

Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Unterhaltsstrategien für Straßennetze

G. Girmscheid

356

Zusammenfassung Das am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich für das Schweizer Bundesamt für Straßen (ASTRA) entwickelte Unterhaltsmodell für Straßennetze setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Im ersten Teil wurde die Bildung von Lebenszyklus-(LC-)Unterhaltsstrategien und LC-Unterhaltsvarianten für Straßennetze dargelegt. Im zweiten Teil wird das wirtschaftliche Entscheidungsmodell zur Bestimmung der kostenoptimalen LC-Unterhaltsvariante entwickelt. Dieser Beitrag behandelt den zweiten Teil mit dem Lebenszyklus-Kosten-Barwert-(LC-KBW-) Entscheidungsmodell. Dieses Modell dient nach Bildung der LC-Unterhaltsstrategie und der darauf aufbauenden LC-Unterhaltsvarianten den Entscheidungsträgern als Basis für die volkswirtschaftlich ökonomischste Wahl der Unterhaltsmaßnahmen über einen definierten Betrachtungshorizont.

Decision-making model – Life cycle oriented economic efficiency analysis of maintenance strategies for street networks

Abstract The model for street network maintenance developed by the Institute for Construction Engineering and Management at ETH for the Swiss Federal Roads Authority (Bundesamt für Verkehr, ASTRA) is comprised of two parts. The first part focused on defining life cycle (LC) maintenance strategies and LC maintenance alternatives for street networks. The second part addresses the development of the economic decision-making model for identifying the cost-optimised LC maintenance alternative. This paper focuses on the second part relating to the life cycle-cost-cash value (LC-CCV) decision-making model. Once the LC maintenance strategy and resulting LC maintenance alternatives have been defined, this model serves as a basis to help decision makers opt for the macro-economically most efficient maintenance measures over a specific analysis period.

1 Einleitung

Aufbauend auf der LC-Unterhaltsstrategieentwicklung Γ auf Netzebene und der LC-Unterhaltsvariantenbildung U_x mit den dazugehörigen Maßnahmen [1], wird in diesem Beitrag das Lebenszyklus-Kosten-Barwert-(LC-KBW-)Entscheidungsmodell vorgestellt. Dieses LC-KBW-Entscheidungsmodell ermöglicht es den Entscheidungsträgern, die für die Stakeholder des Straßenverkehrs kostenminimale Variante für den Unterhalt zu identifizieren. Zudem ermöglicht das Modell, die finanziellen Auswirkungen von vorge-

zogenen und aufgeschobenen Instandsetzungsmaßnahmen kostenmäßig zu quantifizieren. Es bietet den Entscheidungsträgern die Möglichkeit, die langfristigen Konsequenzen, die mit Unsicherheiten verbunden sind, auf Netzebene probabilistisch zu simulieren.

2 Stand der Forschung

Der Stand der Forschung wurde bereits im Beitrag „Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Strategiebildung und Unterhaltsvarianten für Straßennetze“ nicht nur für die Aspekte Straßenbeurteilung, Straßenzustandsentwicklung, Unterhaltsmaßnahmen und Kosten von Maßnahmen, sondern auch für LCC-Analysen untersucht. Besonders Analysemodelle im Hinblick zur Bewertung von Lebenszykluskosten von alternativen LC-Unterhaltsstrategien bzw. LC-Unterhaltsvarianten von Straßennetzen auf probabilistischer Basis mit klarer Systemabgrenzung bezüglich räumlicher, technischer, methodischer und finanztechnischer Bedingungsgrößen fehlen.

In diesem Beitrag wird das Konzept der LC-Unterhaltsstrategie- und LC-Unterhaltsvariantenbildung, das in [1] veröffentlicht wurde, durch ein probabilistisches LC-KBW-Entscheidungsmodell (Bild 1) ergänzt. Damit steht für die Entscheidungsträger ein Werkzeug zur finanziellen Beurteilung ihrer LC-Straßenunterhaltsstrategie zur Verfügung, unter Einbezug der direkt beteiligten Stakeholder der Straßennetze.

3 Forschungsmethodik und Teilmodellansatz

Das LC-KBW-StraUnt-Modell basiert auf dem Konzept der LC-Unterhaltsstrategie- und LC-Unterhaltsvariantenbildung für Straßennetze und Netzabschnitte [1] sowie folgenden konstruktivistischen Ansätzen für das LC-KBW-Entscheidungsmodell:

- Stakeholderabgrenzung auf Betreiber, Nutzer und direkte natürliche Umwelt
- Ökonomisches Minimalprinzip, da ein Mindeststandard/ Mindestnutzen vorgegeben wird
- Dynamische Kostenbetrachtung

In diesem LC-KBW-StraUnt-Modell werden

- die räumlichen und zeitlichen Systemabgrenzungen klar definiert,
- unterschiedliche Zustandsentwicklungen der Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen berücksichtigt,
- Nutzenminderungen durch Zustandsentwicklungen (I_x) als Kosten der Stakeholder berücksichtigt,
- Unsicherheiten zukünftiger Zahlungsströme, Ausgaben- und Geldwertentwicklung durch probabilistische Ansätze und Simulationsmethoden berücksichtigt.

Für die Gestaltung des LC-KBW-StraUnt-Modells wird das konstruktivistische Forschungsparadigma angewendet [2].

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

Professur für Bauprozess- und Bauunternehmensmanagement

Institutsvorsteher

Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich

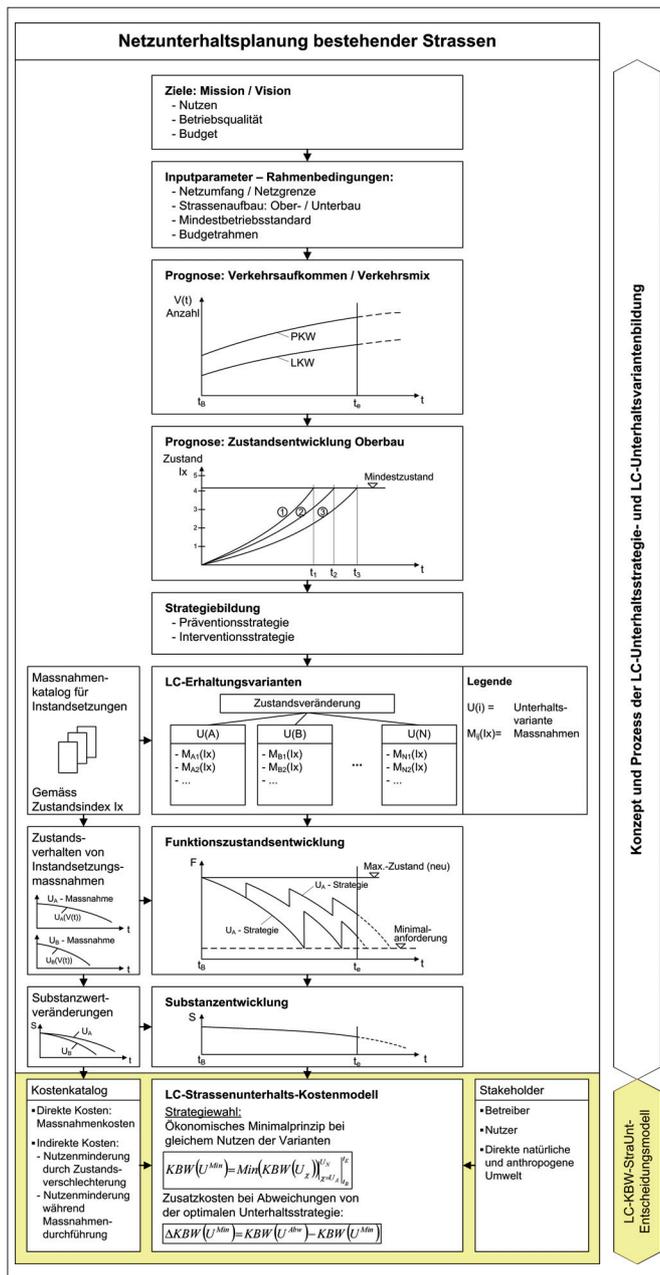


Bild 1. Prozess der LC-Strategieplanung eines Straßennetzunterhalts
 Fig. 1. Process for planning an LC strategy for street network maintenance

Das LC-KBW-StraUnt-Modell wurde denklogisch-deduktiv konstruiert. Zur wissenschaftlichen Güteprüfung wird die Triangulation [3] herangezogen. Dazu wird das denklogisch-deduktive Modell in einen theoretischen Bezugsrahmen eingebettet und durch Realisierbarkeitstests auf die intendierte Input-Output- Beziehung überprüft [2]. Der theoretische Bezugsrahmen für das LC-KBW-StraUnt-Modell wurde zweistufig gewählt:

- Systemabgrenzung mittels Systemtheorie [4], [5] mit den räumlichen, inhaltlichen und zeitlichen Dimensionen
- Strukturierung mittels Finanz- und Entscheidungstheorien [6], [7] sowie Simulationstheorien [8].

4 Systemabgrenzung des LC-KBW-Entscheidungsmodells

Die Systemabgrenzung eines Modells ist die Grundaufgabe der Systemtheorie zur Gestaltung von Modellen [2]. Das LC-KBW-Entscheidungsmodell (Bild 1) ist durch folgende vier Dimensionen charakterisiert:

- **Räumliche Dimension:**
 - Räumliche Systemabgrenzung (Gegenstand: Netzraum und Straßenkörper)
- **Inhaltliche Dimension:**
 - Technische Systemabgrenzung (Instandhaltung: Zustandsentwicklung und Maßnahmen)
 - Methodische Systemauswahl (Wirtschaftlichkeitsvergleichsmethode: statisch oder dynamisch)
 - Finanztechnische Systemauswahl (Rechnungswesen-ebene – Finanz- oder Kostenrechnung; Stakeholder Ausgaben-/Kostenstellen und Ausgaben-/Kostengruppen)
- **Zeitliche Dimension:**
 - Zeitliche, finanzielle Systemabgrenzung (Anfangs- und Endbewertung der Instandsetzungsvarianten)
- **Budgetdimension**
 - Vorgaben der öffentlichen Haushalte

4.1 Räumliche Dimension

Die räumliche Dimension ist identisch mit dem ersten Teil des Modells zur Bildung der LC-Unterhaltsstrategie Γ und der LC-Unterhaltsvarianten χ und wird in Netz (fläch-haftige Ausdehnung) und vertikalen Aufbau des Straßenkörpers gegliedert. Dies wurde bereits im ersten Teil des Modells [1] beschrieben.

4.2 Inhaltliche Dimension

4.2.1 Straßenzustandsentwicklung und Maßnahmenkonzepte
 Die inhaltliche Dimension „Straßenzustandsentwicklung und Maßnahmenkonzepte“ wurde bereits im Beitrag „Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Strategiebildung und Unterhaltsvarianten für Straßennetze“ [1] erläutert und bildet die Basis dieses Teilmodells.

4.2.2 Finanztechnische Systemauswahl Ebenen der Wirtschaftlichkeitsmethode

Zunächst muss festgelegt werden, mit welcher Wirtschaftlichkeitsuntersuchungsmethode der Systemvergleich durchgeführt werden sollte. Da es sich um eine langfristige Strategieentscheidung handelt, ist es für private sowie für öffentliche Institutionen und Organisationen von großer Bedeutung, den zeitlichen Anfall der Ausgaben bzw. Kosten zu berücksichtigen [6]. Zudem spielen die Preisentwicklung und die Geldwertentwicklung bei einer solchen langfristigen Betrachtung eine entscheidende Rolle. Daher muss bzw. sollte eine langfristige Wirtschaftlichkeitsuntersuchung, wie es bei dem LC-KBW-Entscheidungsmodell der Fall ist, mittels dynamischem Net-Present-Value- oder Kosten-Barwert-Verfahren durchgeführt werden [9], [10].

Ebene des Rechnungswesens

Die Entscheidung, auf welcher Ebene des Rechnungswesens die Entscheidungsanalyse mittels LC-KBW-Entscheidungsmodell durchgeführt wird, hängt von der Ausgaben- bzw. Kostenerfassung der Straßennetzbetreiber ab.

Stakeholderebene – Kostenträger

Die im LC-KBW-Entscheidungsmodell berücksichtigten Stakeholder sind in zwiebelschalenförmigen Ebenen aufgebaut. Es werden die Kosten berücksichtigt, die im direkten Zusammenhang mit der Nutzung des Straßennetzes stehen.

Der Werteverzehr von folgenden Akteursgruppen wird bei der Analyse der Unterhaltsvarianten berücksichtigt:

- Betreiber
- Nutzer
- Dritte

358

Beim privaten wie öffentlichen Betreiber wird davon ausgegangen, dass dieser nicht Besitzer des Straßennetzes ist. Der Besitzer ist nach dieser Definition

- die Öffentlichkeit/der Staat oder
- die PPP-Projektgesellschaft.

Unabhängig davon, ob zwischen dem privaten oder öffentlichen Betreiber und dem Besitzer eine Gesellschaftsunion besteht, wird eine kostenmäßige Trennung zwischen Besitzer und Betreiber vorgenommen. Es wird im LC-KBW-Entscheidungsmodell davon ausgegangen, dass der Betreiber ein neues oder bestehendes System übernimmt und für die Erhaltung der Funktionalität und Sicherheit und die Erhaltung der baulichen Substanz zuständig ist. Bei ihm fallen daher keine Ausgaben für die Erstellung an bzw. er braucht die Kosten des Straßensystems nicht abzuschreiben und keine Verzinsung vorzunehmen, da er die Straße nicht besitzt, sondern nur betreibt, also die Straße betriebsbereit auf einem definierten festgelegten Standard (Servicebetrieb) hält. Somit sind alle Maßnahmen des Unterhalts, der Instandsetzung und Erneuerung keine Investitionen, sondern Kosten, d. h. Werteverzehr, die direkt am Zeitpunkt der Maßnahme anfallen, also nicht abgeschrieben werden. Da die Kosten somit den Wertverzehr von Betreiber, Nutzer und Dritten abbilden, ist die Finanzperspektive vollumfassend für die vollständige finanzielle Analyse der Wirkung von Unterhaltsvarianten.

Diese Sichtweise hat wesentliche volkswirtschaftliche Aspekte. Zur wirtschaftlichen Bewertung einzelner Unterhaltsvarianten χ werden daher folgende Stakeholder (Kostenträger) (Bild 2) und folgende Kostengruppen berücksichtigt:

- Kostenträger Straßenbetreiber
 - Kostengruppe – Unterhaltsmaßnahmen
 - Kostengruppe – Erhöhter Unterhalt
- Kostenträger Straßennutzer
 - Kostengruppe – Reisezeitverlängerung, Arbeitszeitausfall etc.
 - Kostengruppe – Erhöhte Fahrzeugbetriebskosten
 - Kostengruppe – Erhöhte Unfallkosten (nur erhöhte)
- Kostenträger Dritte
 - Kostengruppe – Erhöhte Umweltkosten
 - Kostengruppe – Erhöhte Unfallkosten

Die Kosten des Straßenbetreibers setzen sich somit aus den direkten Kosten der einzelnen Unterhaltsmaßnahmen K^M sowie den Kosten, die durch eine Erhöhung des Unterhaltsaufwands ΔK bei schlechtem Straßenzustand entstehen, zusammen (Bild 2). Die normalen Kosten K_0 des betrieblichen Unterhalts, die in jedem Fall anfallen, müssen nicht berücksichtigt werden, da sie für alle Unterhaltsvarianten in gleicher Höhe anfallen.

Die Kosten der Nutzer und Dritter werden somit nicht als Absolutwerte, sondern lediglich in Form der Erhöhung dieser Kosten ΔK im Vergleich zu einem optimalen Straßenzustand, der den Entwurfparametern entspricht, berücksichtigt. Die berücksichtigten Kosten entsprechen also

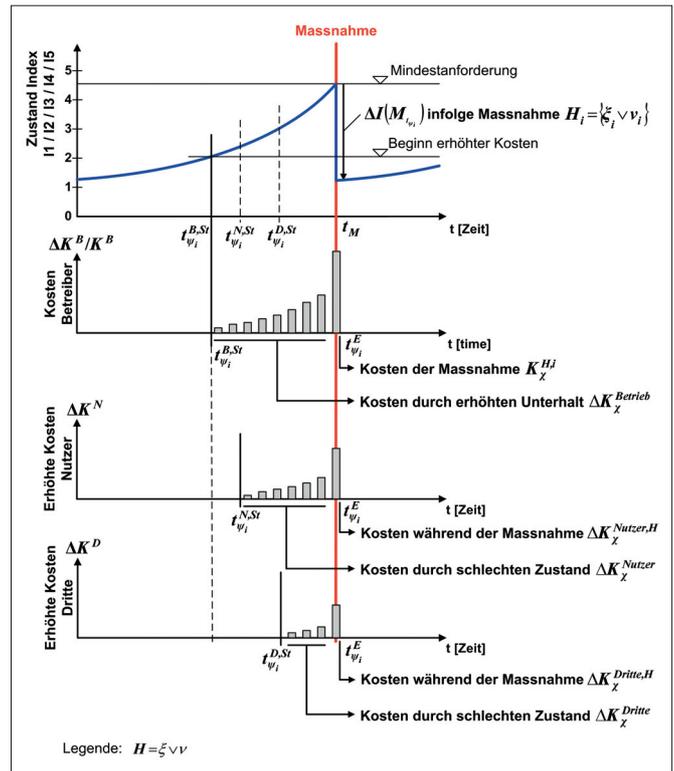


Bild 2. Kostenanteile in Abhängigkeit von Unterhaltsmaßnahmen und dem Straßenzustand

Fig. 2. Proportionate costs depending on the maintenance measures and condition of the streets

der Nutzenminderung durch eine Verschlechterung des Straßenzustands. Es wird also beispielsweise nur die Verlängerung der Reisezeit durch Geschwindigkeitsbeschränkungen, nicht aber die gesamte Reisezeit bewertet. In Bild 2 sind die einzelnen Kostenkomponenten exemplarisch für einen möglichen zeitlichen Verlauf des Straßenzustands und eine Unterhaltsmaßnahme dargestellt.

4.3 Zeitliche Dimension

Für die verschiedenen LC-Unterhaltsvarianten χ der LC-Unterhaltsstrategie Γ muss ein einheitlicher zeitlicher Rahmen definiert werden, in dem die Kosten der Unterhaltsvarianten verglichen werden (Bild 3). Es ist also ein Startzeitpunkt $t = t_B$ und ein Endzeitpunkt $t = t_E$ festzulegen. Wichtig für die Vergleichbarkeit ist, dass jeweils im Anfangs- und im Endzeitpunkt bei allen Unterhaltsvarianten vergleichbare Bedingungen vorliegen. Im Anfangszeitpunkt ist diese Vorgabe immer erfüllt, da hier der zum Zeitpunkt $t = t_B$ vorhandene Straßenzustand für alle Varianten des Unterhalts gleich ist. Durch unterschiedliche LC-Unterhaltstrategien und LC-Unterhaltsvarianten wird sich allerdings der Straßenzustand und damit auch der Substanz- bzw. Funktionalitätsgrad (Verhaltensklasse und Zustandsindizes) der Straßen über den Betrachtungszeitraum unterschiedlich entwickeln. Somit ist die Vergleichbarkeit im Endzeitpunkt zunächst nicht mehr gegeben, da unterschiedliche Substanz- und Funktionalitätsverluste der Straße vorliegen (Bild 3). Der Funktionalitätsverlust $\Delta F = f(I)$ kann durch geeignete Instandsetzungsmaßnahmen ξ und Erneuerungsmaßnahmen v wieder hergestellt werden; dabei wird teilweise auch der Substanzgrad um ΔSW bzw. der bauliche Zustandswert um ΔZ verbessert werden. Der Substanzgrad (Substanzwert) SW bzw. der bauliche Zustand Z^i_j kann z. B. am Ende der Gebrauchs-

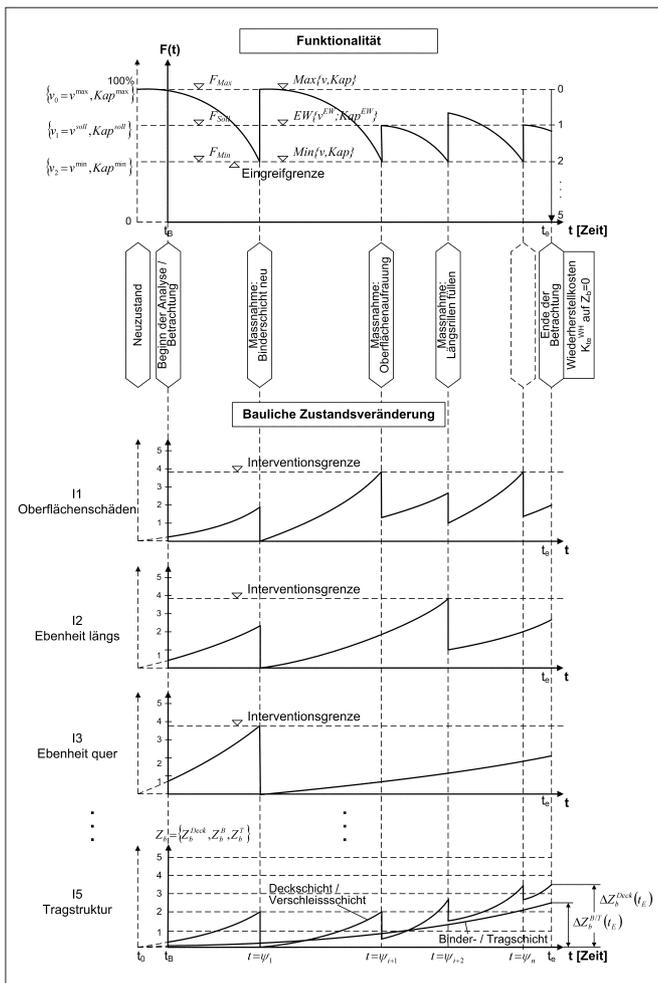


Bild 3. LC-Unterhaltsvariante χ der Unterhaltsstrategie Γ mit Maßnahmen $H_i = (\xi_i \vee v_i)$ -Wirkung auf Funktionalität und Substanzzustand
 Fig. 3. LC maintenance alternative χ of maintenance strategy Γ with measures $H_i = (\xi_i \vee v_i)$ -Effect on functionality and substance condition

tauglichkeit durch eine Erneuerungsmaßnahme v auf $SW = 100\%$ bzw. $Z_b^i = 100\%$ gebracht werden. Daher wird im Endzeitpunkt bei jeder Unterhaltsvariante der „Wertverlust“ durch eine Wiederherstellungsmaßnahme zur Erzielung des ursprünglichen Substanz- und Funktionalitätsgrads ausgeglichen. Der Substanz- bzw. Funktionalitätsverlust über den Betrachtungszeitraum für die jeweilige Straßenunterhaltsvariante entspricht somit den Kosten, die aufgebracht werden müssten, um den Anfangszustand am Ende wieder herzustellen. Er kann aus den Kosten einer entsprechenden Maßnahme zur Herstellung des Ursprungssubstanz- bzw. Ursprungsfunktionalitätsgrads bestimmt werden (Bild 3).

Wiederherstellungskosten bei der Unterhaltsvariante χ :

$$K_{t_E, \chi}^{WH} = \Delta SW^\chi \cdot K_{(100\%), \chi}^{WH} = \Delta Z_\chi^v \cdot K_{(100\%), \chi}$$

Bild 3 zeigt auf, wie sich die Funktionalität eines Straßennetzes oder Netzabschnitts durch Veränderung des Straßenzustands verschiedener Schadenseinflussfaktoren I_x verändert. Die Funktionalität (Geschwindigkeit oder Kapazität) kann durch Oberflächenschäden und/oder Ebenheitsveränderungen in gleicher Weise beeinträchtigt werden. Die Funktionalitätseinschränkungen werden durch Oberflächenveränderungen bewirkt, die Tragstruktur verändert sich dagegen bei richtiger Bemessung sehr langsam.

4.4 Budgetbeschränkung

Eine weitere Systemdimension bzw. Systemdeterminante können jährliche oder aperiodische Budgetbeschränkungen sein, die die gewählten LC-Unterhaltsstrategien Γ stark einschränken. Daraus können folgende Szenarien resultieren:

- Aufschiebung von Maßnahmen mit einhergehendem Mindernutzen für die Nutzer
- Einschränkung der Unterhaltsmaßnahmen auf bestimmte Arten, die innerhalb des Budgets realisierbar sind, mit möglichem sukzessivem Substanz- und Funktionalitätsverlust bzw. Mindernutzen

5 Systemkonfiguration des deterministischen LC-KBW-Entscheidungsmodells

Jedes vergleichende Wirtschaftlichkeitsmodell muss mittels Systemtheorie in seine räumlichen, inhaltlichen und zeitlichen Strukturen und Interaktionen gegliedert werden.

Die inhaltliche Abgrenzung gliedert sich in:

- Methode: Kosten-Barwert (KBW) auf der Basis der Vollkostenrechnung
 - Struktur: Kostenstrukturgliederung, in Anlehnung an [11]
- Die Unterscheidung der NPV- und KBW-Methode ist in [9] dargelegt. In diesem Beitrag wird die KBW-Methode auf der Basis von Kosten vorgestellt.

Das LC-KBW-Entscheidungsmodell ist unabhängig von Normen und muss sich an den Hauptkostengruppen des Unterhalts einer Infrastruktur während ihrer betrachteten Lebensphasen orientieren.

Die zeitliche Abgrenzung muss für alle untersuchten Unterhaltsvarianten χ gleich sein. Dabei ist es wichtig, die Wiederinstandsetzung am Ende des Betrachtungszeitraums t_e auf den Substanzgrad $SW = 100\%$ bzw. den baulichen Zustand $Z_b = 0$ (Bild 3) als Kosten jeder Unterhaltsvariante am Ende des Betrachtungszeitpunktes zu bewerten, unter Beachtung möglicher unterschiedlicher Lebensdauerkurven des gewählten Unterhalts.

Der Zustand des Straßennetzes zum Zeitpunkt t_B (Zeitpunkt der Strategieentwicklung bzw. Betrachtungszeitpunkt) ist für alle Unterhaltsvarianten gleich. Die Zustandentwicklung des Straßennetzes wird jedoch, je nach Unterhaltsstrategie χ mit den dazugehörigen Instandsetzungsmaßnahmen $H_i = (\xi_i \vee v_i)$, unterschiedlich verlaufen (Bild 3). Daher müssen folgende Kostengruppen bei der Beurteilung der Varianten berücksichtigt werden:

- Herstellkosten brauchen nicht berücksichtigt zu werden, da bei allen Unterhaltsvarianten der gleiche Zustand besteht.

$$K_0^H(t_0) = \{K_0^H(t_0) | K_0^H(t_0) = K_{const} \{ \text{für alle Unterhaltsstrategien } \chi \} \}$$

- Betriebskosten der Unterhaltsvariante χ , die durch die Zustandsentwicklung $I_{x_{\chi,i}}(t)$ Auswirkung auf die Funktionalität $F_\chi \{v(t); Kap(t)\}$ hat:

$$\{K_{\chi}^{Betrieb}(t)\}_\chi = \{K_{\chi,i}^{Betrieb, Betreiber}(t); K_{\chi,i}^{Betrieb, Nutzer}(t); K_{\chi,i}^{Betrieb, Dritte}(t)\}$$

- $K_{\chi}^{WH}(t_E)$ -Wiederherstellkosten auf den Neuzustand gemäß der Abnutzung, die die Unterhaltsvariante χ zum Zeitpunkt t_E erreicht hat (Bild 5).

6 Kostenansätze im LC-KBW-Entscheidungsmodell

Die Kostenströme der Unterhaltsvariante χ mit

$$\{K_{\chi,t}\} = \{K_{\chi,t}^{Betrieb,i}; K_{\chi,t}^{Inst,\xi}; K_{\chi,t}^{Ern,v}\}$$

mit: $i = \{i | i = \text{Betreiber} \vee i = \text{Nutzer} \vee i = \text{Dritte}\}$

werden unterteilt in die

- Nutzungs-, Betriebs-, Unterhalts- und Instandsetzungs- sowie Erneuerungskostenströme,
- virtuellen Erneuerungskosten am Ende des Betrachtungszeitraumes (auf den Substanzgrad = 100 %) zur inhaltlichen und zeitlichen Abgrenzung.

Die Kosten der Stakeholder, die während des Betriebs der Straße bei der Unterhaltsvariante χ anfallen, sind wie folgt:

$$K_{\chi,t}^{Betrieb,i} = K_{\chi}^{Betrieb,Betreiber}(t) + K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer}(t) + K_{\chi}^{Betrieb,Dritte}(t)$$

Die Zahlungsströme in der Nutzungs- und Betriebsphase können gemäß folgenden Hauptgruppen in Grundkosten K_0^i und erhöhte Kosten ΔK_0^i für eine Lösungsvariante χ dargestellt werden:

Periodische Kosten (Bild 2 und Bild 4):

Betreiber: $K_{\chi}^{Betrieb,Betreiber}(t) = K_0^{Betrieb,Betreiber} + \Delta K_{\chi}^{Betrieb,Betreiber}(t) \Big|_{t_{\psi_i}^{St}}^{t_{\psi_i}^E} = t(\text{Massn})$

Nutzer: $K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer}(t) = K_0^{Betrieb,Nutzer} + \Delta K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer}(t) \Big|_{t_{\psi_i}^{St}}^{t_{\psi_i}^E} = t(\text{Massn})$

Dritte: $K_{\chi}^{Betrieb,Dritte}(t) = K_0^{Betrieb,Dritte} + K_{\chi}^{Betrieb,Dritte}(t) \Big|_{t_{\psi_i}^{St}}^{t_{\psi_i}^E} = t(\text{Massn})$

Die Kosten der Stakeholder werden wie folgt weiter untergliedert:

Betreiber: $K_{\chi}^{Betrieb,Betreiber}(t) = \sum_{\kappa} k_{\kappa}^{Betrieb,Flick}(t) \cdot A_{\kappa}$

Nutzer: $K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer}(t) = K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer,Zeit} + K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer,Fahrz} + K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer,Unf}$

Dritte: $K_{\chi}^{Betrieb,Dritte}(t) = K_{\chi}^{Betrieb,Dritte,Umw} + K_{\chi}^{Betrieb,Dritte,Unf}$

Beim Vergleich von Unterhaltsvarianten χ hinsichtlich minimaler Kosten wird das ökonomische Minimalprinzip angewendet. Daher werden die Grundkosten K_0^i , die dem Betreiber, Nutzer und Dritten im normalen Betrieb bei allen Unterhaltsvarianten entstehen, nicht berücksichtigt (Bild 4).

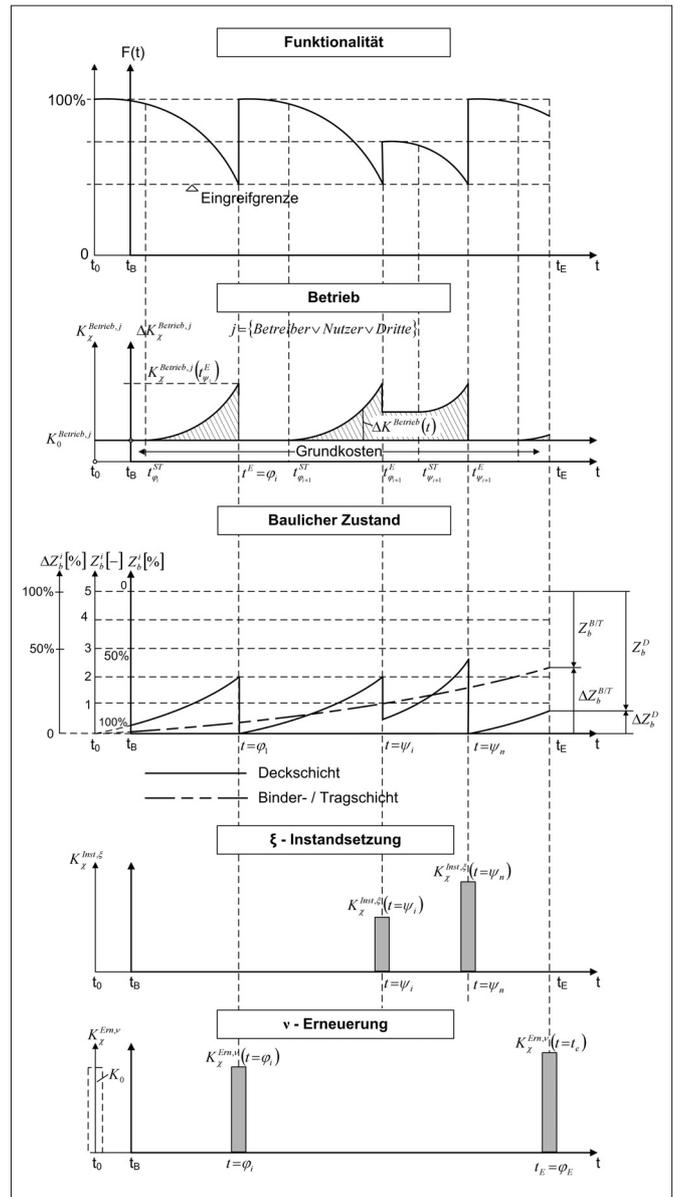


Bild 4. LC-Unterhaltsvariante χ der LC-Unterhaltsstrategie Γ – Funktionalitäts- und bauliche Zustandsentwicklung sowie Instandsetzungs- und Erneuerungskosten

Fig. 4. Maintenance strategy χ – Progress in functionality and structural condition, and repair and renewal costs

Diese sind bei allen Unterhaltsvarianten gleich, da hier die Funktionalität den normalen Betriebsparametern mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von $P(w) \geq \alpha$ (z.B. 95 %) entspricht.

In der Entscheidungs- und Vergleichsanalyse werden nur die erhöhten $\Delta K_{\chi}^i(t)$ -Betriebskosten berücksichtigt, die oberhalb der Grundkosten $K_0^{Betrieb,i}$ mit $i = (\text{Betreiber}, \text{Nutzer}, \text{Dritte})$ des normalen Betriebs liegen.

Die erhöhten Betriebskosten $\Delta K_{\chi}^i(t)$ für die berücksichtigten Stakeholder beginnen zum Zeitpunkt $t_{\psi_i}^{St}$ der erhöhten Unterhaltsmaßnahmen gegenüber dem Neuzustand (Bild 2 und Bild 4) und enden nach Fertigstellung $t_{\psi_i}^E$ der Maßnahme $m_i^x(\Delta Ix_{Min}^i)$. Man geht von der Vereinfachung aus, dass die Wirkung auf die Nutzer und Dritte zum gleichen Zeitpunkt beginnt, obwohl diese Wirkung in der Regel später, zeitversetzt beginnt (Bild 2). Die erhöhten Betriebskosten setzen sich wie folgt zusammen:

Periodische Zusatzkosten $\Delta K_{\chi}^i(t)$, die bei Veränderung des Straßenzustands über eine definierte Grenzgröße der Grundkosten $K_{0,\chi}^i(t)$ hinausgehen (Bild 4):

$$\Delta K_{\chi}^{Betrieb,i}(t) = \Delta K_{\chi}^{Betrieb,Betreiber}(t) + \Delta K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer}(t) + \Delta K_{\chi}^{Betrieb,Dritte}(t)$$

Erhöhte Betreiberunterhaltskosten:

$$\Delta K_{\chi}^{Betrieb,Betreiber}(t) \Big|_{t_{\psi_i}^{St}}^{t_{\psi_i}^E} = \sum_{\kappa} \Delta K_{\chi,\kappa}^{Betrieb,Flick} \cdot A_{\chi,\kappa} \Big|_{t_{\psi_i}^{St}}^{t_{\psi_i}^E}$$

Erhöhte Nutzerkosten:

$$\Delta K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer}(t) \Big|_{t_{\psi_i}^{St}}^{t_{\psi_i}^E} = \left\{ \Delta K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer,Zeit}(t) + \Delta K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer,Fahrz} + \Delta K_{\chi}^{Betrieb,Nutzer,Unf} \right\} \Big|_{t_{\psi_i}^{St}}^{t_{\psi_i}^E}$$

Erhöhte Kosten der direkt betroffenen Umwelt (Dritte):

$$\Delta K_{\chi}^{Betrieb,Dritte}(t) \Big|_{t_{\psi_i}^{St}}^{t_{\psi_i}^E} = \left\{ \Delta K_{\chi}^{Betrieb,Dritte,Umw}(t) + \Delta K_{\chi}^{Betrieb,Dritte,Unf} \right\} \Big|_{t_{\psi_i}^{St}}^{t_{\psi_i}^E}$$

$$i = \{i | i = \text{Betreiber} \vee i = \text{Nutzer} \vee i = \text{Dritte}\}$$

Aperiodische Kosten (Bild 4) der Unterhaltsstrategie χ :

$K_{\chi}^{Inst,\xi}(t = \psi_i)$: Instandsetzung der Deckschicht durch Maßnahme ξ

$K_{\chi}^{Ern,v}(t = \varphi_i)$: Erneuerung der Deckschicht ($v = D$)

$K_{\chi}^{Ern,v}(t = \varphi_i)$: Erneuerung der Deck- und Binderschicht ($v = D/B$)

Diese Kosten der Maßnahmen setzen sich in der Regel aus den Anteilen

- Abriss und Entsorgung sowie
 - Herstellung
- zusammen.

Aperiodische Kosten der Instandsetzungsmaßnahme ξ zum Zeitpunkt t_{ψ_i} (Bild 4):

$$K_{\chi,\psi_i}^{Inst,\xi} = \left\{ K_{\chi}^{Inst,Betreiber,\xi} + K_{\chi}^{Inst,Nutzer,\xi} + K_{\chi}^{Inst,Dritte,\xi} \right\} \Big|_{t=t_{\psi_i}}$$

$$K_{\chi,\psi_i}^{Inst,\xi} = \sum_{i=1}^3 K_{\chi,\psi_i}^{Inst,i,\xi}$$

Aperiodische Erneuerungsmaßnahme v (Bild 4 und Bild 5):

$$K_{\chi,\varphi_i}^{Ern,v} = \left\{ K_{\chi}^{Ern,Betreiber,v} + K_{\chi}^{Ern,Nutzer,v} + K_{\chi}^{Ern,Dritte,v} \right\} \Big|_{t=t_{\varphi_i}}$$

$$K_{\chi,\varphi_i}^{Ern,v} = \sum_{i=1}^3 K_{\chi,\varphi_i}^{Ern,i,v}$$

Der Erneuerungsanteil am Ende des Analysezeitraums errechnet sich aus der Wiederherstellung des gesamten Oberbaus der Straße (Deck-/Binder-/Tragschicht). Die Wiederherstellungskosten am Ende des Analysezeitraums setzen sich aus

- K^{Abr} – Abriss und Entsorgung sowie
 - K^{Neu} – Wiederherstellung in den Ursprungszustand
- zusammen. Jedoch wird der substanzielle Zustand des Straßenkörpers/Oberbaus berücksichtigt. Der Verlust des baulichen Zustands ΔZ_b^k mit $k = \{k | k = \text{Deckschicht} \vee k = \text{Deck} + \text{Binderschicht} \vee k = \text{Deck} + \text{Binder} + \text{Tragschicht}\}$ wird dabei gemäß der faktoriellen Zustandsskala $Z_b^k = \{1, \dots, 5\}$ der Bausubstanz abgeschätzt.

Dabei müssen zwei Fälle berücksichtigt werden (Bild 4):

Fall 1:

Deckschicht schlechter als Binder- und Tragschicht mit

$$Z^D(t_E) < Z^{B/T}(t_E) \text{ folgt } \Delta Z^D > \Delta Z^{B/T} [\%]$$

Fall 2:

Deckschicht besser als Binder- und Tragschicht mit

$$Z^D(t_E) > Z^{B/T}(t_E) \text{ folgt } \Delta Z^D < \Delta Z^{B/T} [\%]$$

Zur Differenzierung der Unterhaltsvarianten χ muss der Zustand, aber auch die Wiederherstellung von Deck-, Binder- und Tragschicht berücksichtigt werden. Daher kann man zwei Fälle unterscheiden:

1. Binder- und Tragschicht altern substanziell bei allen Unterhaltsvarianten χ gleich ($\Delta Z_{\chi_i}^{B/T} = \Delta Z_{\chi_{i+1}}^{B/T}$ für alle $0 \leq \chi_i \leq n$). Dann wird nur der Erneuerungsanteil der Deckschicht in der Analyse berücksichtigt $K^{Ern}(t_E) = (K_0^{D,Abr} + K_0^{D,Neu}) \cdot \Delta Z^D(t_E)$.
2. Binder- und Tragschicht altern substanziell bei allen Unterhaltsvarianten χ unterschiedlich ($\Delta Z_{\chi_i}^{B/T} \neq \Delta Z_{\chi_{i+1}}^{B/T}$ für alle $0 \leq \chi_i \leq n$). Dann wird der Erneuerungsanteil von Deck- und Binder- sowie Tragschicht berücksichtigt:

- a. differenziert nach Zustand

$$K^{Ern}(t_E) = (K_0^{D,Abr} + K_0^{D,Neu}) \cdot \Delta Z^D + (K_0^{B/T,Abr} + K_0^{B/T,Neu}) \cdot \Delta Z^{B/T}$$

Diese Differenzierung ist relativ schwierig, da bei Erneuerung der Binder- und Tragschicht auch die Deckschicht abgerissen/ausgebaut werden muss.

- b. Da allerdings bei Erreichen der Tragfähigkeitsgrenze der Binder- und Tragschicht bei einer Erneuerung auch die Deckschicht entfernt und erneuert werden muss, kann man auch folgende Erneuerungskosten ansetzen:

$$K^{Ern}(t_E) = (K_0^{D/B/T,Abr} + K_0^{D/B/T,Neu}) \cdot \Delta Z^{B/T}$$

Der Kosten-Barwert der Unterhaltsvariante χ mit den Instandsetzungsmaßnahmen ψ_k und Erneuerungsmaßnahmen φ_l über den Betrachtungszeitraum $t = n$ bezogen auf den Betrachtungszeitpunkt t_B beträgt:

$$KBW_{\chi,t_B} = \sum_{t=1}^n K_{\chi,t} \frac{1}{(1+q)^{(t_B-t)}}$$

$$KBW_{\chi,t_B} = \sum_{t=t_B}^n \frac{1}{(1+q_{\text{Betreiber}})^{(t-t_B)}} \cdot \Delta K_{\chi,t}^{\text{Betreiber, Unterh}} +$$

$$+ \frac{1}{(1+q_{\text{Nutzer}})^{(t-t_B)}} \cdot \Delta K_{\chi,t}^{\text{Nutzer}} \frac{1}{(1+q_{\text{Dritte}})^{(t-t_B)}} \cdot \Delta K_{\chi,t}^{\text{Dritte}} +$$

$$+ \sum_{t=t_B}^n \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}}$$

$$\left[\sum_{j=1}^{m_1} \left\{ K_{\chi,t,j}^{\text{Inst},\xi}(t) \middle| K_{\chi,t,j}^{\text{Inst},\xi} = K_{\chi,\psi_k,j}^{\text{Inst},\xi} \text{ für } t = \{\psi_k\} = \right. \right.$$

$$= (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{m_2}) \text{ mit } m_2 \leq n \vee K_{\chi,t}^{\text{Inst},\xi} = 0 \text{ für } t \neq \{\psi_k\} \left. \right\} +$$

$$+ \sum_{j=1}^{m_3} \left\{ K_{\chi,t,j}^{\text{Ern},v} \middle| K_{\chi,t,j}^{\text{Ern},v} = K_{\chi,\varphi_l,j}^{\text{Ern},v} \text{ für } t = \{\varphi_l\} = \right.$$

$$= (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{m_4}) \text{ mit } m_4 \leq n \vee K_{\chi,t}^{\text{Ern},v} = 0 \text{ für } t \neq \{\varphi_l\} \left. \right\} \left. \right]$$

Jedes Bauelement v der Straße (Deck-/Binder-/Tragschicht) und deren Lebenszykluskurven können weiter untergliedert werden:

- $v = \{v \mid v = v_D - \text{Deckschicht}$
- $\vee v = v_{D/B} - \text{Deck- und Binderschicht}$
- $\vee v = v_{D/B/T} - \text{Deck- und Binder- und Tragschicht}$
- $(\xi \vee v) = \text{Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsmaßnahme nach Katalog [13]}$
- ψ_k, φ_l Jahre, in denen Instandsetzungen und Erneuerungen stattfinden (aperiodisch)
- j Anzahl der Instandsetzungen und Erneuerungen, die in dem jeweiligen Jahr (ψ_k, φ_l) anfallen

Das Kosten-Barwert-Entscheidungsaxiom zwischen m Unterhaltsvarianten χ lautet nach dem ökonomischen Minimalprinzip:

$$KBW_{t_B}^{\min} = \text{Min} \left(KBW_{\chi} \right)_{\chi=1}^{\chi=m} \text{ mit } (1 \leq \chi \leq m)$$

7 Zusatzkosten bei Verschiebung von Maßnahmen ξ oder Erneuerungen v bei einer Referenzstrategie χ_0

Bei Verschiebung von Maßnahmen des Unterhaltsprogramms vor oder nach der für die Referenz-Unterhaltsstrategie χ_0 festgelegten Eingreifgrenze $F^{\text{Grenz}}(t)$ erhöhen oder verringern sich die Betriebs- bzw. Nutzungskosten bzw. die Kosten Dritter. Die Terme für diese Zusatzkosten werden wie folgt definiert (Bild 5):

$$\pm \Delta K_{\chi}^{\text{Zu, Betrieb, } i}(t) = \pm \Delta K_{\chi}^{\text{Zu, Betrieb, Betreiber}} \pm$$

$$\pm \Delta K_{\chi}^{\text{Zu, Betrieb, Nutzer}} \pm \Delta K_{\chi}^{\text{Zu, Betrieb, Dritte}}$$

Diese Terme sind inhaltlich identisch mit den periodischen Zusatzkosten vor der Eingreifgrenze. Jedoch soll die Differenz an Betriebskosten hervorgehoben werden, die durch Vorziehen der Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen vor die Eingreifgrenze die Kosten verringert bzw. bei Aufschieben der Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen über die Eingreifgrenze die Kosten wesentlich erhöht.

Dabei ist zu beachten, dass eine Abänderung der Strategie z.B. andere Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen erfordert. Diese Abänderung kann somit eine Kostenänderung z.B. durch eine erforderliche umfang-

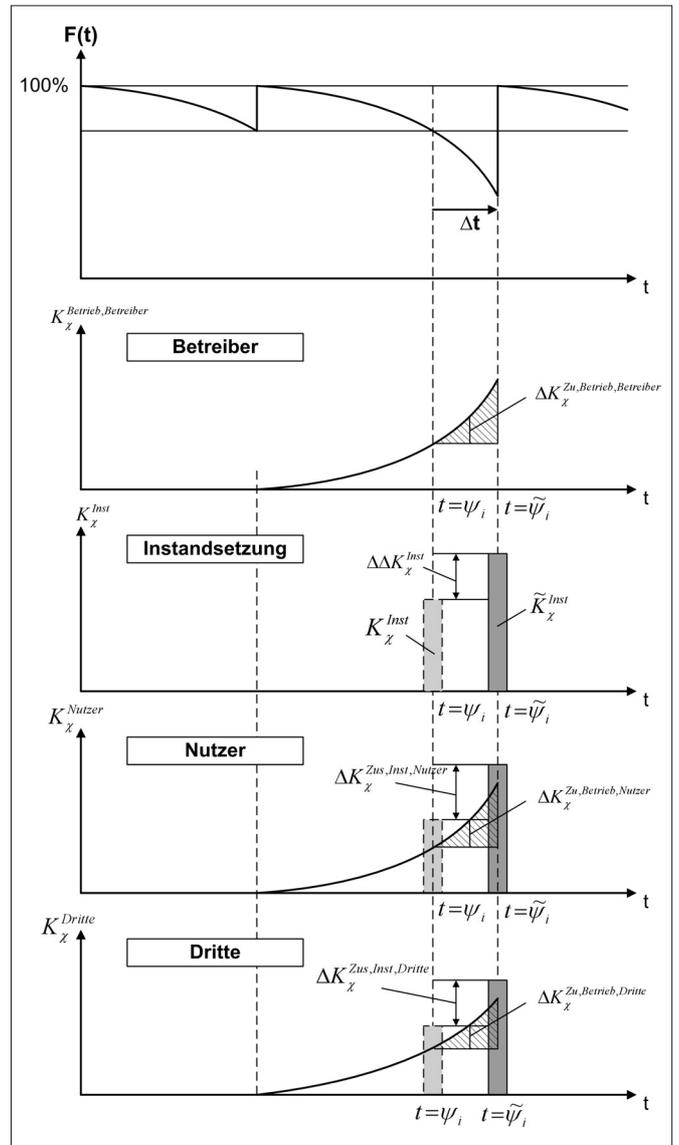


Bild 5. Zusatzkosten – Aufschieben von Instandhaltungsmassnahmen ξ der Unterhaltsstrategie Γ bzw. des Unterhaltungsprogramms χ
 Fig. 5. Postponement of maintenance measures ξ of the maintenance strategy Γ resp. preservation program χ

reichere Instandsetzungsmaßnahme bei Überschreiten der Eingreifgrenze bedingen (Bild 5).

$$\Delta \Delta K_{\chi}^{\text{Inst},\xi} = f(\xi_{\chi} - \text{Maßnahme} - \xi_{\text{Aufschieb}} - \text{Maßnahme})$$

$$\Delta \Delta K_{\chi}^{\text{Ern},v} = f(v_{\chi} - \text{Maßnahme} - v_{\text{Aufschieb}} - \text{Maßnahme})$$

Die Analyse der Zusatzkosten bei Vorziehen oder Aufschieben von geplanten Instandsetzungsmaßnahmen ξ oder Erneuerung v der gewählten LC-Unterhaltsstrategie Γ wird mittels Kosten-Barwert-Differenz-Axiom hinsichtlich der kostenmäßigen Auswirkung wie folgt analysiert:

$$\Delta KBW - U_{\chi} \Big|_{t_B} = KBW - U_{\chi} \Big|_{t_B} - KBW - \tilde{U}_{\chi} \Big|_{t_B}$$

Damit wird es möglich, systembedingte oder politisch bedingte Gründe zur Verschiebung von Unterhaltsmaßnahmen finanztechnisch zu bewerten.

8 Diskontierung und Teuerungsindex

Bei der Ermittlung des Kosten-Barwerts unterscheidet Girmscheid [10] zwischen Diskontierungssatz und Teuerungsindizes. Im Regelfall sind nur die heutigen Preise und Kosten für Löhne, Materialien etc. bekannt. Deswegen müssen die heutigen Preise und Kosten für Leistungen entsprechend den zu erwartenden Preis-, Lohn-, Material- bzw. Produktkostensteigerungen hochgezinst werden mit:

$$\begin{aligned} (\underline{\mu I}) &= \{PI = \text{Preisindex} \wedge LI = \text{Lohnindex} \wedge \\ &\wedge MI = \text{Materialindex} \wedge \dots\} \end{aligned}$$

Die Ausgaben und Einnahmen bzw. Kosten werden auf den heutigen Geldwert auf der Basis der Geldwertentwicklung mittels Diskontierungssatz $q = (\text{Nominalzins}; \text{Risikozins})$ abgezinst.

Somit können die Kosten der Zukunft durch Hochzinsung auf die jeweiligen Kostenzeitpunkte t , an denen die Kosten anfallen, auf den heutigen Preisen aufgebaut werden:

$$\left(\underline{K}_{\chi,t}^i\right) = \left(\underline{K}_{\chi,0}^i(1 + \underline{\mu I})^{t-t_B}\right)$$

9 Probabilistisches LC-KBW-Entscheidungsmodell

Die Kosten werden zum Zeitpunkt t_B bzw. t_0 nur in Bandbreiten prognostizierbar sein. Daher ist das LC-KBW-Entscheidungsmodell besonders geeignet für eine stochastische Berechnung bzw. für eine Simulationsrechnung mittels Monte-Carlo-Simulation (MCS).

Mit Unterstützung der MCS lassen sich die möglichen Varianten und Kombinationen von Ereignissen betrachten. Im Regelfall treten bei Kosten weder nur die maximalen noch die minimalen Werte auf, jedoch die Kosten selbst treten immer auf (jährlich/einmalig). Solche Simulationen werden mit der MCS durchgeführt [15], die die Nachbildung einer empirischen Datenbasis ermöglicht, jedoch erfordert dies eine große Anzahl von Zufallsereignissen (z. B. 10000). Ziel der MCS ist deshalb die Durchführung einer großen Anzahl von Simulationsdurchläufen, wobei jeder Simulationsdurchlauf einer Kombination möglicher Zufallsereignisse entspricht.

Für eine solche Simulation bzw. stochastische Berechnung müssen die Ansätze für:

- die Kosten der Stakeholder,
- die Teuerungsfaktoren und
- den Realzins/die Diskontierung

in probabilistischen Bandbreiten ermittelt werden, z. B. aus Erfahrungswerten bzw. Datenbanken der Stakeholder.

Diese Einflussgrößen, die nur in Bandbreiten vorliegen, werden mangels genauer bzw. statistisch abgesicherter Ist-Daten mittels probabilistischer

- Dreiecksdichtefunktion bzw.
- Beta PERT-Dichtefunktion

bezüglich der Auftretensausprägung artikuliert.

Für die Kostenbandbreiten, die Teuerungsfaktoren und den Diskontierungssatz können normierte Dreiecks- oder Beta-PERT-Dichtefunktionen mit $A = 1$ wie folgt angenommen werden:

$$f(\Delta K_{\chi,0}^i) = \Xi(\Delta K_{\chi,0,\min}^i, \Delta K_{\chi,0,EW}^i, \Delta K_{\chi,0,\max}^i) -$$

Unterhalt laufend + aperiodisch, mit:

$$i = \{i = \text{Betreiber} \vee i = \text{Nutzer} \vee i = \text{Dritte}\}$$

$$f(K_{\chi,0,j}^H) = \Xi(K_{\chi,0,j,\min}^H, K_{\chi,0,j,EW}^H, K_{\chi,0,j,\max}^H) -$$

Instandsetzung ξ oder Erneuerung v ,

$$\text{mit: } H = \{H|H = \xi \vee H = v\}$$

$$f(K_{\chi,0}^{WH}) = \Xi(K_{\chi,0,\min}^{WH}, K_{\chi,0,EW}^{WH}, K_{\chi,0,\max}^{WH}) -$$

Wiederherstellung am Ende der Betrachtungszeit,

$$\text{mit: } WH = \text{Ern}(t_E)$$

$$f(\underline{\mu I}) = \Xi(\underline{\mu I}_{\min}, \underline{\mu I}_{EW}, \underline{\mu I}_{\max}) - \text{Teuerungsfaktoren}$$

$$f(q) = \Xi(q_{\min}, q_{EW}, q_{\max}) - \text{Diskontierungssatz}$$

mit: $\Xi = \{\Xi = \text{Dreiecksdichtefunktion} \vee \Xi = \text{BetaPERT-Dichtefunktion}\}$

Die dazugehörige Verteilungsfunktion:

$$F(\Delta K_{\chi,0}^i) = \int_{K_{\chi,0,\min}^i}^{K_{\chi,0,\max}^i} f(\Delta K_{\chi,0}^i) d\Delta K_{\chi,0}^i$$

$$F(K_{\chi,0,j}^H) = \int_{K_{\chi,0,\min}^H}^{K_{\chi,0,\max}^H} f(K_{\chi,0,j}^H) dK_{\chi,0,j}^H$$

$$F(K_{\chi,0}^{WH}) = \int_{K_{\chi,0,\min}^{WH}}^{K_{\chi,0,\max}^{WH}} f(K_{\chi,0}^{WH}) dK_{\chi,0}^{WH}$$

Die Berechnung der Erwartungswerte für die Kosten wird aus der Gleichgewichtsbetrachtung der Dichtefunktion um den Nullpunkt wie folgt vorgenommen:

Für die Dichtefunktion ergibt sich der Erwartungswert der Kosten i:

$$\Delta K_{\chi,0,EW}^i = \int_{K_{\chi,0,\min}^i}^{K_{\chi,0,\max}^i} \Delta K_{\chi,0}^i * f(\Delta K_{\chi,0}^i) d\Delta K_{\chi,0}^i$$

Die Varianz der Ausgabe i:

$$\sigma_{K_{\chi,0}^i}^2 = \int_{K_{\chi,0,\min}^i}^{K_{\chi,0,\max}^i} (\Delta K_{\chi,0}^i - \Delta K_{\chi,0,EW}^i)^2 * f(\Delta K_{\chi,0}^i) d\Delta K_{\chi,0}^i$$

Analog wird der Erwartungswert für die Kosten der Instandsetzung ξ und Erneuerung v ($H = (\xi \vee v)$) bzw. für die Wiederherstellung ($WH = \text{Ern} = v$) am Ende t_e über die Erwartungswerte für Teuerung und Diskontierung sowie die dazugehörige Varianz ermittelt.

Die Simulation mittels MCS bildet einzelne Szenarien in jedem Rechenablauf ab. In jedem Rechenablauf bzw. gebildetem Szenarium werden für alle Kosten sowie die dazugehörigen Teuerungsindizes und den Diskontierungssatz je eine Zufallszahl generiert (siehe hierzu Girmscheid [10]):

$$\left(Z_{X_{\varepsilon,\chi}} \right)_{\delta} = \left\{ Z_{\Delta K_{\chi,0}^i}; Z_{K_{\chi,0,j}^H}; Z_{K_{\chi,0}^{WH}}; Z_{\mu I_0}; Z_{q_0} \right\}_{\delta}$$

mit $0 \leq Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} \leq 1$

Diese Zufallszahlen bestimmen aus der jeweiligen Verteilungsfunktion der Einflussgrößen bzw. Zielgröße einen generativen Wert für jeden der beteiligten Terme in der jeweiligen Simulation δ :

$$\left(X_{\varepsilon,\chi} \right)_{\delta} = \left(\Delta K_{\chi,0}^i; K_{\chi,0,j}^H; K_{\chi,0}^{WH}; \mu I; q \right)_{\delta}$$

364

In jedem Simulationslauf δ wird für jede Einflussgröße $\{X_{\varepsilon,\chi}\}_{\delta}$ je eine Zufallszahl $\{Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}}\}$ generiert. Die mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators ermittelten Zufallszahlen $\{Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}}\}$ liegen im Intervall $(0 \leq Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} \leq 1)$.

Dies entspricht dem Wert der Verteilungsfunktion $F(X_{\varepsilon,\chi,\delta})$ der jeweiligen Einflussgröße $\{X_{\varepsilon,\chi,\delta}\}$.

Die Auswahl der Einflussgröße $\{X_{\varepsilon,\chi,\delta}\}$ über eine Zufallszahl $\{Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}}\}$ erfolgt anhand der Umkehrfunktion $G(F(X_{\varepsilon,\chi,\delta})) = \{X_{\varepsilon,\chi,\delta}\}$ (siehe hierzu Girmscheid [10]).

Somit gilt für die Verteilungsfunktion:

$$Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} = F(X_{\varepsilon,\chi,\delta})$$

für die Umkehrfunktion:

$$G(F(X_{\varepsilon,\chi,\delta})) = G(Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}}) = \{X_{\varepsilon,\chi,\delta}\}$$

$$Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} = \left\{ Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} \in R \mid (0 \leq Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} \leq 1) \right\}$$

Somit ergeben sich die Einflussgrößen im Simulationslauf δ wie folgt:

Kosten:

$$\Delta K_{\chi,0,\delta}^i = \left\{ \Delta K_{\chi,0}^i \mid \Delta K_{\chi,0}^i = G\left(Z_{K_{\chi,0}^i} \right) \right\}$$

$$\text{mit } Z_{\Delta K_{\chi,0}^i} = \left\{ Z_{\Delta K_{\chi,0}^i} \in R \mid (0 \leq Z_{\Delta K_{\chi,0}^i} \leq 1) \right\}_{\delta}$$

$$K_{\chi,0,j,\delta}^H = \left\{ K_{\chi,0,j}^H \mid K_{\chi,0,j}^H = G\left(Z_{K_{\chi,0,j}^H} \right) \right\}$$

$$\text{mit } Z_{K_{\chi,0,j}^H} = \left\{ Z_{K_{\chi,0,j}^H} \in R \mid (0 \leq Z_{K_{\chi,0,j}^H} \leq 1) \right\}_{\delta}$$

$$K_{\chi,0,\delta}^{WH} = \left\{ K_{\chi,0}^{WH} \mid K_{\chi,0}^{WH} = G\left(Z_{K_{\chi,0}^{WH}} \right) \right\}$$

$$\text{mit } Z_{K_{\chi,0}^{WH}} = \left\{ Z_{K_{\chi,0}^{WH}} \in R \mid (0 \leq Z_{K_{\chi,0}^{WH}} \leq 1) \right\}_{\delta}$$

Teuerungszindizes:

$$\mu I_{\delta} = \left\{ \mu I \mid \mu I = G\left(Z_{\mu I} \right) \text{ mit } Z_{\mu I} = \left\{ Z_{\mu I} \in R \mid (0 \leq Z_{\mu I} \leq 1) \right\}_{\delta} \right\}$$

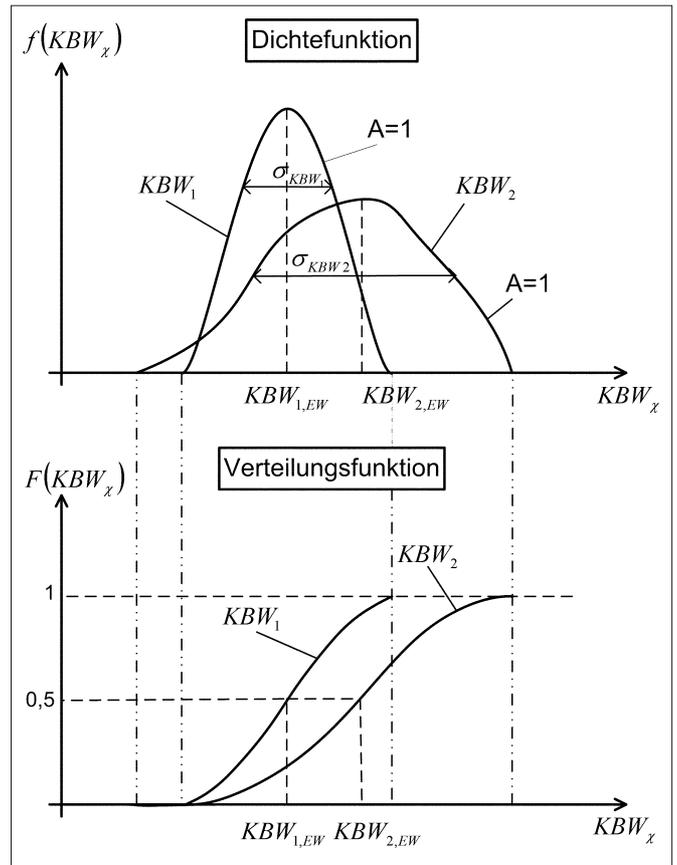


Bild 6. KBW-Dichte- und Verteilungsfunktion für zwei alternative Unterhaltsvarianten

Fig. 6. CCV density and distribution function for two alternative approaches to maintenance

Diskontierung:

$$q_{\delta} = \left\{ q \mid q = G\left(Z_q \right) \text{ mit } Z_q = \left\{ Z_q \in R \mid (0 \leq Z_q \leq 1) \right\}_{\delta} \right\}$$

Die Zahlungsströme $K_{\chi,0}$ ergeben sich aus:

$$K_{\chi,t} = K_{\chi,0} * (1 + \mu I)^{t-t_B} \text{ für } K_{\chi,0} = \left\{ K_{\chi,0} \mid K_{\chi,0} = \Delta K_{\chi,0}^i \vee K_{\chi,0} = K_{\chi,0,j}^H \vee K_{\chi,0} = K_{\chi,0}^{WH} \right\}$$

Das heißt, $K_{\chi,0}$ enthält die gleichen Terme wie $K_{\chi,t}$, jedoch bezogen auf den heutigen Zeitwert t_0 oder t_B .

Kosten-Barwert im Simulationslauf δ (Bild 6):

$$KBW_{\chi,t_B,\delta} = \left(K_{\chi,0} \right)_{\delta} * \left[\frac{(1 + \mu I_{\delta})^{(t-t_B)}}{1 + q_{\delta}} \right]$$

Dichtefunktion des Kosten-Barwerts (Bild 6):

$$f(KBW_{\chi,t_B,\delta}) = f\left(KBW_{\chi,t_B,EW}; \sigma_{\chi,t_B}^2 \right)_{\delta \leq \infty}$$

Verteilungsfunktion des Kosten-Barwerts :

$$F(KBW_{\chi,t_B,\delta}) = \int_{KBW_{\chi,t_B,\min}}^{KBW_{\chi,t_B,\max}} f\left(KBW_{\chi,t_B,EW}; \sigma_{\chi,t_B}^2 \right) dKBW_{\chi,t_B} \Big|_{\delta \leq \infty}$$

Die Ermittlung des Kosten-Barwert-Erwartungswertes, der Varianz sowie der Standardabweichungen erfolgt mittels des zentralen Grenzwertsatzes der Stochastik. Der Erwartungswert KBW_{χ} der baulichen Lösung ergibt sich aus (Bild 6):

$$KBW_{\chi,t_B,EW} = \int_{KBW_{\chi,t,\min}}^{KBW_{\chi,t,\max}} KBW_{\chi,t_B} * f(KBW_{\chi,t_B}) dKBW_{\chi,t_B}$$

Das Kosten-Barwert-Entscheidungsaxiom bildet auch bei der probabilistischen LC-KBW-Analyse die Basis für die Wahl der wirtschaftlichsten LC-Unterhaltsvariante χ der Unterhaltsstrategie Γ aus dem Spektrum der Alternativen ($1 \leq \chi \leq m$).

$$KBW_{\chi_0,t_B}^{\min} = \text{Min} (KBW_{\chi,t_B})_{\chi=1}^{\chi=m}$$

Bei der probabilistischen Betrachtung der Entscheidung für die Unterhaltsvariante steht nicht nur eine Entscheidungsgröße $KBW_{\chi,EW}$ (Erwartungswert $P = 50\%$) zur Verfügung, sondern die Varianz/Streubreite sowie die gesamte Verteilung möglicher Ereignisse aufgrund der Varianz der Eingangsgrößen.

Aus Bild 6 kann man folgende Analyse für Unterhaltsvarianten durchführen:

$$KBW_{2,EW} > KBW_{1,EW}$$

$KBW_{1,EW}$: wird bei Alternative $\chi = 1$ mit $P_W = 50\%$ Sicherheit erreicht, wird bei Alternative $\chi = 2$ mit $P_W = 20\%$ Sicherheit erreicht

$KBW_{1,\max}$: wird bei Alternative $\chi = 1$ nur noch mit einer Sicherheit von $P_W = 100\%$ erreicht, wird bei Alternative $\chi = 2$ jedoch nur mit einer Sicherheit von $P_W = 70\%$ erreicht

Aufgrund dieser probabilistischen Ergebnisse können Entscheidungen auf unsicheren Eingangsgrößen „sicherer“ gefällt werden, da man die Auswirkungen von Änderungen auf das Ergebnis mit den Wahrscheinlichkeiten interpretieren kann.

10 Fazit/Ausblick

Das vorgestellte LC-KBW-StraUnt-Modell mit den integrativen Teilmodellen:

1. Bildung von LC-Unterhaltsstrategien und LC-Unterhaltsvarianten sowie
2. LCC-Entscheidungsmodell zur Bestimmung der ökonomischsten LC-Unterhaltsvariante

ermöglicht es, die Auswirkungen von Entscheidungen im Straßenunterhalt monetär zu bewerten. Die Betrachtung erfolgt lebenszyklusorientiert und stützt sich auf wahrscheinlichkeitsverteilte Parameter.

Dem Entscheidungsträger eröffnet sich damit die Möglichkeit, die Konsequenzen seiner Entscheidungen in einem frühen Planungsstadium zu prüfen und somit ein Optimum bezüglich der Bereitstellung einer möglichst guten Infrastruktur bei möglichst geringen Kosten zu finden.

Formelzeichen

Γ	Unterhaltsstrategie
U_{χ}	Vektor der Unterhaltsvariante χ
V	Verkehrsaufkommen/Verkehrsvolumen
I_x	Zustandsindex x ($x = 1, 2, 3, 4, 5$)
$KBW(U_i)$	Kosten-Barwert der Unterhaltsvariante i
$\Delta KBW(U^{min})$	Zusatzkosten im Vergleich zur optimalen Unterhaltsvariante
\tilde{U}_{χ}	Von der optimalen Unterhaltsvariante abweichende Unterhaltsvariante
ξ	Instandsetzungsmaßnahme
v	Erneuerungsmaßnahme
$K_{\chi}^{Betrieb}$	Betriebskosten durch erhöhten Unterhalt
$K_{\chi}^{\xi,i}$	Kosten der Instandsetzungsmaßnahme i
$K_{\chi}^{v,i}$	Kosten der Erneuerungsmaßnahme i
ΔK_{χ}^{Nutzer}	Erhöhte Nutzerkosten durch schlechten Zustand
$\Delta K_{\chi}^{Nutzer,\xi}$	Erhöhte Nutzerkosten durch eine Instandsetzungsmaßnahme
$\Delta K_{\chi}^{Nutzer,v}$	Erhöhte Nutzerkosten durch eine Erneuerungsmaßnahme
ΔK_{χ}^{Dritte}	Erhöhte Kosten Dritter durch schlechten Zustand
$\Delta K_{\chi}^{Dritte,\xi}$	Erhöhte Kosten Dritter durch eine Instandsetzungsmaßnahme
$\Delta K_{\chi}^{Dritte,v}$	Erhöhte Kosten Dritter durch eine Erneuerungsmaßnahme
K^M	Kosten von Unterhaltsmaßnahmen
ΔK	Kosten durch erhöhten Unterhaltsaufwand
K_0	Kosten des normalen betrieblichen Unterhalts
t_e	Endzeitpunkt der Betrachtung
t_B	Bezugszeitpunkt
ΔF	Funktionalitätsveränderung
ΔSW	Veränderung des Substanzgrads
ΔZ	Veränderung des baulichen Zustands-werts
SW	Substanzgrad
Z_b^i	Baulicher Zustand
ΔI_x	Veränderung des Zustandsindex x
$M\psi_i$	Maßnahme ψ_i
$t\psi_i$	Zeitpunkt der Instandsetzungsmaßnahme ψ_i
$t\phi_i$	Zeitpunkt der Erneuerungsmaßnahme ϕ_i
v_i	Geschwindigkeitsgrenzwerte i mit: $i = \{i = \text{Zulässig} \vee i = \text{Design} \vee i = \text{Max} \vee i = \text{Min} \vee i = \text{Soll} = \text{EW}\}$
Kap_i	Kapazität = Verkehrsvolumen i mit: $i = \{i = \text{Zulässig} \vee i = \text{Design} \vee i = \text{Max} \vee i = \text{Min} \vee i = \text{Soll} = \text{EW}\}$
α_{Grenz}	Grenzfaktor der Einschränkung des Verkehrsvolumens bzw. der Kapazität
α_V	Grenzfaktor der Einschränkung des Verkehrsvolumens
α_K	Grenzfaktor der Einschränkung der Kapazität
$SW_{t_e}^i$	Restsubstanzwert der Unterhaltsvariante i zum Zeitpunkt t_e
ΔSW^i	Substanzgradverlust der Unterhaltsvariante i
$K_{t_E}^{WH}$	Wiederherstellungskosten zum Zeitpunkt t_E
$K_{(100\%)}^{WH}$	Kosten einer vollständigen Wiederherstellung

Z_b^{Deck}	Baulicher Zustand der Deckschicht
$Z_b^{B/T}$	Baulicher Zustand der Binder- und Tragschicht
K_0^H	Herstellkosten der Straße
F_χ	Funktionalität bei der Unterhaltsvariante χ
$K_{\chi,t}^{Betrieb,i}$	Betriebskosten bei der Unterhaltsvariante χ im Jahr t
$K_{\chi,i}^{Betrieb,Betreiber}(t)$	Betriebskosten der Betreiber bei der Unterhaltsvariante χ im Jahr t
$K_{\chi,i}^{Betrieb,Nutzer}(t)$	Betriebskosten der Nutzer bei der Unterhaltsvariante χ im Jahr t
$K_{\chi,i}^{Betrieb,Dritte}(t)$	Betriebskosten Dritter bei der Unterhaltsvariante χ im Jahr t
$K_0^{Betrieb,Betreiber}$	Grund-Betriebskosten des Betreibers
$\Delta K_\chi^{Betrieb,Betreiber}$	Erhöhte Betriebskosten des Betreibers
$K_0^{Betrieb,Nutzer}$	Grund-Betriebskosten der Nutzer
$\Delta K_\chi^{Betrieb,Nutzer}$	Erhöhte Betriebskosten der Nutzer
$K_0^{Betrieb,Dritte}$	Grund-Betriebskosten Dritter
$\Delta K_\chi^{Betrieb,Dritte}$	Erhöhte Betriebskosten Dritter
$K_t^{Inst,\xi}$	Aperiodische Kosten der Instandsetzungsmaßnahme ξ
$K_t^{Ern,v}$	Aperiodische Kosten der Erneuerung des Bauteils v
KBW_{χ,t_B}	Kosten-Barwert der Unterhaltsvariante χ bezogen auf den Zeitpunkt t_B
$K_{\chi,t}$	Kosten der Unterhaltsvariante χ im Jahr t
$k_\chi^{Betrieb,Flick}(t)$	Betriebskosten der Betreiber für Flickarbeiten pro qm im Jahr t
A_χ	Fläche k , auf der Flickarbeiten nötig sind
$K_\chi^{Betrieb,Nutzer,Zeit}$	Zeitkosten der Nutzer
$K_\chi^{Betrieb,Nutzer,Fahrz}$	Fahrzeugsbetriebskosten der Nutzer
$K_\chi^{Betrieb,Nutzer,Unf}$	Unfallkosten der Nutzer
$K_\chi^{Betrieb,Dritte,Umw}$	Umweltkosten Dritter
$K_\chi^{Betrieb,Dritte,Unf}$	Unfallkosten Dritter
$\Delta K_\chi^j(t)$	Kosten oberhalb der Grundkosten
$t_{\psi_i}^{St}$	Start des erhöhten Unterhaltsaufwands
$t_{\psi_i}^E$	Ende der erhöhten Kosten durch Unterhaltsmaßnahme ψ_i zur Verbesserung des Straßenzustands
$K_\chi^{Inst,Betreiber,\xi}$	Aperiodische Betreiberkosten der Instandsetzungsmaßnahme ξ
$K_\chi^{Inst,Nutzer,\xi}$	Aperiodische Nutzerkosten der Instandsetzungsmaßnahme ξ
$K_\chi^{Inst,Dritte,\xi}$	Aperiodische Kosten Dritter der Instandsetzungsmaßnahme ξ
$K_\chi^{Ern,Betreiber,v}$	Aperiodische Betreiberkosten der Erneuerungsmaßnahme v
$K_\chi^{Ern,Nutzer,v}$	Aperiodische Nutzerkosten der Erneuerungsmaßnahme v
$K_\chi^{Ern,Dritte,v}$	Aperiodische Kosten Dritter der Erneuerungsmaßnahme v
ΔZ_b^k	Verlust des baulichen Zustands des Bauteils k

K^{Ern}	Erneuerungskosten
$K_0^{k,Abr}$	Kosten des Abrisses des Bauteils k
$K_0^{k,Neu}$	Kosten des Neubaus des Bauteils k
k	Deckschicht/Deck- + Binderschicht/ Deck- + Binder- + Tragschicht
$q_{Betreiber}$	Diskontierungsfaktor für Betreiberkosten
q_{Nutzer}	Diskontierungsfaktor für Nutzerkosten
q_{Dritte}	Diskontierungsfaktor für Kosten Dritter
$\Delta K_\chi^{Zu,Betriebr,i}(t)$	Zusatz-Betriebskosten im Jahr t
$\Delta K_\chi^{Zu,Betrieb,Betreiber}$	Zusatz-Betriebskosten des Betreibers im Jahr t
$\Delta K_\chi^{Zu,Betrieb,Nutzer}$	Zusatz-Betriebskosten der Nutzer im Jahr t
$\Delta K_\chi^{Zu,Betrieb,Dritte}$	Zusatz-Betriebskosten Dritter im Jahr t
$\Delta \Delta K_\chi^{Inst,i,\xi}$	Zusatzkosten durch eine höhere Instandsetzungsmaßnahme
$KBW - U_\chi _{t_B}$	Kosten-Barwert der gewählten Unterhaltsstrategie χ bezogen auf den Zeitpunkt t_B
$KBW - \tilde{U}_\chi _{t_B}$	Kosten-Barwert bei Verschiebung von Instandsetzungsmaßnahme ξ bzw. Erneuerungsmaßnahme v um die Zeitspanne $\pm \Delta t_{\psi_k}$ bzw. $\pm \Delta t_{\psi_e}$

Literatur

- [1] Girmscheid G.: Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Strategiebildung und Unterhaltsvarianten für Straßennetze. In: Bauingenieur, Band 82, 07-08/2007, S. 346
- [2] Girmscheid, G.: Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften. Eigenverlag des IBB an der ETH Zürich, 2004
- [3] Yin, R., K.: Case study research: design and methods. Sage Publications, Inc., Thousands Oaks (USA), 1994
- [4] Boulding, K.: General Systems Theory. In: General Systems, p. 11–17, 1956
- [5] Bertalanffy, L., von.: General System Theory, New York, 1968
- [6] Ross, S. A.; Westerfield R. W.; Jaffe J.: Corporate Finance, McGraw-Hill Higher Education, Boston, 2002
- [7] Weber, M.; Winkelmann, J.: Wirtschaft und Gesellschaft. Grundriss der verstehenden Soziologie. Mohr, Tübingen, 1990
- [8] Curran, M. W.: Range Estimating – Measuring Uncertainty and Reasoning with Risk. In: Cost Engineering Vol. 31: P. 18–26, 1998
- [9] Girmscheid, G.: NPV-Wirtschaftlichkeitsanalysemodell – Lebenszyklusbetrachtung von kommunalen Straßenunterhalts-PPPs. In: Bauingenieur, Band 81, H. 10/2006, S. 455–463
- [10] Girmscheid, G.: Risikobasiertes probabilistisches LC-NPV-Modell – Bewertung alternativer baulicher Lösungen. In: Bauingenieur, Band 81, H. 09/2006, S. 394–405
- [11] SN 641820, Kosten-Nutzen-Analysen im Straßenverkehr, Grundnorm. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2006
- [12] Rahmen, S.; Vanier, D. J.: Life cycle cost analysis as a decision support tool for managing municipal infrastructure. In: Proceedings of CIB 2004 Triennial Congress, Toronto, Ontario, May 2–9, S. 1–12, 2004
- [13] Gnehm, V.: Standardisierte Erhaltungsmaßnahmen. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Straßen, Bern, unveröffentlicht
- [14] Sachs, L.: Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden, 11. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2004
- [15] Girmscheid, G.; Busch, Th.: Risikomanagement in Generalunternehmungen, Eigenverlag des IBB, ETH Zürich, Zürich, 2005