_Verkehrszählung_			ASF	BuS	Überwachung / L	Verkehrszählung	
ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_Videoanlagen_			ASF	BuS	Überwachung / L	Videoanlagen	
ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_VLSA_			ASF	BuS	Überwachung / L	VLSA	
ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_Höhenkontrolle_			ASF	BuS	Überwachung / L	Höhenkontrolle	
ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen_			ASF	BuS	Überwachung / L	Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	
ASF_BuS_Notruf_0_			ASF	BuS	Notruf	0	
ASF_BuS_Funkanlage_0_			ASF	BuS	Funkanlage	0	
ASF_BuS_Beschallungsanlage_0_			ASF	BuS	Beschallungsanla	0	
ASF_BuS_Brandmelde-/Brandbekämpfungsanlage_Brandmelde Kabel_			ASF	BuS	Brandmelde-/Br	Brandmelde Kabel	
ASF_BuS_Brandmelde-/Brandbekämpfungsanlage_Brandmelde Steuerung_			ASF	BuS	Brandmelde-/Br	Brandmelde Steuerung	
ASF_BuS_Tunnelsteuerung_Automatisierung_			ASF	BuS	Tunnelsteuerung	Automatisierung	
ASF_BuS_Tunnelsteuerung_Prozessvisualisierung_			ASF	BuS	Tunnelsteuerung	Prozessvisualisierung	
ASF_BuS_Tunnelsteuerung_Archivierung/Datenauswertung_			ASF	BuS	Tunnelsteuerung	Archivierung/Datenauswertung	
ASF_BuS_Gewässerschutzanlagen_0_			ASF	BuS	Gewässerschutz	0	
ASF_BuS_Türen, Tore, Verkleidungen_0_			ASF	BuS	Türen, Tore, Verk	0	
ASF_Betriebliche Erhaltung_			ASF		Betriebliche Erhaltung		

Abbildung 6: Beispielrechnung Elementkatalog

In diesem beispielspezifischen Elementkatalog sind entsprechende Ersterrichtungskosten, Erneuerungskosten, Instandsetzungskosten und laufende Kosten inklusive ihres jeweiligen zeitlichen Anfalls hinterlegt. Darüber hinaus wurde ein Element „Betriebliche Erhaltung“ definiert. Dies berücksichtigt einen jährlichen, d.h. „laufenden“ Kostenbetrag für die allgemeine Betriebsführung, der nicht einzelnen Elementen zuordenbar ist, aber in seiner Höhe für die Lebenszykluskosten relevant ist.

7.4. Querschnittsdefinition

Im Blatt **rF01.QSDef** wurden insgesamt fünf Querschnitte angelegt und die Elemente den Querschnitten zugeordnet.

Querschnitt Allgemein:

Hier sind jene Elemente enthalten, die bei allen Varianten und allen Tunnelabschnitten (offene Bauweise, bergmännische Bauweise (drainiert oder undrainiert/WDI)) gleichermaßen vorhanden sind, also z.B. die gesamte elektromaschinelle Ausstattung in der Tunnelröhre, die Fahrbahn, die Fahrbahntwässerung inkl. Sammler, die erhöhten Seitenstreifen oder Löschwasserversorgung und das Element „Betriebliche Erhaltung“.

Querschnitt „OBW“ (offene Bauweise)

Für den Querschnitt „OBW“ wurden nur jene Bauteile ausgewählt, die spezifisch dem Querschlag zuzuordnen sind, also Baugrube, Tragwerk OBW inkl. Abdichtung, Beschichtung auf Flächenspachtel.

Querschnitt „BBW“ (bergmännische Bauweise drainiert)

Für den Querschnitt „BBW“ wurden nur jene Bauteile ausgewählt, die spezifisch der drainierten bergmännischen Bauweise zuzuordnen sind, also Ausbruch und Sicherung der Kalotte und der Strosse, unbewehrte Innenschale inkl. Abdichtung, Ulmendrainage inkl. Tunnelhauptentwässerung, Tunnelbeschichtung abgestuft für unbewehrte Innenschalen.

Querschnitt „WDI“ (druckwasserdichte Innenschale)

Für den Querschnitt „WDI“ wurden nur jene Bauteile ausgewählt, die spezifisch der druckwasserhaltenden Bauweise zuzuordnen sind, also ebenfalls Ausbruch und Sicherung der Kalotte und der Strosse sowie hier zusätzlich der Sohle, die bewehrte Innenschale inkl. Sohlgewölbe, Tunnelbeschichtung zu 100 % auf Flächenspachtel für bewehrte Innenschalen. Einrichtungen für das Sammeln und Ableiten von Bergwässern (Ulmendrainagen, Tunnelhauptentwässerung) sind hier naturgemäß nicht vorhanden.

Querschnitt „zentr. Komponenten“

Ein weiterer Querschnitt wurde für die zentralen Komponenten an den Portalen definiert, nämlich Hochbauten der Betriebszentrale, Gewässerschutzanlagen und Löschwasserbecken sowie Vorportaleinrichtungen.

Empfehlung für die Ermittlung von Lebenszykluskosten von Verkehrstunneln

1	2	3	4	Elemente	Allg	OBW	BBW	WDI	Zent
ASF	GBW			ASF_GBW_Ausbruch und Sicherung_Profil_					
ASF	GBW			ASF_GBW_Ausbruch und Sicherung_Sohlgewölbe_					
ASF	OBW			ASF_OBW_Baugrube Neubau_0_0					
ASF	GBW			ASF_GBW_Innenschale und Abdichtung_unbewehrt_					
ASF	GBW			ASF_GBW_innenschale und Abdichtung_bewehrt_					
ASF	OBW			ASF_OBW_Gewölbe und Abdichtung_0_					
ASF				ASF_Bauliche Ausrüstung_Beschichtung_SE2					
ASF				ASF_Bauliche Ausrüstung_Beschichtung_SE1					
ASF				ASF_Fahrbahn_Beton_					
ASF				ASF_erh. Seitenstr. inkl. Schlitzr_Bordst_Abdeckpl_Gussasphalt_					
ASF				ASF_Bergwasser_Ulmendrainage_					
ASF				ASF_Bergwasser_Sammler inkl. Schächte_					
ASF				ASF_Fahrbahnwasser_Sammler inkl. Schächte_					
ASF				ASF_Fahrbahnwasser_GSA_					
ASF				ASF_Löschwasser_LÖWA-Leitung_					
ASF				ASF_Löschwasser_LÖWA-Becken_					
ASF				ASF_Betriebsgebäude_0_					
ASF				ASF_Vorportal baulich_0_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Energieversorgung_MSP_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Energieversorgung_NSP_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Energieversorgung_SSV-Anlage_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Energieversorgung_Erdung/Pot.ausgleich_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Lüftung_Strahlv. Mech_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Lüftung_Stralv. Elektrotechn._					
ASF	BuS			ASF_BuS_Lüftung_Regelung, Steuerung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Lüftung_Gebäudelüftung, Klimaanlage_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Messeinrichtung_CO-Messung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Messeinrichtung_Trübsichtmessung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Messeinrichtung_LG-Messung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Beleuchtung_Einfahrt_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Beleuchtung_Innenstreckenbeleuchtung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Beleuchtung_Fluchtweghinweis-/orientierungsleuchten_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Beleuchtung_Regelung/Messwerterfassung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_Straßenverkehrszeichen_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_Verkehrszählung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_Videoanlagen_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_VLSA_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_Höhenkontrolle_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Überwachung / Lenkung Verkehr_Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Notruf_0_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Funkanlage_0_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Beschallungsanlage_0_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Brandmelde-/Brandbekämpfungsanlage_Brandmelde Kabel_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Brandmelde-/Brandbekämpfungsanlage_Brandmelde Steuerung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Tunnelsteuerung_Automatisierung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Tunnelsteuerung_Prozessvisualisierung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Tunnelsteuerung_Archivierung/Datenauswertung_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Gewässerschutzanlagen_0_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Türen, Tore, Verkleidungen_0_					
ASF	BuS			ASF_BuS_Betriebliche Erhaltung_					

Abbildung 7: Beispielrechnung Querschnittsdefinition

7.5. Tunneldefinition

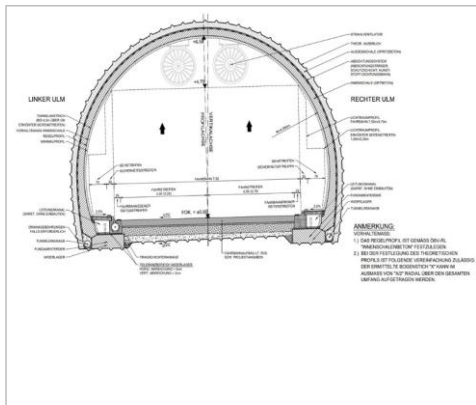
Im Blatt **rF02.TunnelDef** werden die Querschnitte mit Längen hinterlegt und so das gesamte Tunnelobjekt aufgebaut.

Querschnitt

LCC

Tunneldefinitionen

Bezeichnung	Testtunnel
LCC Betrachtungszeitraum	68 Jahre
Jahr Beginn LCC	2024 bis 2092
Jahr Preisbasis rF03.LCC	2024 <<< zwischen 1990 bis 2024
Baukostenindex rF03.LCC	283,0 <<< Umrechnungsfaktor 1,00
Symbolbild	ASF_GBW_1



Gesamt 1001 m Allg

Abschnitt	Länge	Querschnitt
Abschnitt 1	24,0 m	OBW
Abschnitt 2	952,0 m	BBW
Abschnitt 3	24,0 m	OBW
zentr. Komp.	1,0 m	Zentr

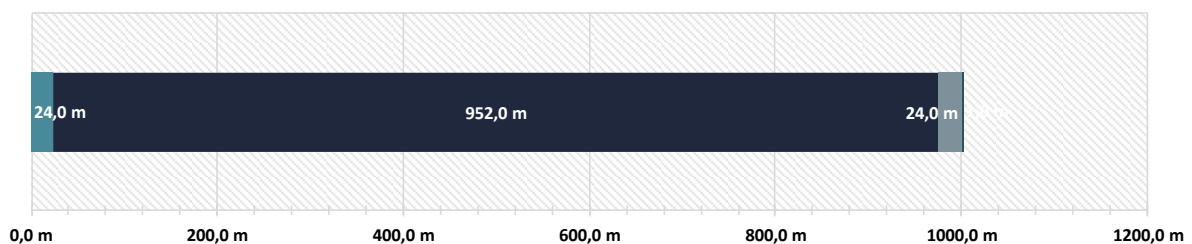


Abbildung 8: Beispielrechnung Tunneldefinition

Die zentralen Komponenten werden mit der Einheitslänge 1,0 m hinterlegt, da das Berechnungstool auf längenbezogene Elementdefinitionen aufbaut, diese Elemente jedoch nur einmalig und im Wesentlichen unabhängig von der Tunnelröhrenlänge vorhanden sind.

In diesem Beispiel wurde dieser Weg gewählt, da die Kosten für diese zentralen Komponenten als Einzelpauschalen aufbereitet wurden. Wenn diese Kosten allerdings bereits umgelegt auf den Laufmeter Tunnelröhre vorlägen, könnte man diese alternativ dem Querschnitt „Allgemein“ zuordnen.

7.6. Aufbau Lebenszyklus

Dem gegenständlichen Beispiel liegt nach der Errichtung im Jahr 0 ein Instandsetzungsplan zugrunde, der eine größere Instandsetzungskampagne alle 34 Jahre und eine kleinere Instandsetzungskampagne alle 17 Jahre vorsieht. Dazwischen erfolgen noch kleinere Zwischensanierungen im Jahr 10 nach Ersterrichtung bzw. 11 Jahre nach jeder der oben angeführten Instandsetzungskampagnen.

Der Gesamtbetrachtungszeitraum beträgt somit 68 Jahre.

Große Instandsetzungen

Die größeren Instandsetzungskampagnen umfassen in diesem Beispiel auszugsweise folgende Maßnahmen, sofern das betreffende Element in der jeweiligen Variante auch vorhanden ist:

Tabelle 5: Beispielrechnung: Maßnahmen große Instandsetzungen (nach 34 bzw. 68 Jahren)

Element	34 Jahre nach Errichtung	68 Jahre nach Errichtung
<i>elektromaschinelle Ausstattung</i>	Erneuerung komplett	Erneuerung komplett
<i>Fahrbahn</i>	Erneuerung komplett	Erneuerung komplett
<i>Fahrbahnentwässerung Sammler</i>	Instandsetzung Faktor 1,0	Erneuerung
<i>Off. Bauw. Tragwerk u. Abdichtung</i>	Instandsetzung Faktor 1,0	Instandsetzung Faktor 5,0
<i>Beschichtung</i>	Erneuerung komplett	Erneuerung komplett
<i>Innenschale unbewehrt</i>	Instandsetzung Faktor 1,0	Instandsetzung Faktor 3,0
<i>Innenschale bewehrt</i>	Instandsetzung Faktor 1,0	Instandsetzung Faktor 5,0
<i>Ulmendrainagen</i>	Instandsetzung Faktor 1,5	Instandsetzung Faktor 2,0
<i>Bergwassersammler</i>	Erneuerung komplett	Erneuerung komplett
<i>Löschwasserleitung</i>	Erneuerung komplett	Erneuerung komplett
<i>Löschwasserbehälter baulich</i>	Instandsetzung Faktor 1,0	Erneuerung komplett
<i>Gewässerschutzanlage baulich</i>	Instandsetzung Faktor 1,0	Erneuerung komplett
<i>Vorportal bauliche Einrichtung</i>	Erneuerung komplett	Erneuerung komplett
<i>Betriebsgebäude</i>	Instandsetzung	Erneuerung komplett

Kleinere Instandsetzungen

Die kleineren Instandsetzungskampagnen umfassen in diesem Beispiel auszugsweise folgende Maßnahmen, sofern das betreffende Element in der jeweiligen Variante auch vorhanden ist:

Tabelle 6: Beispielrechnung: Maßnahmen kleine Instandsetzungen nach 17 bzw. 51 Jahren

Element	17 Jahre nach Errichtung	51 Jahre nach Errichtung
<i>Innenschale unbewehrt</i>	Kleinmaßnahmen Faktor 1,0	Kleinmaßnahmen Faktor 1,5
<i>Innenschale bewehrt</i>	Kleinmaßnahmen Faktor 1,0	Kleinmaßnahmen Faktor 2,0
<i>offene Bauweise Tragwerk</i>	Kleinmaßnahmen Faktor 1,0	Kleinmaßnahmen Faktor 2,0
<i>Ulmendrainagen</i>	Instandsetzung Faktor 1,0	Instandsetzung Faktor 2,0
<i>Bergwassersammler</i>	Instandsetzung Faktor 1,0	Instandsetzung Faktor 1,0
<i>Fahrbahn</i>	Instandsetzung	Instandsetzung
<i>erhöhter Seitenstreifen</i>	Kleinmaßnahmen	Kleinmaßnahmen
<i>Tunnelanstrich</i>	Pflegeanstrich	Pflegeanstrich
<i>Mittelspannungsanlage</i>	Instandsetzung	Instandsetzung
<i>Niederspannungsanlage</i>	Instandsetzung	Instandsetzung
<i>Sicherheitsstromversorgung</i>	Erneuerung	Erneuerung
<i>Lüftung Strahlventilatoren</i>	Instandsetzung	Instandsetzung
<i>Lüftung Regelung Steuerung</i>	Erneuerung	Erneuerung
<i>Beleuchtung</i>	Instandsetzung	Instandsetzung
<i>Beleuchtung Regelung</i>	Erneuerung	Erneuerung
<i>Video</i>	Erneuerung	Erneuerung
<i>Verkehrsleit- u. Infoeinrichtungen</i>	Erneuerung	Erneuerung
<i>Notruf</i>	Instandsetzung	Instandsetzung
<i>Funk</i>	Erneuerung	Erneuerung
<i>Beschallung</i>	Instandsetzung	Instandsetzung
<i>Brandmeldeanlage</i>	Erneuerung	Erneuerung
<i>Tunnelsteuerung</i>	Erneuerung	Erneuerung
<i>Türen und Tore</i>	Erneuerung	Erneuerung

Zwischensanierungen

Die Zwischensanierungen, die erstmals im 10. Jahr nach Ersterrichtung bzw. 11 Jahre nach den Instandsetzungskampagnen gesetzt werden, umfassen in diesem Beispiel auszugsweise folgende Maßnahmen, sofern das betreffende Element in der jeweiligen Variante auch vorhanden ist. Sie beschränken sich auf die elektromaschinelle Ausstattung.

Tabelle 7: Beispielrechnung: Maßnahmen Zwischensanierung

Element	10, 28, 45 und 62 Jahre nach Ersterrichtung
Sicherheitsstromversorgung	Instandsetzung
Lüftung Messeinrichtungen	Instandsetzung
Beleuchtung	Kleinmaßnahmen
Beleuchtung Regelung	Kleinmaßnahmen
Video	Instandsetzung
Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	Kleinmaßnahmen
Funk	Instandsetzung
Brandmeldeanlage Steuerung	Instandsetzung
Tunnelsteuerung	Instandsetzung
Türen und Tore	Kleinmaßnahmen

Laufende Aufwendungen

Darüber hinaus werden jährlich folgende Maßnahmen angesetzt, sofern das betreffende Element in der jeweiligen Variante auch vorhanden ist:

Tabelle 8: Beispielrechnung: Laufende Maßnahmen

Element	Jährlich
Fahrbahn	Laufende Fugenpflege, Ausbesserungsarbeiten
Ulmendrainagen und Tunnelhauptentwässerung	Spülen
Fahrbahnentwässerung inkl. Sammler	Spülen
global (ohne spezifische Zuordnung zu technischen Einzelelementen)	betriebliche Erhaltung

Die Maßnahmen über den Lebenszyklus unterscheiden sich somit zwischen den beiden Varianten „drainiert“ und „WDI“. Diese Unterschiede manifestieren sich je nach betreffendem Element beispielsweise in den jeweiligen Kostenansätzen, dem grundsätzlichen Anfallen von Maßnahmen, deren Häufigkeit oder Ausmaß.

Bei Variante „drainiert“ sind Maßnahmen für die laufende Erhaltung sowie wiederholte Instandsetzung der Ulmendrainage und des Bergwassersammlers abgebildet, während diese naturgemäß bei Variante „WDI“ entfallen bzw. sich nur auf die Außendrainagen der Portalbauwerke beschränken.

Auch gibt es Unterschiede bei den Aufwendungen im Zusammenhang mit der Instandsetzung der durchgängig bewehrten Innenschale bei der Variante „WDI“, da hier beispielsweise ein höherwertiges Beschichtungssystem (Flächenspachtelung) errichtet und instandgehalten wird und sich die Betoninstandsetzung bewehrter Innenschalen anders gestaltet als bei der unbewehrten Innenschale der Variante „drainiert“.

7.7. Risikoansätze

Für das Beispielprojekt wird aufgrund der hydrogeologischen Verhältnisse angenommen, dass in begrenzten Abschnitten ein erhöhtes Versinterungspotential besteht. Es wird angenommen, dass Sinterneigungen in den Ulmendrainagen erhaltungsrelevant werden könnten. Die Sintererscheinungen breiten sich ggf. über die Tunnellänge entlang der Ulmendrainagen und Bergwassersammlers in andere Bereiche aus. Diesem Umstand wird in Form einer Risikobetrachtung Rechnung getragen. Auf die Aufwendungen für das jährliche Spülen und die wiederkehrende Instandsetzung der sekundären Entwässerungselemente Ulmendrainage, Querausleitungen und Bergwassersammelleitungen wird ein zeitlich linearer Verlauf des Risikos angenommen, beginnend mit 0 und linear jährlich um 5 % steigend bezogen auf die betroffenen Basiskosten.

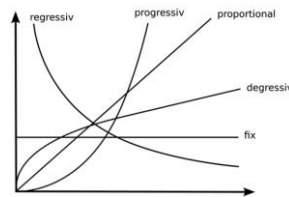
Risiko

Eine Risikobeurteilung ist optional. Die Risikokosten R können einen fix ($a=0$), proportional ($a=1$), degressiv ($a<1$ und $rv>0$), regressiv ($a<1$ und $rv<0$) oder progressiv ($a>1$) über den Life-Cycle verlaufen.

Dynamische Dropdowns
aktualisieren

Risiko aktivieren

JA



Name	R_f [-]	r_v [-/Jahr]	a	Wirkung	Auswahl	Verlauf	Jahr 1	Jahr 150
1 Aufwand Spülen Ulmend	0,0000	0,0500	1,0000	Element	ASF_Bergwasser_Ulmendrainage_	proportional	5,000%	750,000%
2 Sinterneigung Sammler	0,0000	0,0500	1,0000	Element	ASF_Bergwasser_Sammler inkl. Schächte_	proportional	5,000%	750,000%

Abbildung 9: Risikobetrachtung Bergwasserdrainage

7.8. Ergebnisse

Kosten

Die nachstehende Tabelle fasst die ermittelten Basiskosten je Instandhaltungsjahr zusammen, bezogen auf die gewählte Preisbasis 2024:

Tabelle 9: Beispielrechnung: Kosten in den Jahresscheiben

Jahr	Maßnahme	Variante „drainiert“	Variante „WDI“
0	Ersterrichtung	25,75 Mio.	30,86 Mio.
jährlich	jährliche laufende Kosten	0,44 Mio.	0,31 Mio.
10	Zwischeninstandsetzung	1,00 Mio.	0,88 Mio.
17	Instandsetzung klein	4,50 Mio.	4,62 Mio.
28	Zwischeninstandsetzung	1,00 Mio.	0,88 Mio.
34	Instandsetzung	10,73 Mio.	10,68 Mio.
45	Zwischeninstandsetzung	1,00 Mio.	0,88 Mio.
51	Instandsetzung klein	4,63 Mio.	4,72 Mio.
62	Zwischeninstandsetzung	1,00 Mio.	0,88 Mio.
68	Instandsetzung groß	12,73 Mio.	13,87 Mio.

Die in Tabelle 9 wiedergegebenen Kostenansätze beziehen sich auf das spezifische Beispiel und können nicht verallgemeinert auf andere Tunnelobjekte übertragen werden, zumal sich z.B. Kostenansätze für laufende Kosten stark zwischen verschiedenen Verkehrsträgern (Schiene oder Straße) und Betriebsführungen unterscheiden.

Da der Betrachtungszeitraum bei beiden Varianten gleich ist und für beide die gleichen Lebensdauern angenommen werden, ist ein Vergleich der kumulierten Kosten über den gewählten Gesamtbetrachtungszeitraum von 68 Jahren zulässig. Sie sind nachstehend für die gewählten Ansätze für Valorisierung (1,5 % p.a.) und Diskontierung (3,0 % p.a.) zusammengefasst:

Tabelle 10: Beispielrechnung: kumulierte Kosten

	Variante „drainiert“		Variante „WDI“
	ohne Risikokosten Versinterung	mit Risikokosten Versinterung	Risiko Versinterung nicht relevant
kumulierte Basiskosten (B)	88,61 Mio.	88,61 Mio.	87,10 Mio.
kumulierte Risikokosten (R)	-	17,82 Mio.	-
kumulierte Vorausvalorisierung (V)	58,17 Mio.	77,46 Mio.	54,49 Mio.
kumulierte Diskontierung (D)	- 85,02 Mio.	- 112,96 Mio.	- 79,21 Mio.
Summe B+R+V+D	61,76 Mio.	70,93 Mio.	62,38 Mio.

Diskussion

Da es sich um ein fiktives Beispiel eines Straßentunnels unter spezifischen hydrologischen und betrieblichen Randbedingungen handelt, können aus den Ergebnissen keinerlei allgemeingültige Schlussfolgerungen zur Systemwahl eines Tunnels gezogen werden. Für den spezifischen fiktiven Anwendungsfall lässt sich aber feststellen:

Die Variante „WDI“ weist höhere Herstellkosten auf, was v.a. dem größeren Ausbruchsquerschnitt und dem aufwändigeren Innenausbau (bewehrte Innenschale, Sohlgewölbe) geschuldet ist.

Die laufenden jährlichen Kosten sind bei der Variante „WDI“ geringer, da Aufwendungen für das Spülen von Bergwasserdrainagen weitestgehend entfallen. Sie ist also in diesem Aspekt wartungsfreundlicher. Ebenso entfallen die Kosten für die Instandsetzung der Drainagen. Dem stehen wiederum etwas höhere Instandsetzungskosten für die bewehrte Innenschale gegenüber.

Obwohl die drainierte Bauweise zunächst günstiger in der Errichtung ist, übersteigen im gegenständlichen Beispiel die über 68 Jahre kumulierten Basiskosten jene der Variante „WDI“ (Differenz 1,5 Mio. bzw. < 2 %). Dies ist im Wesentlichen den Aufwendungen für das jährliche Spülen und wiederholte Instandsetzen der Drainagen geschuldet, deren anteilige Basiskosten sich über den Betrachtungszeitraum schon auf > 10 Mio. kumulieren.

Auch unter Berücksichtigung der Valorisierung und Diskontierung liegen aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Verteilung der Maßnahmenkosten beide Varianten bei der kumulierten Gesamtsumme B+V+D nach 68 Jahren in etwa gleichauf (Differenz rd. 0,6 Mio. bzw. 1 %). Berücksichtigt man hingegen die Unsicherheiten im Zusammenhang mit der Sinterneigung und den damit anfallenden Kosten, so kumulieren sich diese Risikokosten auf rd. 17,3 Mio. vor Valorisierung und Diskontierung. Die kumulierten Gesamtkosten B+R+V+D der Variante „drainiert“ liegen dann in diesem Beispiel bei den hier getroffenen Ansätzen mit + 8,6 Mio. bzw. + 13 % deutlicher über jenen der Variante „WDI“.

Diesen Kostendifferenzen könnten nun in weiterer Folge anderen Effekte, wie z.B. Verfügbarkeiten u. dgl. gegenübergestellt werden. Ermittelt man für beide Lebenszyklusszenarien bzw. beide Varianten auch Verfügbarkeiten, ist für diese Aspekte eine strukturierte Entscheidungsgrundlage für die Variantenauswahl geschaffen.

Wie schon eingangs erwähnt, ist das Ergebnis von den Anlagentopologien und anderen hydrogeologischen und betrieblichen Randbedingungen des jeweiligen spezifischen Tunnels abhängig. Eine Übertragung des Ergebnisses auf andere Tunnelobjekte ist daher nicht zulässig bzw. wäre irreführend. Für eine fundierte Systementscheidung, ob ein Tunnel drainiert oder undrainiert ausgebildet wird, ist stets eine Betrachtung im Einzelfall durchzuführen.

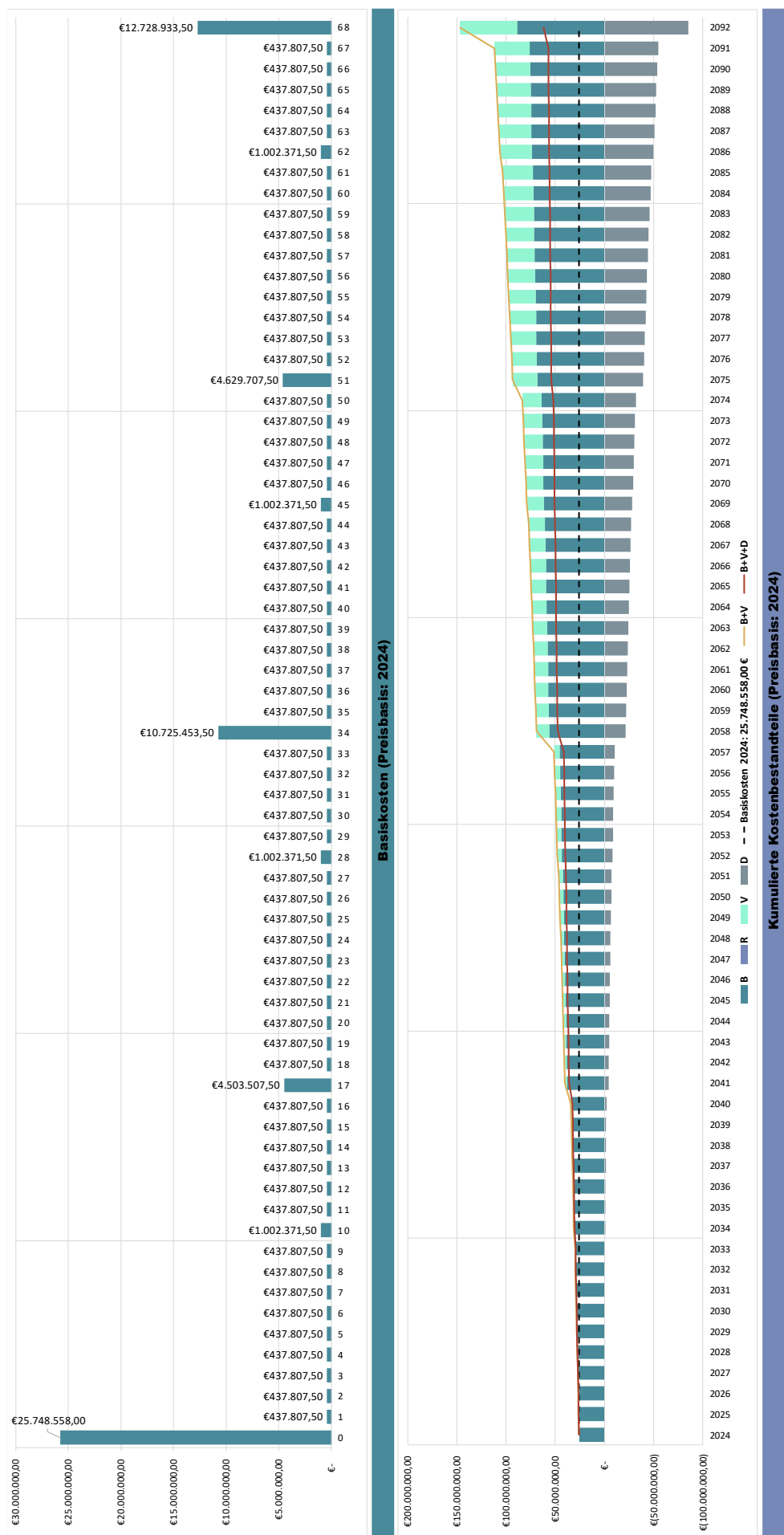


Abbildung 10: Zahlungsflüsse und kumulierte Kosten über Betrachtungszeitraum, Variante „Drainiert“ (ohne Risikokosten)

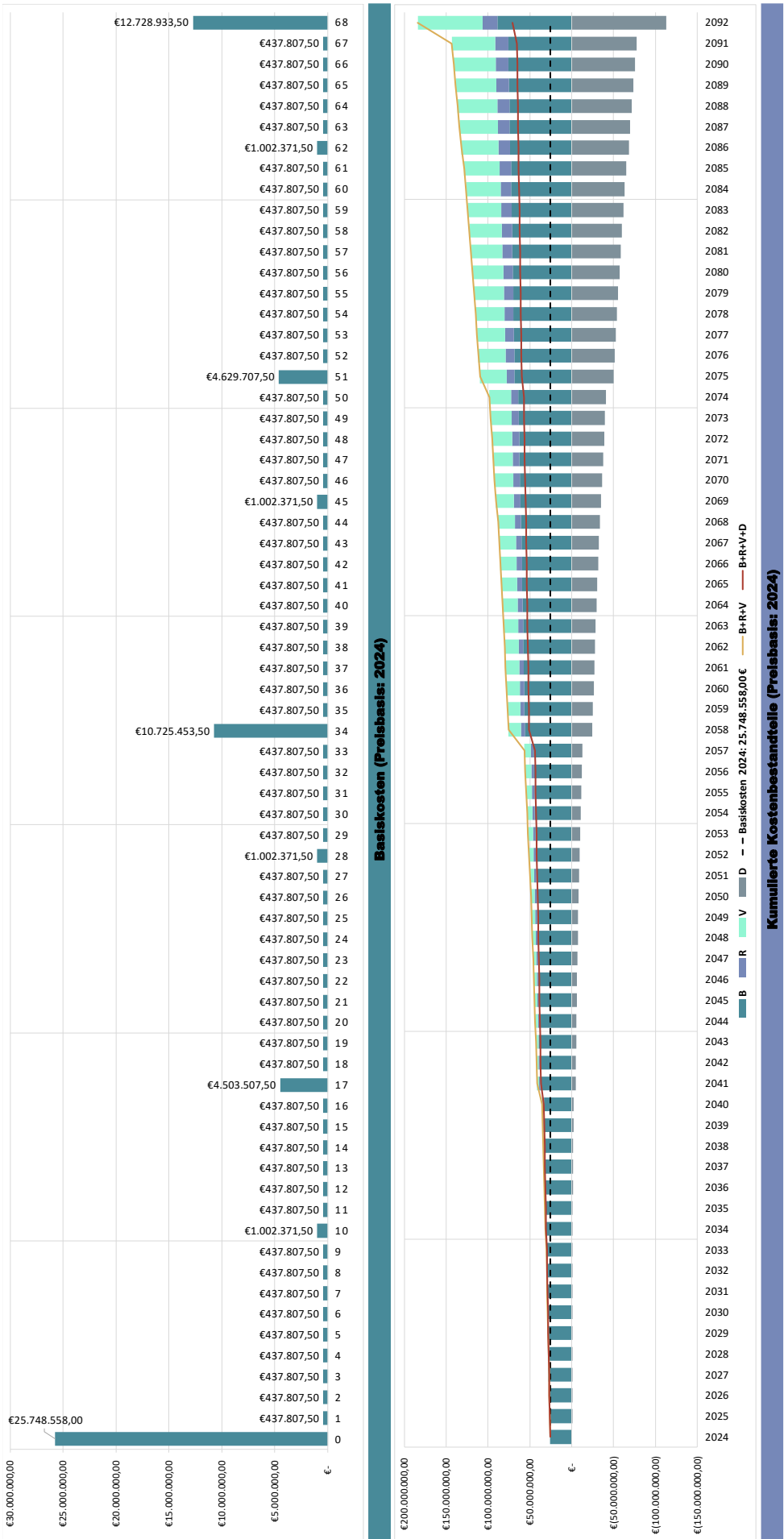


Abbildung 11: Zahlungsflüsse und kumulierte Kosten über Betrachtungszeitraum, Variante „Drainiert“ (mit Risikokosten)

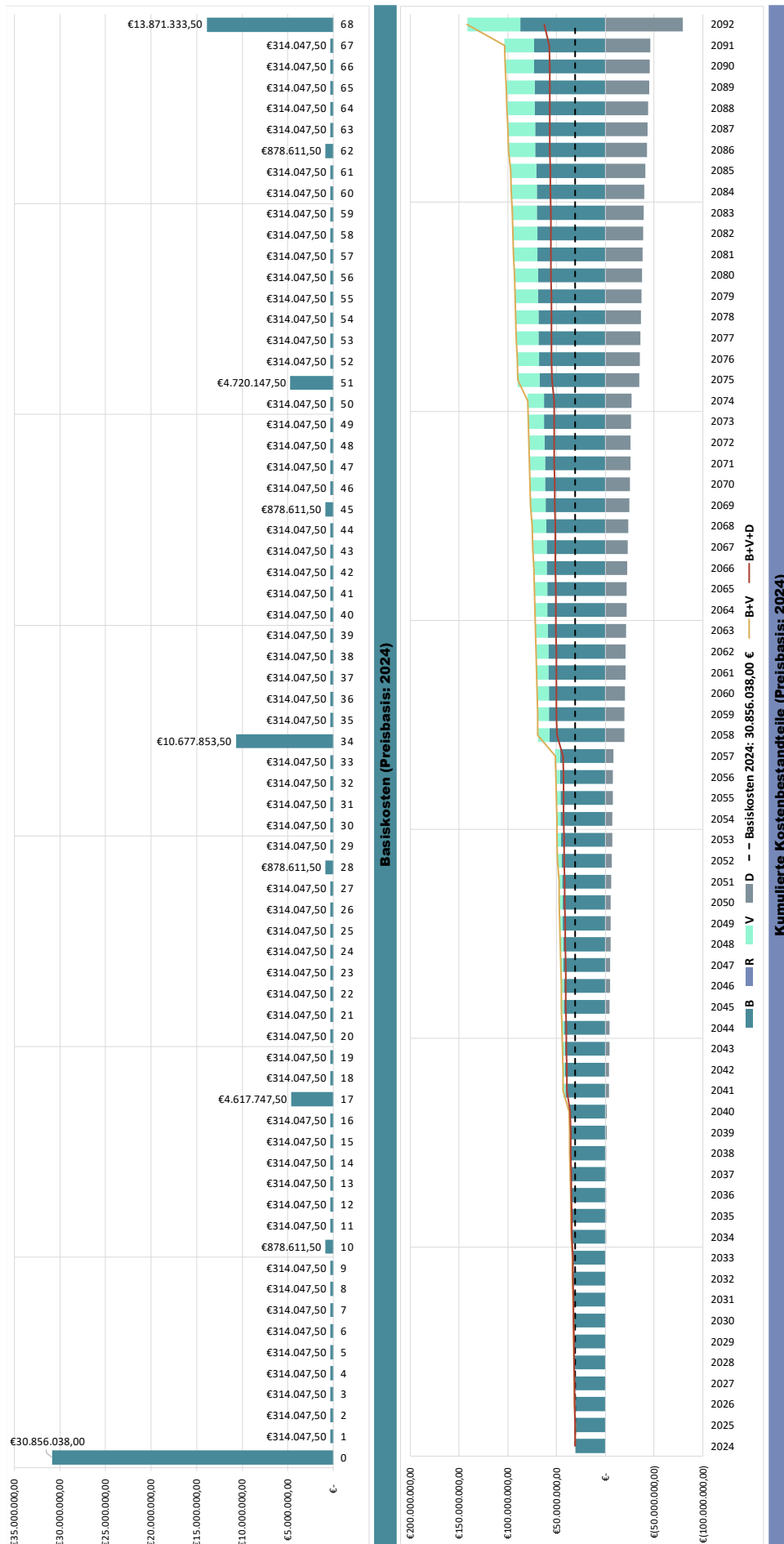


Abbildung 12: Zahlungsflüsse und kumulierte Kosten über Betrachtungszeitraum, Variante „WDI“

8. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ÖGG – Richtlinie für die Kostenermittlung für Projekte der Verkehrsinfrastruktur, 2016.
- [2] ÖNORM B 1801-1 Bauprojekt- und Objektmanagement- Teil 1: Objekterrichtung, 2022.
- [3] ÖNORM B 1801-2 Bauprojekt- und Objektmanagement – Teil 2: Objekt-Folgekosten, 2011.
- [4] ÖNORM B 1801-4 Bauprojekt- und Objektmanagement – Teil 4: Berechnung von Lebenszykluskosten, 2014.
- [5] ÖNORM EN 13306 Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung, 2018.
- [6] ÖNORM B 2061 Preisermittlung für Bauleistungen – Verfahrensnorm, 2020.
- [7] DIN 31051 Grundlagen der Instandhaltung, 2019.
- [8] RVS 13.05.11 Lebenszykluskostenermittlung für Brücken, 2017.
- [9] RVS 13.05.31 Bewertung des Anlagevermögens der Straßeninfrastruktur, 2018.
- [10] RVS 13.03.31 Straßentunnel – Baulich konstruktive Teile, 2024.
- [11] RVS 13.03.41 Straßentunnel – Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, 1. Abänderung Mai 2022.
- [12] RVS 09.03.11 Tunnel-Risikoanalysemodell, 2015.
- [13] Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz.
- [14] Verordnung (EU) Nr. 13030/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im Eisenbahnsystem der Europäischen Union.
- [15] ÖGG – Richtlinie Geotechnische Planung von Untertagebauten Zyklischer und Kontinuierlicher Vortrieb, 2023.
- [16] RVS 02.01.22 Verkehrsplanung – Nutzen-Kosten-Untersuchungen im Verkehrswesen, 2010.
- [17] PIARC Technical Committee C4: Life Cycle Aspects of Electrical Road Tunnel Equipment. PIARC Ref. R2012R14EN, 2012.

AUSTRIAN
SOCIETY FOR
GEOMECHANICS

ÖSTERREICHISCHE
GESELLSCHAFT FÜR
GEOMECHANIK

Innsbrucker Bundesstraße 67
5020 Salzburg, Austria

Tel.: +43 662 875519
H.: www.OEGG.at
E.: Salzburg@OEGG.at