

Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Strategiebildung und Unterhaltsvarianten für Straßennetze

G. Girmscheid

346

Zusammenfassung Ein systematischer und wirtschaftlich sinnvoller Unterhalt der öffentlichen Infrastrukturen lässt sich nur auf Grundlage einer langfristigen Unterhaltsstrategie gewährleisten. Die verschiedenen Unterhaltsstrategien müssen jedoch vor der praktischen Umsetzung auf ihre Wirtschaftlichkeit über den Lebenszyklus (LC) bzw. Nutzungszyklus hin überprüft werden. Das am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich für das Schweizer Bundesamt für Straßen (ASTRA) entwickelte Unterhaltsentscheidungsmodell für Straßennetze bzw. Netzabschnitte setzt sich aus zwei integrierten Teilen, dem Konzept zur Bildung von LC-Unterhaltsstrategien und LC-Unterhaltsvarianten sowie dem Lebenszyklus-Kosten-Barwert-Entscheidungsmodell, zusammen. Im ersten Teil wird das Konzept zur Entwicklung der LC-Unterhaltsstrategie und LC-Unterhaltsvarianten, zur Festlegung der Funktionalitätsgrenzen sowie zur Zuordnung von Maßnahmen aus einem standardisierten Katalog aufgrund der Schadensart und der Zustandsindizes entwickelt. Der zweite Teil mit dem probabilistischen wirtschaftlichen LC-Entscheidungsmodell nach dem ökonomischen Minimalprinzip unterstützt die Entscheidungsträger bei der Wahl der optimalen Unterhaltsstrategie und -variante. Dieser Beitrag behandelt den ersten Teil mit dem Konzept der LC-Strategieentwicklung und der LC-Unterhaltsvariantenbildung mit den dazugehörigen Maßnahmen.

Decision-making model – Life cycle oriented strategy definition and alternatives for maintaining street networks

Abstract A long-term maintenance strategy is an absolutely crucial basis if public infrastructures are to be systematically and cost-efficiently preserved. The cost efficiency of the various maintenance strategies over the entire life cycle (LC) or service life must, however, be examined prior to practical implementation. The decision-making model for maintaining street networks or network sections developed by the Institute for Construction Engineering and Management at ETH Zurich for the Swiss Federal Roads Authority (Bundesamt für Verkehr, ASTRA) is comprised of two integrated parts: The concept for defining LC maintenance strategies and LC maintenance alternatives, and the life cycle-cost-cash value decision-making model. The first part focuses on developing the concept for defining the LC maintenance strategy and LC maintenance alternatives, determining the functionality limits and assigning measures from a standardized catalog based on the type of damage and the conditions indices. The second part comprising the probabilistic economic LC decision-making model

based on the economic minimum principle supports decision-makers in selecting the optimal maintenance strategy and alternative. This paper addresses the first part relating to the concept of defining an LC strategy and identifying the LC maintenance alternatives together with the relevant measures.

1 Einleitung

In den meisten europäischen Ländern stellt nicht mehr der Bau neuer Infrastrukturen, sondern der Unterhalt der bestehenden Strukturen eine große Belastung für die öffentlichen Haushalte dar. Während bei Neubauprojekten meist intensiv versucht wird, die Investitionskosten für die Baumaßnahmen durch Variantenanalysen unter Beachtung von vergleichbaren Qualitätskriterien zu minimieren, besteht beim Unterhalt das Problem, dass die meisten Netzbetreiber keine langfristige Unterhaltsstrategie bzw. keine Unterhaltsvarianten verfolgen. Die lebenszyklusorientierte Betrachtung und Bewertung des effizienten Unterhalts von Infrastrukturen auf definierten Mindestanforderungen ist jedoch unumgänglich für ein funktionierendes Gemeinwesen.

Für die Entscheidungsträger der Betreiber von Infrastrukturen (öffentliche Hand oder Private) stellt sich bei der Entwicklung geeigneter Unterhaltsstrategien das Problem der konkreten Quantifizierung der Kosten einzelner Strategien sowie der zusätzlichen Kosten, die durch ein Abweichen von einer Strategie entstehen. Dies liegt daran, dass bis heute geeignete Konzepte zur LC-Strategie- und LC-Unterhaltsvariantenbildung sowie darauf aufbauende LC-Kosten-Entscheidungs- und Bewertungsmodelle fehlen. Eine klare LC-Strategiebildung mit den dazugehörigen LC-Unterhaltsvarianten und Maßnahmen sowie die darauf aufbauende strukturierte Wirtschaftlichkeitsanalyse der einzelnen Varianten ist die Voraussetzung zur Entwicklung der für den Einzelfall idealen LC-Strategie und LC-Unterhaltsvariante und liefert die notwendige Argumentationsgrundlage, um diese auch politisch durchzusetzen. Dazu wurde ein lebenszyklusorientiertes Kosten-Barwert-Straßenunterhalts-Modell (LC-KBW-StraUnt-Modell) entwickelt. Im Folgenden wird der erste Teil dieses Modells zur Entwicklung einer LC-Unterhaltsstrategie für ein vorgegebenes Straßennetz bzw. einen Netzabschnitt mit den LC-Unterhaltsvarianten und Maßnahmen gemäß der Verkehrsbelastung und Bedeutung des Netzes vorgestellt. In einem folgenden Beitrag wird der zweite Teil, das LC-KBW-Entscheidungsmodell zur Quantifizierung der Kosten verschiedener Unterhaltsvarianten, vorgestellt. Das LC-Unterhaltsstrategie- und LC-Unterhaltsvarianten-Konzept sowie das LC-KBW-Entscheidungsmodell wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid
 Professur für Bauprozess- und Bauunternehmensmanagement
 Institutsvorsteher
 Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich

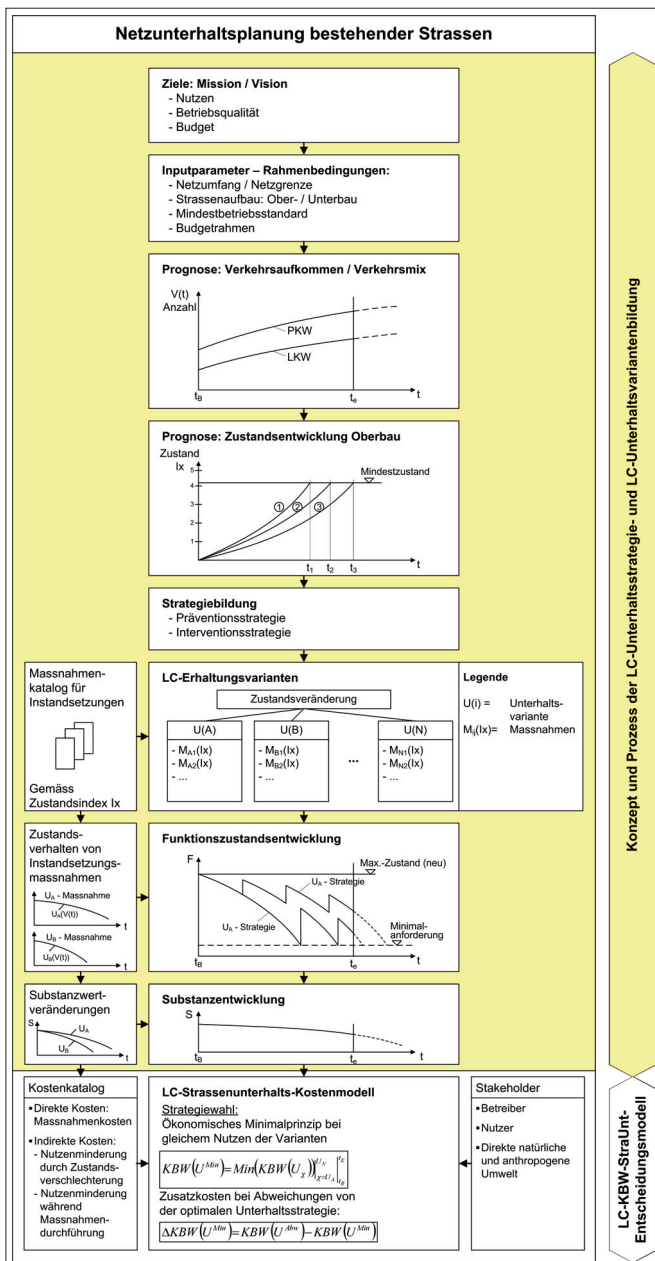


Bild 1. LC-KBW-StraUnt-Modell: Prozess der LC-Strategieplanung eines Straßennetzunterhalts
 Fig. 1. LC CCV StMaint model: Process for planning an LC strategy for street network maintenance

dem Schweizerischen Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute (VSS) entwickelt. Mit dem Konzept zur Bildung der LC-Unterhaltsstrategie und der LC-Unterhaltsvarianten sowie dem darauf aufbauenden LC-KBW-Entscheidungsmodell können die verschiedensten Fragestellungen hinsichtlich der finanziellen Auswirkungen, die sich bei der Unterhaltsplanung stellen, untersucht werden. Einerseits können verschiedene LC-Unterhaltsstrategien einschließlich der dazugehörigen LC-Unterhaltsvarianten verglichen werden; andererseits können zeitliche Verschiebungen einzelner Maßnahmen oder das kurzzeitige Abweichen von einer Unterhaltsstrategie aufgrund finanzieller Zwänge, mit der ursprünglichen Unterhaltsstrategie verglichen werden. Der prinzipielle Prozess der LC-Strategieplanung und Bildung der LC-Unterhaltsvarianten mit den dazugehörigen Maßnahmen für den Straßenunterhalt mit den einzelnen

Abläufen und Inputparametern ist Gegenstand dieses Beitrags und in **Bild 1** dargestellt. Den Rahmen für das LC-KBW-StraUnt-Modell bildet die Definition des betrachteten Netzes für den Straßenunterhalt. In diesem Straßennetz müssen folgende Parameter für den Input einer Unterhaltsstrategie festgelegt werden:

- Netzzumfang/Netzzgrenzen
- Straßenaufbau
- Verkehrsaufkommen/Verkehrsmix
- Mindestbetriebsstandards
- Zustandsentwicklung
- Unterhaltsmaßnahmen/Unterhaltsvarianten
- Budgetanforderungen

Innerhalb des betrachteten Netzsystems können verschiedene Unterhaltsvarianten gemäß der zu erwartenden Abnutzung und Schäden am Oberbau der Straßen aufgrund des konstruktiven Aufbaus der Straßen, der Verkehrsbelastung und wetterbedingter Einwirkungen definiert und in einem nächsten Schritt in der Wirtschaftlichkeitsanalyse mittels des neu entwickelten LC-KBW-Entscheidungsmodells bewertet werden (Bild 1). Aufgrund der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse können die besten Varianten selektiert und die Zusatzkosten eines Abweichens von diesen Varianten berechnet werden.

2 Stand der Forschung – Gesamtmodellansatz

Das Institut für Bauplanung und Baubetrieb (IBB) der ETH Zürich hat die Lebenszyklusbetrachtung im Rahmen des Forschungsansatzes SysBau® zum Schwerpunkt gemacht. Im Rahmen dieses Forschungsansatzes werden Projektentwicklungsformen [1], Geschäftsmodelle [2] und Supportmodelle wie Risikomanagementprozessmodelle [3], [4], [5] entwickelt. Zu dem hier vorgestellten Forschungsthema „Lebenszyklusorientiertes Entscheidungsmodell für den Straßenunterhalt“ ist der Stand der Forschung wie folgt:

Die Grundsätze, Begriffe und Abläufe sind in der europäischen Norm EN 13306:2001 [6] sowie SN 469 [7] und DIN 31051 [8] dargelegt. Die SN 640900a [9] ist die Grundnorm des Erhaltungsmanagements im Schweizer Straßenbau, in der Überwachung, Unterhalt etc. geregelt sind. In der SN 640925b [10] werden die Zustandserhebung und die darauf aufbauende schadensorientierte Indexbewertung dargelegt. Die Gesamtbewertung von Fahrbahnen nach Substanz- und Gebrauchswerten erfolgt in der SN 640904 [11]. Ferner differenzieren Rafi, Scazziga und Lindenmann [12] in Sicherheits-, Gebrauchs- und Substanzwerte, indem sie die Einzelindizes für diese drei Gesamtbewertungen zusammenführen. Die SN 640730b bis SN 640736a [13], [14], [15], [16], [17] beschreiben die Unterhaltsmaßnahmen. Die Bewertung von Straßenabschnitten nach nachfrage- und angebotsorientierten Kriterien beschreibt SN 640908 [18].

Die RPE-Stra01 [19] legt die Grundlagen für eine systematische Planung der Unterhaltsmaßnahmen von Straßen. Diese Richtlinie behandelt die Bewertung der Netzqualität, die Zustandsentwicklung sowie die Planung und Umsetzung des Unterhaltsprogramms. Umfangreiche Anhänge erläutern praxisgerecht die Umsetzung. Ferner bieten verschiedene Arbeitspapiere der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Systematiken des Straßenunterhalts. In [20] werden Programmkenngrößen für Abschnittseinteilung, Zustandsentwicklung, Schadensursachen und Mängelklassen sowie Erhaltungsmaßnahmen-

arten und Rücksetzwerte mit den Verhaltensänderungen nach der Erhaltungsmaßnahme sowie die Bewertung von Strategien und deren Optimierung dargelegt. Die Auswertung der messtechnischen Erfassung verschiedener Schäden und die Einordnung in die Zustandsindizes sowie die Bestimmung der Teilzielwerte bezüglich Gebrauchsfähigkeit und Substanzgrad erfolgt in [21]. Die Bewertung der Substanz aus den Bestandsdaten erfolgt in [22]. Rafi, Hajdin u. a. [25] beschäftigen sich mit dem Einsatz von Optimierungsverfahren auf der Basis des Operations Research im Erhaltungsmanagement von Straßennetzen. Die Grundlagen der Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement sind in der SN 640907 [24] dargelegt und in der SN 641820 [25] zur Kosten-Nutzen-Analyse zusammengeführt. Die SN 640931 [26] beschreibt grundsätzliche Modelle der Erhaltungsstrategien. Mit dem Zielsystem dieser Strategien setzt sich die SN 640901 [27] auseinander.

Allerdings besteht kein Konzept zur LC-Unterhaltsstrategie- und -variantenbildung mit einem integrierten finanzmathematischen Lebenszyklusentscheidungsmodell zur Beurteilung von LC-Unterhaltsstrategien auf Netzebene für Straßensysteme im Speziellen oder für Verkehrssysteme im Allgemeinen.

Die LCCA-Konzepte (Life-Cycle Cost Analysis) [28], [29], [30] beinhalten in der Regel nur Bar-Wert-Formeln. Es fehlen klare Systemabgrenzungen in Bezug auf

- räumliche Systemabgrenzung (Gegenstand: Netzraum und Straßenkörper),
- technische Systemabgrenzung (Zustandsentwicklung, Maßnahmenkonzepte),
- methodische Systemauswahl (statische/dynamische Methoden),
- finanzmethodische Systemauswahl (Rechnungswesen),
- finanztechnische Anfangs- und Endbewertung (Anfangs-/Endwert),
- finanztechnische Abgrenzung der Stakeholder (Betrachtungsperspektiven).

Daher wurden am IBB der ETH Zürich Life-Cycle-Net-Present-Value-Analysemodelle entwickelt für den Vergleich baulicher Alternativen [5], die Bewertung von PPP-Entscheidungen [4] sowie zur Systementscheidung und Miet- und Besitzmodellentscheidung von Schalungssystemen bzw. Baugeräten [31]. Dieses LC-KBW-StraUnt-Modell (Bild 1) wird im Rahmen des ASTRA-Forschungsclusters „Maßnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen“ des Bundesamts für Straßen (Schweiz) unter zentraler Beteiligung des Schweizerischen Verbands der Straßen- und Verkehrsfachleute (VSS) entwickelt. Dieses Forschungscluster besteht aus den Projekten:

- Standardisierte Erhaltungsmaßnahmen
- Schadensprozesse und Zustandsverläufe
- Bedeutung von Oberflächenzustand und Tragfähigkeit
- Gesamtnutzen – Nutzen-Kosten-Verhältnisse
- Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschieben von Erhaltungsmaßnahmen

3 Forschungsmethodik

Zur Begründung der Forschungsmethodik [32] wird die wissenschaftliche Einteilung der Welt nach Popper [33] in die drei Welten vorgenommen. Diese Einteilung gliedert die Welt (Trialismus) in die Welt 1 der Dinge und Materie, die zur nomothetischen Wissenschaftstheorie gehört mit ihren Theorien, Gesetzen und Ursache-Wirkungsbeziehungen (z. B. Naturwissenschaften). Die Welt 2 ist das innere Ich (z. B. Psychologie). Die Welt 3 beinhaltet die Außenwelt, die vom Menschen geschaffen wurde. Diese Welt 3 gehört zur hermeneutischen Wissenschaftsphilosophie, die die Welt durch den Menschen interpretiert und gestaltet/konstruiert. Die Baubetriebswissenschaft gehört zu der Welt 3, der sozio-technischen Umwelt, die von Ingenieuren durch Prozesse, Modelle etc. gestaltet wird. Aus dieser hermeneutischen wissenschaftsphilosophischen Betrachtung leiten sich die interpretativistischen [34] und konstruktivistischen [35], [36] Forschungsparadigmen ab.

Für die Gestaltung des LC-KBW-StraUnt-Modells wird das konstruktivistische Forschungsparadigma angewendet [32]. Das LC-KBW-StraUnt-Modell wurde denklologisch-deduktiv konstruiert. Zur wissenschaftlichen Güteprüfung wird die Triangulation [37] herangezogen. Dazu wird das denklologisch-deduktive Modell in einen theoretischen Bezugsrahmen eingebettet und durch Realisierbarkeitstests auf die intendierte Input-Output-Beziehung überprüft [32]. Das holistische LC-KBW-StraUnt-Modell setzt sich aus zwei Teilen zusammen (Bild 1):

- Teil 1 – Konzept und Prozess der Bildung von LC-Unterhaltsstrategien und LC-Unterhaltsvarianten
- Teil 2 – LC-KBW-Entscheidungsmodell zur Bestimmung der ökonomischsten LC-Unterhaltsvariante unter der gewählten Strategie

Dieser Beitrag stellt den Teil 1 des LC-KBW-StraUnt-Modells vor. Als theoretischen Bezugsrahmen für das denklologisch-deduktiv entwickelte Konzept zur LC-Unterhaltsstrategie- und LC-Unterhaltsvariantenplanung wird die Systemtheorie [38], [39] herangezogen. Die Systembegrenzung für die LC-Unterhaltsstrategien und LC-Unterhaltsvarianten werden durch folgende Dimensionen bestimmt:

- Willensbildungs-Dimension
 - Politische, volkswirtschaftliche und ökologische Bedingungen
- Räumliche Dimension
 - Räumliche Bildung von Netzen und Netzabschnitten nach Verkehrsströmen und -verbindungen
 - Räumliche Bildung von verhaltenshomogenen Abschnitten innerhalb der Netze und Netzabschnitte bezüglich Straßenaufbau und Verkehrsbelastung
- Zeitliche Dimension
 - Zeitliches Verhalten von Belagsmaterialien und -konstruktionen unter Belastung
 - Zeitliches Verhalten von Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen unter Belastung
- Technische Dimension
 - Typisierung der Schäden
 - Zuordnung von Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen zu den Schadenskategorien

Das Konzept zur Bildung der LC-Strategien und LC-Unterhaltsvarianten gliedert sich in:

- LC-Unterhaltsstrategiebildung mit Mission, Vision und Strategievarianten
- LC-Unterhaltsvariantenbildung mit Schadens-Maßnahmen-Zuordnung, Grenzwertbildung und Variantenbildung

4 Teil-Modellansatz – LC-Strategiebildung und LC-Unterhaltsvarianten

Die LC-Strategiebildung wird durch die externe und interne Willensbildungsdimension aus Politik, Ökonomie, Ökologie und Technik der Gesellschaft geformt, die Input bildet. Die räumlichen, zeitlichen und technischen Dimensionen des Teilmodells werden konstruktivistisch gestaltet (Bild 1).

4.1 Räumliche Dimension

Die räumliche Dimension wird in Netz (flächenhafte Ausdehnung) und vertikalen Aufbau des Straßenkörpers gegliedert. Die flächenhafte Dimension dieses LC-KBW-StraUnt-Modells befindet sich im Netzraum von Verkehrssystemen. Der Netzraum z.B. eines Betreibers kann oder muss sogar unterteilt werden in

- Straßenverbindungen von A nach B,
- Teilabschnitte eines Netzes,
- ganzes Netz (Kreisstraße, Bundesstraße, etc.).

Die Bewertung einzelner Straßenabschnitte kann zwar mit dieser Methode bzw. mit diesem Modell vorgenommen werden, jedoch fehlt bei der Aussagekraft die Interaktion zu den Auswirkungen weiterer Maßnahmen in dem Teilnetz, in dem dieser Straßenabschnitt sich befindet. Daher wird die flächenhafte Abgrenzung des Betrachtungssystems wie folgt vorgenommen:

- Verkehrsflussabhängigkeiten der verschiedenen z.B. dezentralen Erhaltungsmaßnahmen im Netz
- Ökonomische Optimierung der Maßnahmen bezüglich Reduzierung der Nutzenminderung und der direkten Kosten durch verschiedene Maßnahmen an einer Verkehrsflussachse

Dazu ist es erforderlich, das Netz oder den Netzabschnitt in verhaltenshomogene Abschnitte bezüglich des Zustandsverhaltens zu gliedern (Bild 2).

Die vertikale Dimension des LC-KBW-StraUnt-Modells beinhaltet im Straßenkörperaufbau nur den Oberbau mit

- Deckschicht/Verschleisschicht,
- Binderschicht,
- Tragschicht.

Strassenabschnitt						
	A	Stadt B	Stadt C	Stadt D	E	
Kilometrierung [km]	100	150	225	350	450	
Zustandsbereiche Fahrbahn 1	1 A ₁	2 A ₂	3 A ₃	4 A ₄	5 A ₅	
Kilometrierung [km]	100	125	200	250	300	450
Zustandsmerkmale:						
Oberflächenschäden - I1	2	1	4	3	3	
Ebenheit längs - I2	3	1	3	3	2	
Ebenheit quer - I3	3	2	3	4	2	
Griffigkeit - I4	2	1	4	2	3	
Tragfähigkeit - I5	2	2	2	2	2	
Verhaltenskurven:						
Oberflächenschäden - I1						
Ebenheit längs - I2						
Ebenheit quer - I3						
Griffigkeit - I4						
Tragfähigkeit - I5						

Bild 2. Zustandsbeurteilung eines Netzabschnitts mit verhaltenshomogenen Abschnitten

Fig. 2. Assessing the condition of a network section with sections of structural homogeneity

Der Unterbau der Straße sowie darin befindliche Installationen sind nicht Gegenstand des Modells. Das Modell kann jedoch relativ einfach auf einen integrativen Infrastrukturanalyse erweitert werden.

Aufgrund der Netzabschnittgliederung nach räumlichen Dimensionen und der Verkehrsbelastung lässt sich eine holistische LC-Strategie für den Unterhalt entwickeln.

Die optimale LC-Strategie Γ und LC-Unterhaltsvariante χ sollen dann mittels des LC-KBW-StraUnt-Entscheidungsmodells aufgrund von wirtschaftlichen Analysen unter Einbezug der direkt betroffenen Stakeholder bestimmt werden.

4.2 Technische und zeitliche Dimension

Der Straßenzustand ist der zentrale Parameter in der Unterhaltsplanung. Sämtliche Entscheidungen im Straßenunterhalt hängen direkt oder indirekt vom jetzigen Straßenzustand sowie seiner erwarteten Entwicklung ab.

Nach der Schweizer Norm [10] wird der Straßenzustand in fünf Zustandsindizes I1 bis I5 angegeben. Die Zustandsindizes beschreiben die Oberflächenschäden (I1), die Ebenheit in Längs- (I2) und Querrichtung (I3), die Griffigkeit (I4) sowie die Tragfähigkeit (I5). Entsprechend dem durch visuelle Beurteilung oder Messung ermittelten Zustand werden die Indizes mit einer Skala von 0 (guter Zustand) bis 5 (schlechter Zustand) bewertet. Zusätzlich wird jede Straße entsprechend ihres strukturellen Aufbaus in eine Verhaltensklasse (Bild 3) eingeteilt, die die unterschiedliche Zustandsentwicklung über die Zeit abbildet.

Im Rahmen des VSS-Forschungsclusters „Maßnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen“ wird im Projekt „Schadensprozesse und Zustandsverläufe“ der Verlauf der Schadensentwicklung (Verlaufskurven), der sich in einer zunehmenden Verschlechterung der Zustandsindizes niederschlägt, ermittelt. Im Projekt „Standardisierte Erhaltungsmaßnahmen“ wurde ein Katalog von standardisierten Erhaltungsmaßnahmen aufgestellt. Neben den zu erwartenden Kosten wird dort jeweils der Einfluss einer Maßnahme auf die einzelnen Zustandsindizes und auf die Verhaltensklasse angegeben. Für jeden Zustandsindex werden Verlaufskurven für den Straßenzustand definiert

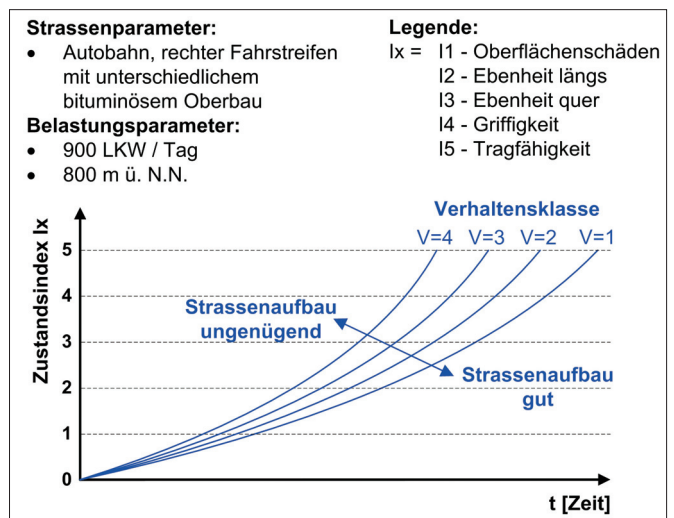


Bild 3. Verhaltensklassen-Zustandsentwicklung von unterschiedlichem Straßenaufbau bei gleicher Verkehrsbelastung (Beispiel)

Fig. 3. Structural indices-progressive condition of different street structures under identical traffic loads (example)

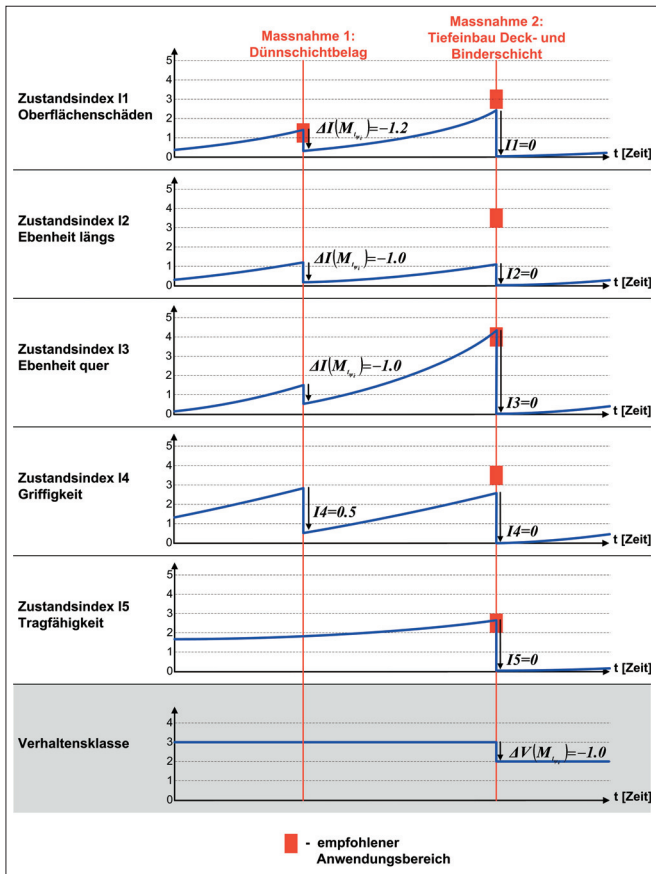


Bild 4. Zustandsentwicklung verschiedener Zustandsindizes (Ix) aufgrund der Verhaltensklasse sowie Auswirkung von Instandsetzungsmaßnahme 1 und 2 auf die Zustandsbeurteilung (Ix) und Verhaltensklasse (V)
 Fig. 4. Progressive condition of different condition indices (Ix) based on the structural indices and impact of repair measure 1 and 2 on the assessment of condition (Ix) and structural index (V)

(Bild 5). Die Verlaufskurven repräsentieren die Verhaltensklassen V1 bis V4 und werden differenziert nach Art der Straße (übergeordnete oder untergeordnete Straße), Art des Oberbaus, Verkehrsbelastung und den klimatischen Verhältnissen. In Bild 4 ist der mögliche Zustandsverlauf für eine Kombination von Randbedingungen in Abhängigkeit von der Verhaltensklasse exemplarisch dargestellt.

Wird eine Erhaltungsmaßnahme durchgeführt, so verbessern sich einzelne oder alle Zustandsindizes sowie eventuell auch die Verhaltensklasse (Bild 4).

Kleinere Maßnahmen wie z.B. eine Oberflächenbehandlung haben demnach nur eine geringfügige Verbesserung einzelner Zustandsindizes zur Folge, während umfangreichere Maßnahmen wie z.B. die Erneuerung des Oberbaus in allen Indizes den Neuzustand herstellen und zusätzlich eine Verbesserung der Verhaltensklasse bewirken.

In Bild 4 sind die Veränderungen der Zustandsindizes und der Verhaltensklasse bei zwei unterschiedlich umfangreichen Maßnahmen dargestellt. Die zeitabhängigen Veränderungen der einzelnen Zustandsindizes zwischen den Maßnahmen werden im weiteren Verlauf des Projekts durch empirisch gewonnene Verhaltensfunktionen ersetzt (Projekt „Schadensprozesse und Zustandsverläufe“).

Bild 5 zeigt auf, wie sich die Funktionalität eines Straßennetzes oder Straßenabschnitts durch die Veränderung des Straßenzustands aufgrund verschiedener Schadeneinflussfaktoren Ix verändert. Die Funktionalität mit Elementen der Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit ausge-

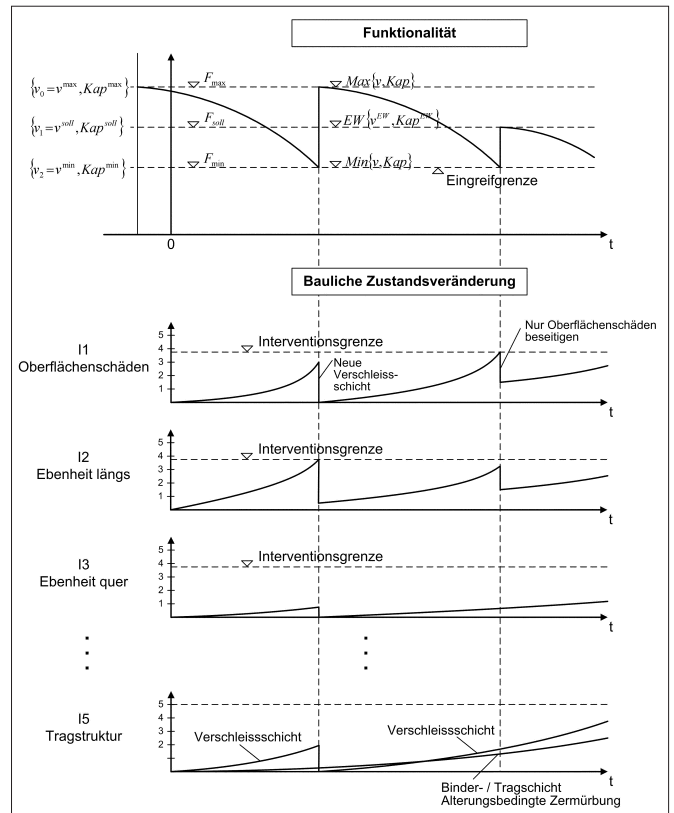


Bild 5. Funktionalität F(t) in Abhängigkeit von den Interventionsgrenzen der Zustandsindikatoren Ix
 Fig. 5. Functionality F(t) depending on the intervention limits of condition indicators Ix

drückt, z.B. durch die Parameter Geschwindigkeit oder Kapazität, kann durch Oberflächenschäden und/oder Ebenheitsveränderungen gleichermaßen beeinträchtigt werden. Die Funktionalitätseinschränkungen werden durch Oberflächenveränderungen bewirkt, die Tragstruktur verändert sich dagegen bei richtiger Bemessung sehr langsam.

5 LC-Strategieplanung

Die LC-Unterhaltsstrategie für ein Straßennetz oder einen Netzabschnitt ergibt sich aus der externen und internen Willensbildung [2]. Die externen Bedingungen, die die Strategie beeinflussen, ergeben sich aus (Bild 6)

- politischen (transnational, national, regional),
- volkswirtschaftlichen und regionalwirtschaftlichen sowie
- ökologischen Anforderungen.

Die internen Bedingungen, die die Strategie beeinflussen, ergeben sich aus (Bild 6)

- Budgetvorgaben,
- technischem und ökonomischem Know-how,
- Präferenzen der Entscheidungsträger.

Aufgrund dieser willensbildenden Vorgaben ergibt sich die Mission und Vision des Unterhaltsmanagements. Die Mission geht von der politischen und volkswirtschaftlichen Bedeutung sowie den Umweltauflagen und Zielsetzungen für das jeweilige Straßennetz oder den Netzabschnitt aus und legt für den Unterhalt (Bild 6)

- die Dauer- und Mindestleistungsfähigkeit,
- den Qualitäts- und Sicherheitsstandard sowie den Nutzungskomfort unter Betriebsbedingungen

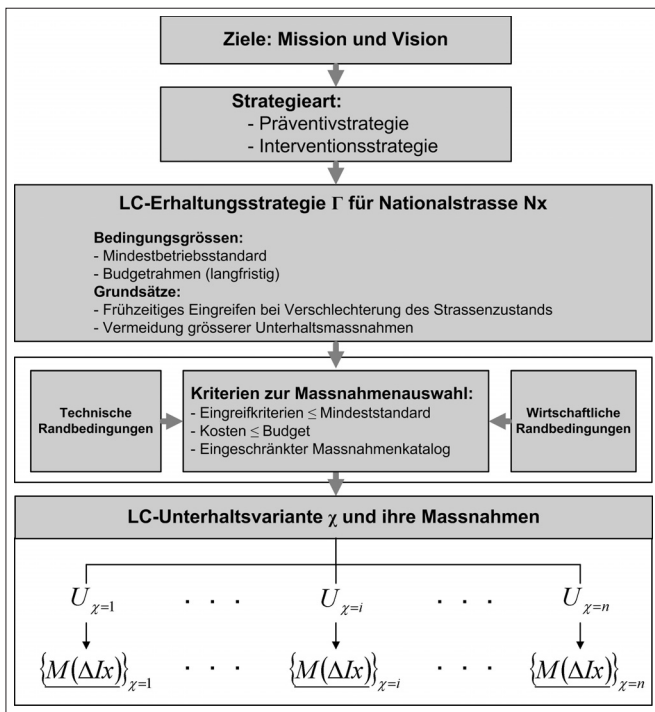


Bild 6. Konzept der LC-Strategiebildung Γ sowie der LC-Unterhaltsvarianten χ
 Fig. 6. Concept of strategy definition Γ and maintenance alternatives χ

- sowie den Nutzungskomfort bei Störungen und Instandsetzungen fest.

Die Vision legt fest, wie diese Mission in der Zukunft in Ziele umgesetzt werden soll. Daher müssen Vorgaben quantifiziert formuliert werden, die dann mittels Strategieplanung umgesetzt werden. Zu diesen Zielen der Vision gehört u. a. (Bild 6):

- Erwartungsqualitätsniveau im Betrieb mit der Präventionsgrenze $\{v_{Soll}^B, Kap_{Soll}^B\}$ und $\{Ix\}_{Soll}$, die in der Strategieplanung eingehalten werden sollten
- Mindestqualitätsniveau mit der Interventionsgrenze $\{v_{Min}^B, Kap_{Min}^B\}$ und $\{Ix\}_{Min}$ im Betrieb, die nicht unterschritten werden darf
- Mindestkomfortniveau $\{v_{Min}^{St}, Kap_{Min}^{St}, T, f\}$ bei Störungen und Instandsetzungen

Um das Erwartungsqualitätsniveau und das Mindestqualitätsniveau zu definieren, müssen Schadensarten gebildet, Messgrößen zur Aufnahme der Schäden vor Ort definiert sowie eine Einordnung der Schadensmessgrößen in eine dimensionslose Skalierung vorgenommen werden. Dazu ist es erforderlich, die Schadensarten bei Straßendecken zu klassifizieren in:

$$\{\Phi\} = \{\varphi_1(t); \varphi_2(t); \varphi_3(t); \varphi_4(t); \varphi_5(t)\}$$

- φ_1 = Oberflächenschäden
- φ_2 = Längsebenheitsschäden
- φ_3 = Querebenheitsschäden
- φ_4 = Griffigkeitsschäden
- φ_5 = Tragfähigkeitsschäden

Diese Schadensarten werden über Messgrößen γ_i bewertet. Die Messgrößen werden dann dimensionslos skaliert zu Ix . Somit besteht folgender Zusammenhang:

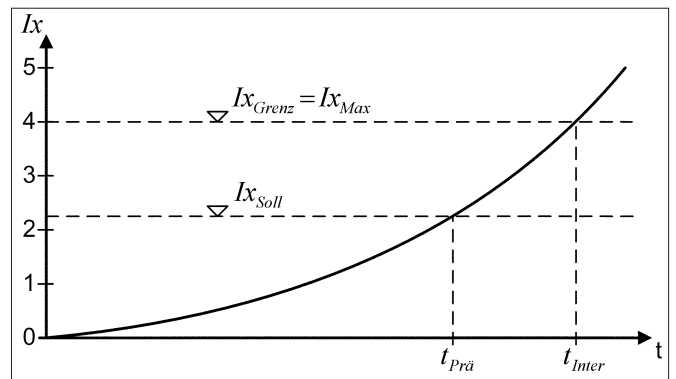


Bild 7. Zustandsgröße des Schadens und mögliche Grenzwerte für die Soll- und Mindestfunktionalität
 Fig. 7. Condition variable of the damage and possible limits for target and minimum functionality

$$\{\Phi\} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ \varphi_5 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} I1(t) \\ I2(t) \\ I3(t) \\ I4(t) \\ I5(t) \end{bmatrix} \underset{\text{Skalierung } 1 \leq Ix \leq 5}{=} \{Ix\}$$

Die Schadensarten und ihre messbaren Größen verändern sich aufgrund der Verkehrsbelastung über die Zeit t und somit auch die dimensionslosen Zustandsgrößen $Ix(t)$. Somit lassen sich die Grenzwerte für das Erwartungsniveau und Mindestqualitätsniveau für Geschwindigkeit, Kapazität, Fahrkomfort und Sicherheit wie folgt darstellen. Erwartungsniveau – Sollfunktionalität (Bild 7):

$$\{Ix\}_{Soll} = \begin{bmatrix} I1_{Soll} \\ I2_{Soll} \\ I3_{Soll} \\ I4_{Soll} \end{bmatrix} \text{ bzw. } \begin{bmatrix} I1_{EW} \\ I2_{EW} \\ I3_{EW} \\ I4_{EW} \end{bmatrix}$$

Mindestqualitätsniveau – Mindestfunktionalität (Bild 7):

$$\{Ix\}_{Grenz} = \begin{bmatrix} I1_{Max} \\ I2_{Max} \\ I3_{Max} \\ I4_{Max} \end{bmatrix} = \{Ix\}_{Max}$$

Auf dieser Basis wird die Unterhaltsstrategie aufgebaut. Grundsätzlich unterscheidet man [40] folgende Unterhaltsstrategien im Anlagenbau, die auch auf den Straßenunterhalt im weitesten Sinn übertragen werden können (Bild 8):

- Präventivstrategie
- Interventionsstrategie

Die Präventivstrategie wird bereits bei Anzeichen von Schäden bzw. Komfortstörungen angewendet, die ein Erwartungsqualitätsniveau $\{v_{EW}^B, Kap_{EW}^B\}$ bzw. $\{v_{Soll}^B, Kap_{Soll}^B\}$ im Betrieb erreichen, z. B. durch Vorgaben über Oberflächenveränderungsgrenzwerte für

- kleine/mittlere Schäden ($I1_{EW}$) bzw. $(I1)_{Soll}$
- Griffigkeit ($I4_{EW}$) bzw. $(I4)_{Soll}$
- Ebenheit ($I2_{EW}; I3_{EW}$)_{Soll} bzw. $(I2_{Soll}; I3_{Soll})_{Soll}$

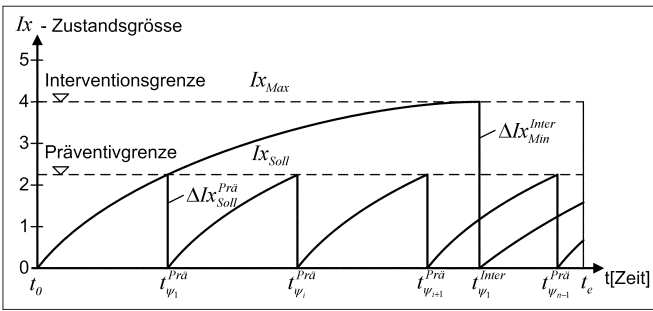


Bild 8. Wirkung von Präventiv- und Interventionsstrategie im zeitlichen Rahmen
 Fig. 8. Effect of preventive and intervention strategies over a defined time period

Die Interventionsstrategie wird erst angewendet, wenn der Mindeststandard für Qualität, Komfort oder Sicherheit $\{v_{Min}^B, Kap_{Min}^B\}$ des Straßennetzes bzw. Netzabschnitts erreicht wird. Vorher finden quasi keine Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen statt. Die Grenzwerte für Oberflächen- und Tragfähigkeitsveränderungen sind dann wie folgt:

$$\{Ix\}_{Max} = \{I1_{Max}; I2_{Max}; I3_{Max}; I4_{Max}; I5_{Max}\}$$

Beide Strategien sagen noch nichts über die Kurz- oder Langlebigkeit der Maßnahmen aus. Allerdings führt die Interventionsstrategie (man macht möglichst lange nichts) mit kurzlebigen Maßnahmen über längere Zeiträume zur möglichen Gebrauchsuntauglichkeit. Dies ist bei der Präventivstrategie mit langlebigen Maßnahmen nicht der Fall (Bild 8).

Für die Präventiv- sowie für die Interventionsstrategie ist es sinnvoll, einen Mindestrücksetzwert ΔIx_{Min}^i für die jeweilige Zustandsgröße Ix bei Erreichen des Grenzwertes

$$F_{Grenz} = \{F_{Soll} \vee F_{Min}\} \vee Ix_{Grenz} \Big|_{x=1}^5 = \{Ix_{Soll} \vee Ix_{Max}\} \Big|_{x=1}^5$$

mit:

$$\{Ix\}_{Grenz} = \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ \dots \\ I5 \end{bmatrix}_{Soll}^{Präventiv} \vee \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ \dots \\ I5 \end{bmatrix}_{Max}^{Intervention}$$

wie folgt zu definieren:

$$\begin{aligned} (\Delta Ix)_{Min} &= \left\{ \{ \Delta Ix \}_{Min} \mid \{ \Delta Ix \}_{Min} = \{ \Delta Ix \}_{Min}^{Soll} \vee \{ \Delta Ix \}_{Min} = \right. \\ &= \left. \{ \Delta Ix \}_{Min}^{Max} \right\}_{x=1}^5 \end{aligned}$$

$$(\Delta Ix)_{Min} = \begin{bmatrix} \Delta I1_{Min}^{Soll \vee Max} \\ \Delta I2_{Min}^{Soll \vee Max} \\ \Delta I3_{Min}^{Soll \vee Max} \\ \Delta I4_{Min}^{Soll \vee Max} \\ \Delta I5_{Min}^{Soll \vee Max} \end{bmatrix}_{1 \leq x \leq 5}$$

mit: $Präventiv = Soll \wedge Intervention = Max$

6 LC-Unterhaltsvariantenbildung

Aufgrund der Vorgaben der Mission und Vision mit den langfristigen Zielen und der Strategie zur Umsetzung der Ziele erfolgt die Bildung der Maßnahmenvarianten. Da die Unterhaltsstrategie aufgrund von einer Vielzahl von Maßnahmenvarianten umgesetzt werden kann, ist ein systematisches analytisches Vorgehen notwendig, um aus der Vielzahl von Kombinationen die wirtschaftlich optimale Kombination mittels LC-KBW-StraUnt-Modell zu identifizieren. Für die Planung der Unterhaltsmaßnahmen stehen umfangreiche Maßnahmenkataloge [41], [20] zur Verfügung. Diese Maßnahmen sollten für die Verbesserung der Zustandsgrößen $\{I1; I2; I3; I4; I5\}$ sortiert werden. Somit kann man die Gesamtmaßnahmen in spezifische Maßnahmen zur Verbesserung der Zustandsgrößen oder Behebung der jeweiligen Schäden einordnen. Dabei werden Maßnahmen $\{Mx\}$ teilweise zur Verbesserung verschiedener Zustandsgrößen $\{Ix\}$, genutzt. Daher werden die gesamten Maßnahmen $\{M\}$ nach den spezifischen Zustandsveränderungen der jeweiligen Maßnahme (Mx) gegliedert:

$$\begin{aligned} \{M\}_{Total} &= \left\{ \left\{ M1(\Delta I1^i) \right\}, \left\{ M2(\Delta I2^i) \right\}, \left\{ M3(\Delta I3^i) \right\}, \right. \\ &\left. \left\{ M4(\Delta I4^i) \right\}, \left\{ M5(\Delta I5^i) \right\} \right\}_{i=(Soll \vee Max)} \end{aligned}$$

Es gilt ferner:

$$\{M\}_{Total} \supset \left\{ Mx(\Delta Ix^i) \right\}_{x=1}^5 \Big|_{i=(Soll \vee Max)}$$

Dabei gilt:

$$\{M1\} \subset \{M2\} \subset \{M3\} \subset \{M4\} \subset \{M5\}$$

Die Maßnahmenmatrizen $\{Mx\}$ zur Verbesserung der Zustandsgrößen $\{Ix\}_i$ um ΔIx_{Min}^i enthalten nur Maßnahmen, die nach der festgelegten Strategie diesen Mindestrücksetzwert der Zustandsgröße erzielen, um die Gesamtfunktionalität auf das Erwartungsqualitätsniveau, wenn nicht sogar auf $Ix = 0$, zurückzuführen. Damit lassen sich die Maßnahmen, die die strategischen Vorgaben Γ erfüllen, für die jeweiligen Zustandsverbesserungen (Mindestrücksetzwert) ΔIx_{Min}^i der Zustandsgrößen $\{I1; \dots; I5\}$ wie folgt ordnen:

$$\begin{aligned} \Delta I1_{Min}: \left\{ M1(\Delta I1_{Min}^i) \right\}_{i=(Soll \vee Max)} &= \left\{ m_1^1; m_2^1; \dots; m_{n1}^1 \right\}_{i=(Soll \vee Max)} \\ \Delta I2_{Min}: \left\{ M2(\Delta I2_{Min}^i) \right\}_{i=(Soll \vee Max)} &= \left\{ m_1^2; m_2^2; \dots; m_{n2}^2 \right\}_{i=(Soll \vee Max)} \\ \Delta I3_{Min}: \left\{ M3(\Delta I3_{Min}^i) \right\}_{i=(Soll \vee Max)} &= \left\{ m_1^3; m_2^3; \dots; m_{n3}^3 \right\}_{i=(Soll \vee Max)} \\ \Delta I4_{Min}: \left\{ M4(\Delta I4_{Min}^i) \right\}_{i=(Soll \vee Max)} &= \left\{ m_1^4; m_2^4; \dots; m_{n4}^4 \right\}_{i=(Soll \vee Max)} \\ \Delta I5_{Min}: \left\{ M5(\Delta I5_{Min}^i) \right\}_{i=(Soll \vee Max)} &= \left\{ m_1^5; m_2^5; \dots; m_{n5}^5 \right\}_{i=(Soll \vee Max)} \end{aligned}$$

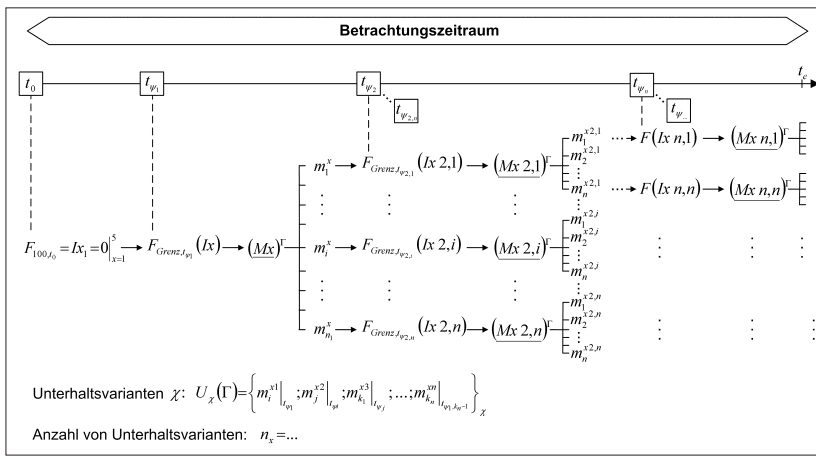


Bild 9. Entscheidungsbaumstruktur der Unterhaltsstrategie Γ mit den Unterhaltsvarianten χ
 Fig. 9. Decision-making tree structure for maintenance strategy Γ with maintenance alternatives χ

Damit reduzieren sich die Maßnahmen für die gewählte Strategie Γ zu:

$$\left\{ Mx(\Delta Ix_{Min}^i) \right\}_{i=1}^5 \Big|_{x=(Soll \vee Max)} \subset \{M\}_{Total}$$

Mit diesen auf die gewählte Strategie Γ abgestimmten Maßnahmen, die die Mindestkriterien erfüllen, können nun die Unterhaltsvarianten χ der Strategie Γ entwickelt werden. Das Vorgehen bezüglich der Entwicklung der Unterhaltsvarianten χ ist wie folgt (Bild 1 und Bild 6):

- Gemäß dem Verkehrsaufkommen sowie Verkehrsmix wird das Zustandsverhalten über die Zeit (t) der Zustandsgrößen {I1; ...; I5} simuliert.
- Wird die Funktionalitätsgrenze (Bild 5) z.B. F_{Soll} oder F_{Min} durch eine der Zustandsgrößen Ix_{Grenz} mit $Grenz = (Soll \vee Max)$ erreicht, so sind entsprechende Instandsetzungsmaßnahmen $\{Mx\}$ zu wählen.
- Die zu Ix_{Grenz} zugeordnete Maßnahmenmatrix $\{Mx\}$, die die Strategie Γ erfüllt, bildet das Variantenpotenzial χ für die jeweiligen Maßnahmen $m_i^x \Big|_{i=1}^{n_x}$.
- Die gewählte Maßnahme $m_i^x(\Delta Ix_{Min}^i)$ beeinflusst nun ab dem Zeitpunkt $t_{ψ_i}$ der Umsetzung der Maßnahme wieder das Zustandsgrößenverhalten, bis wieder die Funktionalitätsgrenze $F_{Grenz} = \{F_{Soll} \vee F_{Min}\}$ zum Zeitpunkt $t_{ψ_{i+1}}$ durch mindestens eine der Zustandsgrößen $\{Ix\}_{Grenz}$ erreicht ist.
- Dann wird wieder eine Maßnahme $m_i^x \Big|_{i=1}^{n_x}$ ausgewählt.

Dieser Iterationsprozess wird wie folgt durchgeführt:

- Das zeitliche Zustandsverhalten der Straße vom Neuzustand bzw. vom Instandsetzungszeitpunkt $t_{ψ_{i-1}}$ bis zum Zeitpunkt $t_{ψ_i}$ der Funktionalitätsgrenze $F_{Grenz} = \{Ix\}_{Grenz}$ wird durch die Haltbarkeitsdauer wie folgt ausgedrückt:

$$\Delta t_{ψ_i} = t_{ψ_i} - t_{ψ_{i-1}}$$

$$\Delta t_{ψ_i}(Ix_1 \rightarrow Ix_{Grenz}) = f(M + K; V_{Volumen}; V_{Mix}; U_x)$$

- Feststellen der Funktionalitätsgrenze zum Zeitpunkt $t_{ψ_i}$:

$$F_{Grenz,t_{ψ_i}} = \left\{ F_{Grenz,t_{ψ_i}} \right\}$$

$$\left\{ F_{Grenz,t_{ψ_i}} = Ix_{Grenz} = (I1_{Grenz} \vee I2_{Grenz} \vee I3_{Grenz} \vee I4_{Grenz} \vee I5_{Grenz}) \right\}$$

mit: $F_{Grenz,t_{ψ_i}} = \{F_{Soll} \vee F_{Min}\}_{t_{ψ_i}}$

Nach Feststellung der Zustandsgröße Ix_{Grenz} oder Zustandsgrößen $Ix_{Grenz,i} \Big|_{x=1}^n$ werden die möglichen Maßnahmen bestimmt, die den Mindestrücksetzwert ΔIx_{Min}^i der Zustandsgröße(n) Ix vom erreichten Zustandsgrenzwert Ix_{Grenz} der Funktionalität sicherstellen.

Der Rücksetzwert muss somit je nach Strategieforderung folgende Bedingung erfüllen:

$$\{Ix_1 \vee Ix_{Soll}\} = (Ix_{Grenz} - \Delta Ix_{Min}^i)$$

mit: $(Grenz = i) = (Soll \vee Max)$

- Auswahl der Maßnahmen $\{Mx\}$, die die Rücksetzbedingung $\{\Delta Ix_{Min}^i\}$ der Strategie Γ erfüllen:

$$\left\{ Mx(\Delta Ix_{Min}^i) \right\}^\Gamma = \left\{ m_i^x(\Delta Ix_{Min}^i) \right\}_{i=1}^{n_x}$$

$$\left\{ Mx(\Delta Ix_{Min}^i) \right\}^\Gamma \subset \{Mx(\Delta Ix)\}$$

mit: $i = (Soll \vee Max)$

Dabei haben die einzelnen Maßnahmen m_i^x neben ihrer Hauptwirkung auf die Zustandsgröße Ix im Regelfall auch Rücksetzeffekte $\Delta Iy_{Zurück}$ auf die anderen Zustandsgrößen:

$$\{Iy \text{ mit } y \mid y = Z^+ \text{ mit } 1 \leq y \leq 5 \text{ ohne } y = x\}$$

Somit wird durch die Maßnahme

$$m_{\xi \vee v}^x(\Delta Ix_{Min}^i)$$

mit: $i = (Soll \vee Max) \wedge \xi = \text{Instandsetzungsmaßnahmen} \wedge v = \text{Erneuerungsmaßnahmen}$

folgender Effekt auf die Zustandsgrößen $\{Ix\}_{x=1}^5$ erzielt:

$$\left\{ (Ix_1 \vee Ix_{Soll})_{t_{ψ_i}}^{Neu} = \left(Ix_{t_{ψ_i}} - \Delta Ix_{Min}^i \right) \wedge Iy_{t_{ψ_i}}^{Neu} = Iy_{t_{ψ_i}} - \Delta Iy^i \right\}$$

mit $y \mid y = Z^+ \text{ von } 1 \leq y \leq 5 \text{ ohne } y = x$

Dieser Iterationsprozess wiederholt sich, wenn die Funktionalitätsgrenze F_{Grenz} wieder erreicht ist.

Da bei jeder Funktionalitätsgrenze F_{Grenz} nicht nur eine Maßnahme m_i^x zur Verfügung steht, sondern n_x , entsteht eine Entscheidungsbaumstruktur (Bild 9), die sich bei jeder Entscheidungsstufe $t_{ψ_i}$ weiter verästelt. Damit ergeben sich bei der Erreichung der Funktionalitätsgrenze für den jeweiligen Netzabschnitt folgende Unterhaltsvarianten χ der Instandsetzung ξ oder Erneuerung v, die die Kriterien der Unterhaltsstrategie Γ erfüllen:

Unterhaltsvarianten χ

$$U_\chi(\Gamma) = \left\{ m_1^{x1} \Big|_{t_{ψ_1}}; m_j^{x2} \Big|_{t_{ψ_i}}; m_{k1}^{x5} \Big|_{t_{ψ_j}}; \dots; m_{kn}^{xn} \Big|_{t_{ψ_1, k, n-1}} \right\}_\chi$$

Die mittels Entscheidungsbaumverfahren entwickelten Unterhaltsvarianten χ der Unterhaltsstrategie Γ (Bild 9) müssen dann der systematischen Wirtschaftlichkeitsanalyse zugeführt werden.

Die Vielzahl der Varianten χ stellt trotz großer Rechenkapazität einen umfangreichen und zeitaufwendigen Analysevorgang zur Bestimmung der optimalen Unterhaltsstrategie $U(\Gamma)_{Opt} = U^{Min}$ dar.

7 Fazit

In diesem Beitrag wurden die Grundlagen für die Entwicklung der LC-Unterhaltsstrategien und LC-Unterhaltsvarianten mit den dazugehörigen Maßnahmen der Instandsetzung und Erneuerung gebildet. Damit erhält der Entscheidungsträger eine systematische Grundlage für die Entwicklung von Unterhaltsvarianten und für die lebenszyklusorientierte Planung von Maßnahmen. In einem Folgebeitrag erfolgt die probabilistische, wirtschaftliche lebenszyklusorientierte Bewertung der Varianten unter Beachtung der Kosten der am Straßenverkehr direkt involvierten Stakeholder, um die optimale Unterhaltsvariante und die dazugehörigen Maßnahmen nach dem ökonomischen Minimalprinzip zu ermitteln.

Formelzeichen

χ	Unterhaltsvariante
Ix	Zustandsindex x (x=1, 2, 3, 4, 5)
V	Verhaltensklasse
$M_{t_{\psi_i}}$	Instandsetzungsmaßnahme zum Zeitpunkt t_{ψ_i}
Kap	Kapazität
v^i	Geschwindigkeitsgrenze des Netzabschnitts mit $i = \{i = Min \vee i = Max \vee i = Soll \vee i = EW\}$
Kap^i	Kapazität/Verkehrsvolumen des Netzabschnitts mit $i = \{i = Min \vee i = Max \vee i = Soll \vee i = EW\}$
F^i	Funktionalität des Netzabschnitts mit $i = \{i = Min \vee i = Max \vee i = Soll \vee i = EW\}$
$F_{Grenz, t_{\psi_i}}^B$	Funktionalitätsgrenze zum Zeitpunkt t_{ψ_i}
v_{Soll}^B	Soll-Geschwindigkeitsgrenze im Betrieb
Kap_{Soll}^B	Soll-Kapazität im Betrieb
v_{EW}^B	Erwartungswert der Geschwindigkeit im Betrieb
Kap_{EW}^B	Erwartungswert der Kapazität im Betrieb
v_{Min}^{St}	Untere Geschwindigkeitsgrenze bei Störung und Instandsetzung
Kap_{Min}^{St}	Minimale Kapazität bei Störung und Instandsetzung
Γ	Unterhaltsstrategie
f	Frequenz der Instandsetzungsmaßnahmen mit Störungen
T	Dauer der Instandsetzungsmaßnahmen
{ Φ }	Vektor der Schadensarten φ_i
γ_i	Messgröße zur Bewertung der Schadensarten φ_i
($\underline{I}x$) _i	Vektor der Zustandsindizes x mit $i = \{i = Soll \vee i = Grenz \vee i = Max\}$
$t_{Prä}$	Eingreifzeitpunkt bei der Präventivstrategie
t_{Inter}	Eingreifzeitpunkt bei der Interventionsstrategie
$\Delta x_{Soll}^{Prä}$	Verbesserung der Zustandsindizes Ix von der Präventionsgrenze zum neuwertigen Zustand

Δx_{Min}^{Inter}	Verbesserung der Zustandsindizes Ix von der Interventionsgrenze zum neuwertigen Zustand
$t_{\psi_i}^{Prä}$	Zeitpunkt der Instandsetzungsmaßnahme ψ_i der Präventivstrategie
$t_{\psi_i}^{Inter}$	Zeitpunkt der Instandsetzungsmaßnahme ψ_i der Interventionsstrategie
t_0	Startzeitpunkt der Betrachtung
t_e	Endzeitpunkt der Betrachtung
t_B	Bezugszeitpunkt
Δx_{Min}^i	Mindestrücksetzwert der Zustandsgröße Ix bezogen auf $i = Sollwert$ oder $i = Max-Wert$
$i = Soll$	Sollwert bei Präventivstrategie
$i = Max$	Max-Wert bei Interventionsstrategie
$F_{Grenz, Soll}^B$	Grenzwert der Funktionalität
{ $\underline{\Delta x}$ } _{Min}	Vektor der Mindestrücksetzwerte der Zustandsgröße Ix bei der Präventivstrategie
{ $\underline{\Delta x}$ } _{Max}	Vektor der Mindestrücksetzwerte der Zustandsgröße Ix bei der Interventionsstrategie
{ \underline{M} } _{Total}	Matrix aller Instandsetzungsmaßnahmen
{ $\underline{M}x$ ($\underline{\Delta x}$)}	Maßnahmenmatrix { $\underline{I}x$ } zur Verbesserung der Zustandsgröße Ix
{ \underline{M} }	Maßnahmenmatrix
Ix_{Grenz}	Grenz = (Soll \vee Max)
m_i^x	Maßnahme i zur Verbesserung der Zustandsgröße Ix
{ $\underline{I}x$ } _{Grenz}	Grenzwerte für die Zustandsindizes Ix mit Grenz = (Soll \vee Max)
{ $\underline{I}x$ } _{Soll}	Eingreifgrenze für die Zustandsindizes Ix bei der Präventivstrategie
{ $\underline{I}x$ } _{Max}	Eingreifgrenze für die Zustandsindizes Ix bei der Interventionsstrategie
Δt_{ψ_i}	Halbbarkeitsdauer der Maßnahme ψ_i
Ix_1	Neuzustand oder Instandsetzungszustand
M-K	Material und Konstruktion
$V_{Volumen}$	Verkehrsvolumen
V_{Mix}	Verkehrsmix
$m_{\xi \vee v}^x$	Unterhaltsmaßnahme zugeordnet zur Verbesserung des Instandsetzungsindex x durch $\xi = Instandsetzungsmaßnahme$ oder $v = Erneuerungsmaßnahme$
$Iy_{t_{\psi_i}}^+$	Zustandsgröße Iy nach der Instandsetzung mit $m_{\xi \vee v}^x$ zum Zeitpunkt t_{ψ_i}
$Iy_{t_{\psi_i}}^-$	Zustandsgröße Iy vor der Instandsetzung zum Zeitpunkt t_{ψ_i}
Ix_1	Zustandsindex nach Durchführung der Maßnahme bei der Interventionsstrategie
$t_{\psi_i}^+$	Zeitpunkt nach dem Zeitpunkt t_{ψ_i}
$t_{\psi_i}^-$	Zeitpunkt vor dem Zeitpunkt t_{ψ_i}
$Ix_{t_{\psi_i}}^-$	Zustandsgröße Ix vor der Instandsetzung zum Zeitpunkt t_{ψ_i}
$Ix_{t_{\psi_i}}^+$	Zustandsgröße Ix nach der Instandsetzung zum Zeitpunkt t_{ψ_i}
Δx_{min}	Mindestrücksetzwert der Zustandsgröße Ix
ΔIy	Veränderung des Zustandsindex Iy
$\Delta Iy_{Zurück}$	Rücksetzeffekt auf den Zustandsindex Iy
n_x	Anzahl der möglichen Maßnahmen bei der Funktionalitätsgrenze F_{Grenz}
U_x	Unterhaltsvariante χ
$U_x(\Gamma)$	Unterhaltsvariante χ der Strategie Γ
$M_{ij}(Ix)$	Maßnahme j der Unterhaltsvariante i zur Verbesserung des Index Ix

$KBW(U_\chi)$	Kosten-Barwert der Unterhaltsvariante χ
$\Delta KBW(U^{Min})$	Zusatzkosten im Vergleich zur optimalen Unterhaltsvariante
A_j^i	Zustandsbereich j der Fahrbahn i
$\Delta I(M_{\psi_i})$	Zustandsveränderung durch die Maßnahme ψ_i
$\Delta V(M_{\psi_i})$	Veränderung der Verhaltensklasse durch die Maßnahme ψ_i

Literatur

- [1] *Girmscheid G.*: Projektabwicklung in der Bauwirtschaft – Wege zur Win-Win-Situation für Auftraggeber und Auftragnehmer. Springer Verlag, Berlin, 2004
- [2] *Girmscheid, G.*: Strategisches Bauunternehmensmanagement. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [3] *Girmscheid G.*: Angebots- und Ausführungsmanagement – Leitfaden für Bauunternehmen. Springer Verlag, Berlin, 2004
- [4] *Girmscheid, G.*: NPV-Wirtschaftlichkeitsanalysemodell – Lebenszyklusbetrachtung von kommunalen Straßenunterhalts-PPPs. In: Bauingenieur, Band 81, H. 10/2006, S. 455–463
- [5] *Girmscheid, G.*: Risikobasiertes probabilistisches LC-NPV-Modell – Bewertung alternativer baulicher Lösungen. In: Bauingenieur, Band 81, H. 09/2006, S. 394–405
- [6] EN 13306, Begriffe der Instandsetzung. Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [7] SN 469, Erhaltung von Bauwerken. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 1997
- [8] DIN 31051, Grundlagen der Instandhaltung. Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [9] SN 640900a, Erhaltungsmanagement (EM), Grundnorm. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2004
- [10] SN 640925b, Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen (EMF), Zustandserhebung und Indexbewertung. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2003
- [11] SN 640904, Erhaltungsmanagement (EM), Gesamtbewertung von Fahrbahnen, Kunstbauten und technischen Ausrüstungen: Substanz- und Gebrauchswerte. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2003
- [12] *Rafi, A.-A.; Scazziga, I.; Lindenmann, H. P.*: Erhaltungsmanagement: Gesamtbewertung der Fahrbahnen, Substanz- und Gebrauchswert. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Straßen, Bern, 2006
- [13] SN 640730b, Erhaltung von Fahrbahnen, Kopfnorm; Maßnahmenkonzept. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 1998
- [14] SN 640731b, Erhaltung bitumenhaltiger Oberbauten. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2001
- [15] SN 640733b, Erhaltung von Fahrbahnen, Oberbauverstärkung von Fahrbahnen in bituminöser Bauweise aufgrund von Deflektionsmessungen. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 1997
- [16] SN 640735b, Erhaltung Erhaltung von Betonbelägen. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 1996.
- [17] SN 640736a, Erhaltung Erhaltung von Betonbelägen, Instandsetzung und Verstärkung. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2000
- [18] SN 640908, Erhaltungsmanagement, Bewertung von Straßenabschnitten im Netz – Funktionelle Bewertung. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 1999
- [19] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.: RPE-Stra 01, Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen. Verlag der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2002
- [20] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.: Systematik der Straßenerhaltung, Reihe R, Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen. Verlag der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2001
- [21] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.: Systematik der Straßenerhaltung, Reihe A, Auswertung. Verlag der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2001
- [22] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.: Systematik der Straßenerhaltung, Reihe S, Substanzwert. Verlag der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2003
- [23] *Rafi, A.-A.; Hajdin, R.; Welte, U.*: Optimierungsprozesse im Management der Straßenerhaltung (MSE). Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Straßen, Bern, 2005
- [24] SN 640907, Erhaltungsmanagement (EM), Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2003
- [25] SN 641820, Kosten-Nutzen-Analysen im Straßenverkehr, Grundnorm. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2006
- [26] SN 640931 Erhaltungsmanagement, Erhaltungsstrategien für Fahrbahnen. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 1990
- [27] SN 640901, Zielsystem. Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 2000
- [28] *Fuller, S. K.; Petersen, S. R.*: Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program. NIST Handbook 135, 1995 Edition, Gaithersburg, 1996
- [29] *Hawk H.*: Bridge Life-Cycle Cost Analysis. NCHRP Report 483, Washington, 2003
- [30] *Boussabaine, H.; Kirkham, R.*: Whole life-cycle costing: risk and risk responses. Blackwell Publishing, Oxford, 2004
- [31] *Girmscheid, G.*: Prozessbasiertes Entscheidungsmodell für die Auswahl projektspezifischer Schalungssysteme – Teil 3: NPV-Wirtschaftlichkeitsanalyse von Bauhilfsmaterialien – Alternative Bereitstellung von Produktionseinrichtungen mit begrenzter Einsatzhäufigkeit. Forschungsbericht, IBB, ETH Zürich, 2006
- [32] *Girmscheid, G.*: Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften. Eigenverlag des IBB an der ETH Zürich, 2004
- [33] *Popper, K. R.*: Auf der Suche nach einer besseren Welt: Vorträge und Aufsätze aus 30 Jahren. Piper, München, Zürich, 2004
- [34] *Weber, M., Winkelmann, J.*: Wirtschaft und Gesellschaft. Grundriss der verstehenden Soziologie. Mohr, Tübingen, 1990
- [35] *Guba, E. G., Lincoln, Y. S.*: Competing paradigms in qualitative research. In: Denzin, N. K., and Lincoln, Y. S. (Hrsg.): Handbook of Qualitative Research. Thousand Oaks, Sage, 1994, S. 105–118
- [36] *Glaserfeld von, E.*: Radikaler Konstruktivismus. Ideen, Ergebnisse, Probleme. Suhrkamp, Frankfurt a. M., 1998
- [37] *Yin, R., K.*: Case study research: design and methods. Sage Publications, Inc., Thousands Oaks (USA), 1994
- [38] *Boulding, K.*: General Systems Theory. In: General Systems, p. 11-17, 1956
- [39] *Bertalanffy, L., von:* General System Theory, New York, 1968
- [40] *Narayan, V.*: Effective Maintenance Management. Industrial Press Inc., New York, 2004
- [41] *Gnehm, V.*: Standardisierte Erhaltungsmaßnahmen. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Straßen, Bern, unveröffentlicht