

Optimierungsmodell – Deterministische, lebenszyklusorientierte, dynamische Optimierung der Straßenunterhaltsmaßnahmen

A. Fastrich, G. Girmscheid

Zusammenfassung Bei der öffentlichen Hand, wie auch bei privaten Straßenbetreibern, besteht heutzutage die Bestrebung, das Unterhaltsmanagement ihrer Infrastrukturen zu optimieren. Im Rahmen eines Forschungsprojekts in Kooperation mit dem Schweizerischen Bundesamt für Straßen (ASTRA) wurde am Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement der ETH Zürich ein holistisches Modell für die Entwicklung und Optimierung von Erhaltungsstrategien und konkreter Erhaltungsvarianten für Straßennetze entwickelt. Das holistische LC-Erhaltungsmanagementmodell setzt sich aus drei Teilmodellen für die Definition von Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten innerhalb einer Strategie (LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell), die Bewertung der Erhaltungsvarianten auf der Grundlage einer Kosten-Barwert-Betrachtung der Stakeholderkosten (LC-Kosten-Barwert-Entscheidungsmodell) und die Optimierung der Maßnahmenauswahl für die Definition einer optimalen Erhaltungsvariante (LC-Erhaltungsoptimierungsmodell) zusammen. Die ersten beiden Teilmodelle wurden bereits in vorangegangenen Veröffentlichungen beschrieben. In diesem Beitrag soll nun das dritte Teilmodell zur Optimierung des Erhaltungsmanagements vorgestellt werden. Die Modelldefinition baut auf einer holistischen, theoriegeleiteten Systemdefinition auf, um einen korrekten und zuverlässigen Vergleich der verschiedenen Varianten sicherzustellen. Im LC-Erhaltungsoptimierungsmodell wird in einem rekursiven Entscheidungsverfahren auf Basis des Dynamischen Programmierens eine optimale Erhaltungsvariante über einen lebenszyklusorientierten Betrachtungszeitraum entwickelt.

Optimization Model – Deterministic, dynamic, life-cycle oriented optimization of street maintenance

Abstract Public authorities as well as private operators of street networks nowadays try to optimize the maintenance of their facilities. Within a research project launched by the Swiss Federal Roads Authority, the Institute of Construction and Infrastructure Management at ETH Zurich developed a holistic model for the development and optimization of maintenance strategies and specific maintenance alternatives for highway networks.

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

M.ASCE, John O. Bickel Award 2004 und 2005
Professor für Bauprozess- und Bauunternehmensmanagement
Vorsteher Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement

ETH Zürich, CH-8093 Zürich
girmscheid@ibi.baug.ethz.ch

Tel. (+41) 44 633 37 87, Fax (+41) 44 633 14 52

Dipl.-Ing. Andreas Fastrich

Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand
Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement
ETH Zürich, CH-8093 Zürich
andreas.fastrich@ibi.baug.ethz.ch

The holistic model consists of three sub-models for the definition of maintenance strategies and the development of maintenance alternatives within a strategy (LC Maintenance Strategy Development Model), the evaluation of maintenance alternatives based on a Net Present Value approach (LC Strategy Decision-Making Model) and the optimization of the measure selection to define an optimal maintenance alternative (LC Maintenance Management Optimization Model). While the first two models have already been presented in previous publications, this paper focuses on the third sub-model and the optimization of maintenance management within a given maintenance strategy. The model definition is based on a holistic and theory-based system definition to ensure a correct and reliable comparison of the different maintenance alternatives. The LC Maintenance Management Optimization Model uses dynamic programming to optimize maintenance alternatives.

1 Einleitung

Der mit dem wirtschaftlichen Fortschritt einhergehende Ausbau der Infrastruktureinrichtungen hat über die letzten Jahrzehnte in den Industrienationen zu einem umfangreichen und gut ausgebauten Bestand an Straßennetzen geführt. Diese Straßennetze stellen sowohl aufgrund der darin gebundenen Werte, als auch aufgrund des generierten Nutzens einen enormen volkswirtschaftlichen Wert dar. Durch äußere Einflüsse und infolge der Verkehrsbelastung sind die Straßennetze einer kontinuierlichen Schädigung unterworfen. Dies macht es erforderlich, die Funktionalität und Substanz der Anlagen durch kontinuierlichen Unterhalt aufrecht zu erhalten. Daraus resultiert bei den zumeist öffentlichen Straßenbetreibern ein stetig steigender Aufwand für den Straßenunterhalt, bei einer insgesamt zumeist angespannten Haushaltslage.

Eine Möglichkeit dieser Herausforderung zu begegnen und langfristig einen substanziellen Straßenerhalt mit beschränkten Budgets zu sichern, besteht in der Implementierung eines holistischen, lebenszyklusorientierten Erhaltungsmanagements mit dem Ziel die Unterhaltskosten, bei Aufrechterhaltung des gewünschten Zustandsniveaus, zu minimieren.

Das holistische Erhaltungsmanagement von Straßen und anderen Infrastruktureinrichtungen kann in drei Teile unterteilt werden: Die Entwicklung von Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten, die Wirtschaftlichkeitsanalyse und, darauf aufbauend, die Optimierung des Erhaltungsmanagements. Zu den ersten beiden Teilen wurden mit dem LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell [1] und dem LC-Kosten-Barwert-Entscheidungsmodell [2] bereits umfassende Modelle veröffentlicht. Diese Modelle bilden die Grundlage für die Optimierung des Erhaltungsmanagements und damit der Entwicklung von Erhaltungsstrate-

gien und Erhaltungsvarianten, die über den Lebenszyklus der Straße zu einer minimalen Kostenbelastung für die Stakeholder führen.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird das auf den beiden anderen Teilmodellen aufbauende LC-Erhaltungsoptimierungsmodell vorgestellt.

Die Optimierung des Erhaltungsmanagements kann in einen normativen und einen strategischen Teil unterteilt werden:

- Normativ: Vorgaben für das Erhaltungsmanagement
- Strategisch: Entwicklung der Erhaltungsstrategien und Optimierung der Erhaltungsvarianten auf der strategischen Ebene innerhalb der normativen Vorgaben

Der Fokus dieser Veröffentlichung liegt auf der strategischen Optimierung, die mit mathematischen Optimierungsverfahren gelöst werden kann. Die Entwicklung einer optimalen Strategie basiert auf den normativen Vorgaben des Betreibers und wird deduktiv auf dieser Basis mittels Optimierungs- und Entscheidungsmodell rational begründet.

Die Optimierung der Erhaltungsvarianten, d.h. die Suche nach einer optimalen Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen über den Betrachtungszeitraum setzt sich aus einer Abfolge von Einzelentscheidungen zusammen. In regelmäßigen Zeitabständen muss entschieden werden ob, und wenn ja, welche Erhaltungsmaßnahme durchgeführt werden soll. Dies führt zu einem dynamischen Entscheidungsproblem, in dem jede Einzelentscheidung den weiteren Zustandsverlauf und damit die folgenden Entscheidungen beeinflusst. Ziel der Optimierung ist es, nach dem ökonomischen Minimalprinzip, die Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen zu finden, die über einen lebenszyklusorientierten Betrachtungszeitraum zu den geringsten Kosten für alle Stakeholder führt.

Im Folgenden wird ein Optimierungsmodell auf Basis des Dynamischen Programmierens vorgestellt, mit dem im Rahmen einer deterministischen Untersuchung oder einer probabilistischen Simulation optimale Erhaltungsvarianten entwickelt werden können. Der Fokus dieser Veröffentlichung liegt auf der Modellbildung und der deterministischen Optimierung. Die probabilistische Simulation der Optimierung wird in einer folgenden Veröffentlichung ausführlich betrachtet.

2 Stand der Forschung

Die Grundlegenden Verfahren des Erhaltungsmanagements sind zwischen den unterschiedlichen Infrastruktureinrichtungen übertragbar und basieren meist auf Ansätzen, die auch in anderen Bereichen, wie z.B. beim Unterhalt von Produktionseinrichtungen, Anwendung finden [3],[4]. Im Einzelnen unterscheiden sich jedoch die jeweiligen spezifischen Anforderungen, die an das Erhaltungsmanagement gestellt werden. So spielt beispielsweise bei Brücken [5] oder auch bei Produktionseinrichtungen [4] das Ausfallrisiko bzw. die Sicherheit der Anlage eine entscheidende Rolle. Die Entwicklung von LC-Erhaltungsstrategien im Straßenunterhalt stützt sich allgemein auf die Strategiebildung im Unternehmensmanagement ab. In diesem Bereich wurden von Grant [6], Mintzberg [7] sowie Johnson und Scholes [8] grundlegende Konzepte zur strategischen Führung von Unternehmen entwickelt. Innerhalb der Vorgaben einer Erhaltungsstrategie muss der Straßenbetreiber eine optimale Erhaltungsvariante, d.h. eine optimale Abfolge von

Erhaltungsmaßnahmen finden und diese möglichst operativ umsetzen. Für die Optimierung des Straßenunterhalts sind verschiedene Optimierungsverfahren einsetzbar, die entweder auf deterministischen, streng mathematischen Algorithmen oder auf teilweise zufallsbasierten Algorithmen, wie den Genetischen Algorithmen beruhen können. Guillaumont, Durango-Cohen und Madanat entwickelten hierfür ein lineares Optimierungsmodell auf der Basis von Markov-Ketten zur Abbildung des Straßenzustands [9]. Chan, Fwa und Tan [10] sowie Ferreira, Antunes und Picanó-Santos [11] formulierten jeweils auf Genetischen Algorithmen beruhende Optimierungsmodelle. Diese Modelle fokussieren jedoch stark auf die mathematische Optimierung und sind nicht in eine holistische Systemdefinition eingebettet. In früheren Arbeiten der Autoren wurden allgemeine Strategieentwicklungsmodelle an die spezifischen Anforderungen bei der Entwicklung und Implementierung von Straßenerhaltungsstrategien angepasst und ein Modell zur Definition von Erhaltungsstrategien im Straßenunterhalt entwickelt [1],[12]. Im nächsten Schritt wurde, basierend auf einer holistischen und theoriegeleiteten Systemdefinition ein Lebenszykluskosten-Entscheidungsmodell entwickelt [2],[12]. Der letzte Teil des holistischen LC-Erhaltungsmanagementmodells ist die Optimierung der Erhaltungsvarianten, mit dem Ziel, bei Aufrechterhaltung von Funktion und Substanz des Straßennetzes, die Gesamtkosten der Stakeholder zu minimieren.

3 Forschungsmethodik

Die Entwicklung des LC-Erhaltungsoptimierungsmodells erfolgt auf den Grundlagen des hermeneutischen Wissenschaftsverständnisses für die Beobachtung und Interpretation der Realität und die darauf aufbauende Entwicklung sozio-technischer Modelle [15]. Auf Basis der Hermeneutik entwickelte Glaserfeld [14] das konstruktivistische Wissenschaftsparadigma, das für konstruktivistische Modelle die Viabilität und die intendierte Zielerreichung als Gütekriterien definiert. Gemäß dem konstruktivistischen Wissenschaftsparadigma wird die Validität des entwickelten Optimierungsmodells durch Einbettung in die kybernetische Systemtheorie [15],[16] sichergestellt und durch den Realisierbarkeitstest nachgewiesen. Zur Sicherung der Validität wurde das Modell denklogisch-deduktiv auf der Basis mathematischer Grundsätze entwickelt und unter Einbezug der Entscheidungstheorie [17] sowie Management- und Simulationstheorien [18],[19],[20] wissenschaftlich abgesichert. Die Reliabilität des Modells wurde durch Realisierbarkeitstests im Rahmen von Beispielanwendungen nachgewiesen. Die Güteprüfung des LC-Erhaltungsoptimierungsmodells wird durch Triangulation aus Viabilität, Validität und Reliabilität sichergestellt.

4 Systemdefinition und Systemabgrenzung

Mit der Systemdefinition und Systemabgrenzung wird der valide theoretische Bezugsrahmen für das LC-Erhaltungsmanagementmodell definiert und das Modell in den Gesamtkontext des Straßenunterhalts eingeordnet. Dabei wird auf die Grundlagen der Allgemeinen Systemtheorie [13] zurückgegriffen. Die Systemabgrenzung erfolgt aufgrund fehlender natürlicher Systemgrenzen in den folgenden viablen Dimensionen [1],[21]:

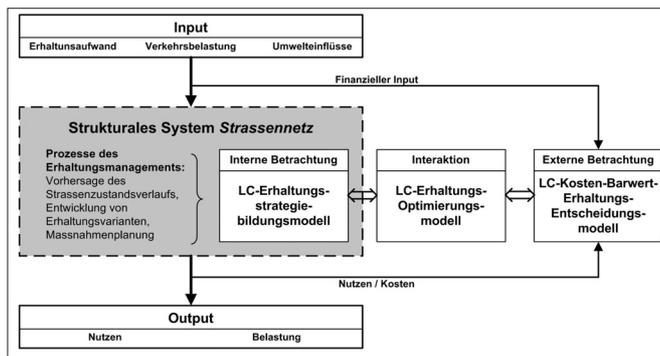


Bild 1. Einordnung des LC-Erhaltungsoptimierungsmodell in die Systemlandschaft und die bereits entwickelten Strategieentwicklungs- und Entscheidungsmodelle

Fig. 1. Classification of the LC maintenance management optimization model in the system landscape and the strategy development and decision-making models that have already been developed

- Inhaltliche Dimension
- Räumliche Dimension
- Zeitliche Dimension

Bei dem betrachteten System des Straßennetzes handelt es sich um ein offenes System, d.h. es gibt Input in und Output aus dem System (Bild 1). Damit ist das System einer ständigen dynamischen Veränderung unterworfen. Der Input in das System kann sowohl einen positiven Einfluss (z.B. Erhaltungsaufwand) als auch einen negativen Einfluss (z.B. Verkehrsbelastung, Umwelteinflüsse) auf den Systemzustand haben. Der Output des Systems besteht aus dem Gesamtnutzen des Straßennetzes für die Volkswirtschaft sowie den Belastungen für Nutzer (Zeitverlust, Unfälle, etc.) und indirekt betroffene Dritte (z.B. Lärmbelastung, CO₂-Ausstoß, Unfälle etc.).

Inhaltliche Dimension:

In der inhaltlichen Systemdefinition wird allgemein der Inhalt und der Umfang des betrachteten Systems definiert. Im vorliegenden Fall wird ein abgrenzbares Straßennetz unter dem Fokus des Straßenunterhalts betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass das System bei Beginn der Betrachtung bereits existiert und auch nach Ende des Betrachtung weiter bestehen bleibt (kein Neubau, kein Rückbau). In einem ersten Schritt wird zunächst auf Ausserortsstraßen fokussiert, die entwickelten Modelle ließen sich jedoch auch auf den Innerortsbereich erweitern.

Räumliche Dimension:

In der räumlichen Dimension wird der Umfang des betrachteten Systems in horizontaler und vertikaler Ebene definiert. In der horizontalen Ebene sind der Umfang und die Grenzen des betrachteten Straßennetzes festzulegen. Vertikal gesehen, wird der Straßenkörper mit allen bituminös oder zementgebundenen Schichten betrachtet, der Straßenunterbau wird nicht betrachtet.

Zeitliche Dimension:

In der zeitlichen Dimension bestehen bei den betrachteten Systemen zunächst keine natürlichen Systemgrenzen. Es muss also ein sinnvoller Zeitabschnitt aus dem Gesamtlebenszyklus des Straßennetzes (der durch laufenden Unterhalt quasi unendlich ist) abgegrenzt werden. Eine sinnvolle Zeitspanne für die lebenszyklusorientierte Betrachtung des Straßenunterhalts sollte mehrere Erhaltungszyklen umfas-

sen, d.h. den gesamten Einflussbereich mehrerer Erhaltungsmaßnahmen abdecken (ca. 30–50 Jahre).

Die Begrenzung des Betrachtungszeitraums auf einen festen Betrachtungszeitraum führt zwangsläufig zu Abgrenzungsproblemen an den zeitlichen Systemgrenzen. Während im Anfangszeitpunkt für alle Varianten ein einheitlicher Straßenzustand vorliegt, führt die unterschiedliche Entwicklung des Straßenzustands über den Betrachtungszeitraum in den verschiedenen Varianten zu Unterschieden in Funktionalität und Substanz der Straße im Endzeitpunkt. Ein objektiver Vergleich verschiedener Erhaltungsvarianten ist daher nur möglich, wenn diese Unterschiede im Endzeitpunkt des Betrachtungszeitraums finanziell ausgeglichen werden. Dies führt zu Abgrenzungskosten, die in der Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt werden müssen [2],[21].

4.1 Einordnung des LC-Erhaltungsoptimierungsmodells in die Systemlandschaft

Das holistische LC-Erhaltungsmanagementmodell setzt sich aus drei sich ergänzenden Teilmodellen zusammen:

- LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell
- LC-Kosten-Barwert-Entscheidungsmodell
- LC-Erhaltungsoptimierungsmodell

Die Entwicklung von lebenszyklusorientierten Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell sowie die Wirtschaftlichkeitsanalyse im LC-Kosten-Barwert-Entscheidungsmodell wurden bereits in früheren Veröffentlichungen beschrieben [1], [2]. Das LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell stellt die internen Abläufe im betrachteten System dar. Unter Berücksichtigung der normativen Vorgaben, die die gesellschaftlichen Anforderungen an das Straßennetz abbilden, werden mit Hilfe dieses Modells lebenszyklusorientierte Erhaltungsstrategien und darauf aufbauende Erhaltungsvarianten definiert. Das LC-Kosten-Barwert-Entscheidungsmodell bildet die externe Betrachtung des Systems ab. In einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsanalyse wird der finanzielle Input ins System und der kostenmäßig bewertete Output aus dem System gegenübergestellt und über den Betrachtungszeitraum der Gesamt-Kosten-Barwert aller Stakeholderkosten der verschiedenen Varianten berechnet.

Der Fokus dieser Veröffentlichung liegt auf dem LC-Erhaltungsoptimierungsmodell, in dem die Interaktion zwischen der lebenszyklusorientierten Variantendefinition und der wirtschaftlichen Bewertung dieser Varianten abgebildet und zu einer Gesamtoptimierung des Erhaltungsmagements zusammengeführt wird.

5 Optimierungsmodell

Das Optimierungsproblem, eine optimale Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen über einen lebenszyklusorientierten Betrachtungszeitraum zu finden, stellt ein dynamisches Entscheidungsproblem dar, in dem jede Einzelentscheidung die zukünftige Entwicklung des Systems und damit die Folgeentscheidungen beeinflusst. Dynamische Entscheidungsprobleme beruhen auf einer rekursiven Entscheidungsfindung, in der die Gesamtentscheidung in einzelne Entscheidungsschritte aufgeteilt wird. Die Gesamtheit der einzelnen Entscheidungen ergibt eine Lösungsvariante für das Gesamtproblem. Bild 2 zeigt den prinzipiellen Ablauf der dynamischen Entscheidungsfindung. In einem rekursiven Ablauf trifft der Entscheidungsträger in jedem Schritt

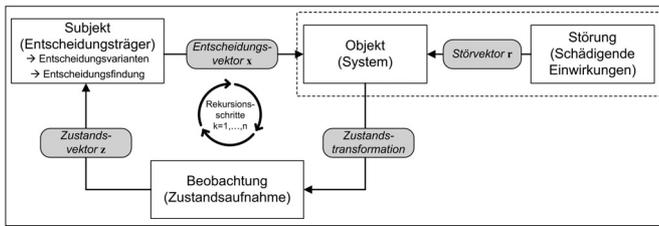


Bild 2. Grundmodell eines dynamischen Entscheidungsmodells (in Anlehnung an Schneeweiss [3])

Fig. 2. Basic dynamic decision-making model (based on Schneeweiss [3])

4

eine Entscheidung, in welcher Form auf das betrachtete System eingewirkt werden soll. Diese Entscheidung basiert auf der Beobachtung des aktuellen Zustands des Systems und der schädigenden Einwirkung durch äußere Einflüsse. Die Entscheidung in einem Rekursionsschritt k beeinflusst die weitere Zustandsentwicklung und damit den Zustand und die Entscheidungsfindung x in den folgenden Rekursionsschritten $k + 1, k + 2, \dots, n$. Diese Rekursionsschleife wird in regelmäßigen Zeitabschnitten $[t_k; t_{k+1}]$ der Länge $t^* = t_{k+1} - t_k$ durchlaufen und so eine Entscheidungsabfolge über den gesamten Betrachtungszeitraum definiert.

5.1 Dynamisches Entscheidungsmodell

Als Grundlage der Optimierung muss zunächst das zugrundeliegende Entscheidungsmodell definiert werden. Im Entscheidungsmodell werden die folgenden Punkte definiert:

- Parameter/Elemente der Optimierung
- Bewertung der möglichen Varianten
- Randbedingungen der Optimierung

Die Optimierung des Erhaltungsmanagements erfolgt monokriteriell, d.h. nach einer Zielgröße. Nach dem ökonomischen Minimalprinzip soll ein Minimum aller Stakeholderkosten der verschiedenen Handlungsalternativen gefunden werden.

Das dynamische Entscheidungsmodell setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen, die im Folgenden detailliert betrachtet werden [2]:

- Zustandsvektor
- Entscheidungsvektor
- Störvektor
- Zustandstransformationsgleichung
- Zielfunktion

Zustandsvektor

Die Zustandsaufnahme im Straßenerhaltungsmanagement erfolgt gemäß Schweizer Norm [5] in den fünf Einzelindizes I1 bis I5, die den Straßenzustand in den Bereichen Oberflächenschäden (I1), Ebenheit in Längsrichtung (I2), Ebenheit in Querrichtung (I3), Griffbarkeit (I4), Tragfähigkeit (I5) in einem Intervall $Ix \in [0;5]$ beschreiben. Damit setzt sich der Zustandsvektor z_k in jedem Entscheidungsschritt k wie folgt zusammen [1]:

$$z_k = Ix_k \quad (k = 0, 1, \dots, n \quad x = 1, 2, \dots, 5 \quad Ix_k \in [0;5])$$

Entscheidungsvektor

Die Entscheidungen im Erhaltungsmanagement betreffen die Zeitpunkte und die Auswahl der Erhaltungsmaßnahmen über den Betrachtungszeitraum. In einem rekursiven Optimierungsverfahren, das in Entscheidungsschritten k über

eine regelmäßige Abfolge von Entscheidungszeitpunkten läuft, wird in jedem Entscheidungszeitpunkt ein Entscheidungsvektor x_k definiert, der lediglich einen Parameter, nämlich die gewählte Erhaltungsmaßnahme m_i^x enthält. Der Zeitpunkt der gewählten Maßnahme ist durch die jeweiligen Entscheidungsschritte k und dem zugeordneten Entscheidungszeitpunkt definiert. Die Alternativenmenge $\{X_k\}$, aus der die Erhaltungsmaßnahme gewählt werden kann, enthält alle Maßnahmen, die bei dem im Entscheidungsschritt k vorliegenden Straßenzustand anwendbar sind.

Damit ergibt sich der Entscheidungsvektor im Entscheidungsschritt k wie folgt [1], [2]:

$$x_k = x_k$$

mit

$$x_k \in \{X_k\} = \left\{ m_i^x \mid Ix_k \in [Ix^{min}(m_i^x); Ix^{max}(m_i^x)], 0 \text{ wenn gilt: } Ix_k > Ix^{grenz} \right\}$$

- mit: x_k = Maßnahmenentscheidung im Entscheidungsschritt k
- X_k = Alternativenmenge im Entscheidungsschritt k
- m_i^x = Maßnahme i zur Verbesserung des Zustandsindex x
- Ix_k = Straßenzustand im Entscheidungsschritt k
- $Ix^{min/max}(m_i^x)$ = Untere/obere Grenze des Anwendungsbereichs der Maßnahme m_i^x
- Ix^{grenz} = Mindestbetriebsstandard/Eingreifgrenze

Wird im Entscheidungsschritt k eine Erhaltungsmaßnahme eingeplant, so erhält der Entscheidungsvektor den Eintrag $x_k = m_i^x$. Wird keine Maßnahme gewählt, so ergibt sich der Eintrag $x_k = 0$.

In Abhängigkeit von der getroffenen Entscheidung x_k , ergeben sich entsprechende Auswirkungen $\Delta Ix(x_k)$ auf den Zustand des betrachteten Systems. Wird keine Maßnahme gewählt ($x_k = 0$), so gilt $\Delta Ix(x_k = 0) = 0$.

Zusätzliche Randbedingungen:

Zusätzlich zu den rein technischen Randbedingungen, die durch die Anwendbarkeit der Maßnahmen vorgegeben werden, können auch strategische Vorgaben bezüglich bevorzugter oder nicht als sinnvoll erachteter Maßnahmen, Mindestbetriebsstandards oder Budgetvorgaben die Alternativenmenge $\{X_k\}$ beeinflussen. Derartige Vorgaben können durch zusätzliche Randbedingungen R , die die Alternativenmenge X_k einschränken, umgesetzt werden.

Störvektoren/Umwelteinflüsse

Die Störvektoren im Erhaltungsmanagement bilden die Veränderungen des betrachteten Systems aufgrund von äußeren Einflüssen wie Verkehrsbelastung oder Umwelteinflüsse ab. Der Störvektor gibt die Veränderung des Systems von einem Entscheidungsschritt zum nächsten in Abhängigkeit von den Einwirkungen aufs System an.

$$\mathbf{r}_k = \Delta Ix(t_{k+1} - t_k)$$

mit: \mathbf{r}_k = Störvektor im Entscheidungsschritt k
 $\Delta Ix(t_{k+1} - t_k)$ = Straßenzustandsänderung in den Indizes Ix infolge Verkehrsbelastung und Umwelteinflüssen vom Entscheidungsschritt k zum Entscheidungsschritt $k + 1$

Die Ausprägung des Störvektors in den einzelnen Entscheidungsschritten muss jeweils in Abhängigkeit vom aktuellen Straßenzustand und den jeweiligen Einwirkungen ermittelt werden. Die Betrachtung des Zustandsverlaufs kann deterministisch auf der Grundlage von Zustandsverlaufskurven oder probabilistisch mit Hilfe von Markov-Ketten erfolgen.

Zustandstransformationsgleichung

Mithilfe der Zustandstransformationsgleichung wird in jedem Entscheidungsschritt der Zustandsvektor \mathbf{z}_k in den folgenden Zustandsvektor \mathbf{z}_{k+1} überführt. Es wird also die Entwicklung des Straßenzustands infolge der im Störvektor \mathbf{r}_k abgebildeten äußeren Einflüsse und der Einflüsse der getroffenen Entscheidungen \mathbf{x}_k , d.h. der gewählten Maßnahmen, berechnet.

Der Zustand \mathbf{z}_{k+1} im Entscheidungsschritt $k + 1$ ergibt sich aus dem vorhergehenden Zustand \mathbf{z}_k wie folgt:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_{k+1} &= \mathbf{z}_k + \Delta \mathbf{z}(\mathbf{x}_k) + \Delta \mathbf{z}(\mathbf{r}_k) \\ &= Ix_k + \Delta Ix(\mathbf{x}_k) + \Delta Ix(\mathbf{r}_k) \end{aligned} \quad (1)$$

mit: $\Delta \mathbf{z}(\mathbf{x}_k) = \Delta Ix(\mathbf{x}_k)$ = Zustandsänderung infolge der getroffenen Entscheidungen \mathbf{x}_k im Entscheidungsschritt k

$\Delta \mathbf{z}(\mathbf{r}_k) = \Delta Ix(\mathbf{r}_k)$ = Zustandsänderung infolge des Störvektors \mathbf{r}_k im Entscheidungsschritt k

Zielfunktion des Entscheidungsproblems

Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Kosten aller Stakeholdergruppen des Straßenunterhalts. Daher wird der Kosten-Barwert aller Stakeholderkosten als Zielfunktion der Optimierung herangezogen werden.

Für die Zielfunktion gilt also [2, 4]:

$$\begin{aligned} \text{Min } KBW_{t_B}^{\chi} &= \\ &= \sum_{t=1}^{t_e} \left(\frac{K_t^{B,\chi}}{(1+q^B)^{(t-t_B)}} + \frac{K_t^{N,\chi}}{(1+q^N)^{(t-t_B)}} + \frac{K_t^{D,\chi}}{(1+q^D)^{(t-t_B)}} \right) + \\ &+ \frac{K_{t_e}^{\chi, Abgr}}{(1+q^B)^{(t_e-t_B)}} \end{aligned} \quad (2)$$

mit: $KBW_{t_B}^{\chi}$ = Kosten-Barwert der Erhaltungsvariante

$KBW_t^{B/N/D/Abgr,\chi}$ = Kosten des Betreibers/der Nutzer/Dritter bzw. Abgrenzungskosten der Erhaltungsvariante

$q^{B/N/D}$ = Diskontierungszinssatz für Betreiberkosten/Nutzerkosten/Kosten Dritter

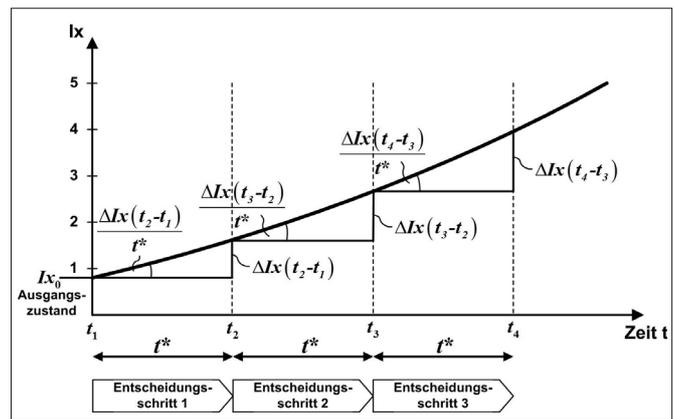


Bild 3. Sequentielle Einteilung der stetigen Verlaufscurve zur Abbildung der kontinuierlichen Zustandsverschlechterung für die Abbildung des Strassenzustands in diskreten Zeitschritten

Fig. 3. Sequential classification of the constant progress curve for mapping continual deterioration for mapping the condition of the road in discrete increments

5.1.1 Abbildung des Straßenzustandsverlaufs im Entscheidungsmodell

In dem der Optimierung zugrundeliegenden dynamischen Entscheidungsmodell erfolgt die Abbildung der Zustandsentwicklung in Form des Störvektors in diskreten Schritten über regelmäßige Entscheidungszeitpunkte. Die Ausprägung des Störvektors in den einzelnen Entscheidungsschritten hängt dabei jeweils vom aktuellen Straßenzustand und den gewählten Erhaltungsmaßnahmen ab. Die Beschreibung des Straßenzustandsverlaufs kann im Entscheidungsmodell deterministisch, d.h. mit fixen Zustandsverläufen oder probabilistisch, d.h. unter Berücksichtigung der Unsicherheiten bezüglich des Zustandsverlaufs erfolgen. Im Folgenden wird zunächst die deterministische Betrachtung, bei der die diskreten Zustandsänderungen aus allgemeinen Verlaufskurven des Straßenzustandsverlaufs ermittelt werden, vorgestellt. Die probabilistische Betrachtung auf der Basis von Markov-Ketten ist Gegenstand einer folgenden Veröffentlichung.

Im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell [1] werden die Zustandsverläufe des Systems in Form von stetigen Verlaufskurven dargestellt. Diese Verlaufskurven werden auch im LC-Erhaltungsoptimierungsmodell herangezogen. Die Abbildung des Erhaltungsmanagements in einem dynamischen Entscheidungsmodell mit regelmäßigen Zeitschritten t^* bedeutet allerdings, dass die zeitliche Betrachtung des Zustandsverlaufs in diskreten Schritten erfolgt. Der Zustandsverlauf zwischen zwei Entscheidungsschritten wird mit einer Geraden mit der Steigung

$$m = \frac{\Delta Ix(t_{k+1} - t_k)}{t^*}$$

angenähert. Da im sequentiellen Ablauf des dynamischen Entscheidungsproblems keine Zwischenzustände zwischen zwei Entscheidungszeitpunkten betrachtet werden, bildet diese polygonale Näherung den Zustandsverlauf exakt ab. Ausgehend vom Ausgangszustand Ix_0 wird die Verlaufskurve des Straßenzustands in zeitliche Intervalle der Länge t^* geteilt. Für die einzelnen Entscheidungsschritte ergibt sich dann jeweils eine Steigung m und eine Zustandsänderung

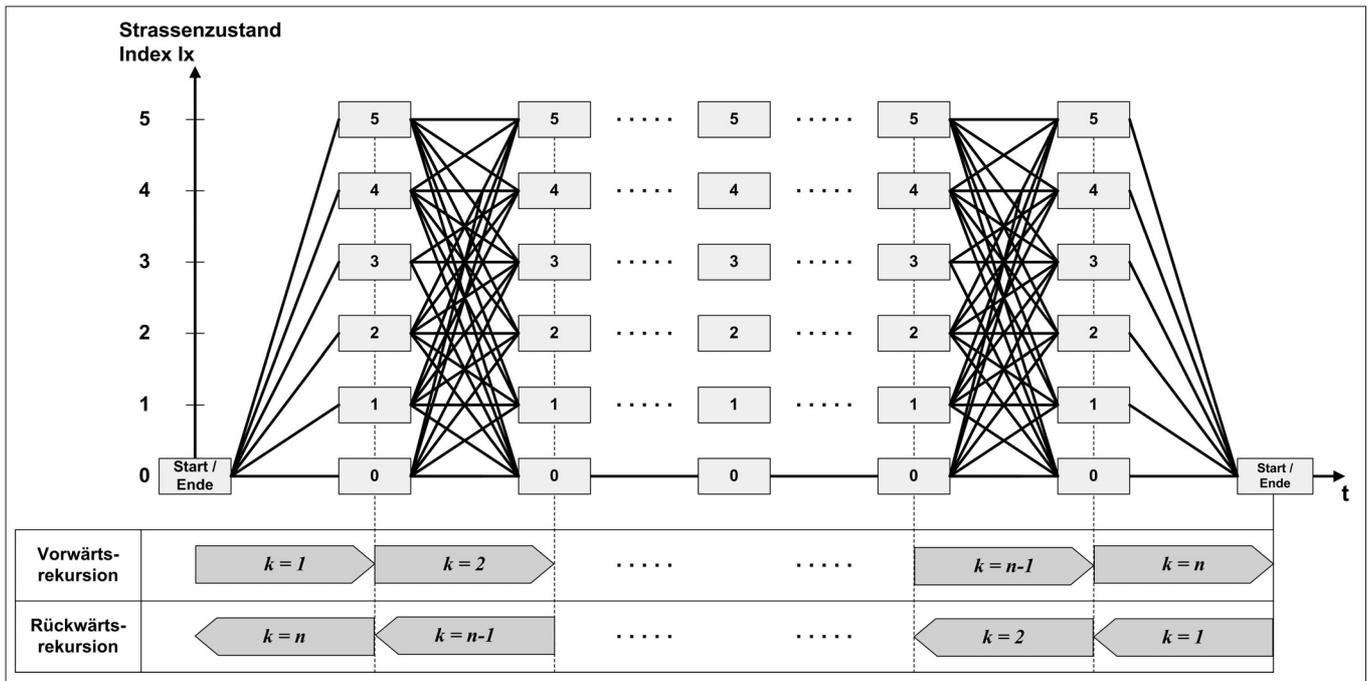


Bild 4. Grundraster des Dynamischen Programmierens durch Vorwärts- oder Rückwärtsrekursion
 Fig. 4. Basic grid for dynamic programming using forward or reverse recursion

$\Delta lx (t_{k+1} - t_k)$ (Bild 3). Diese Zustandsänderung wird im Störvektor r_k abgebildet. Diese Vorgehen muss nach jeder Erhaltungsmaßnahme und den daraus resultierenden Zustandsänderungen wiederholt werden.

5.2 Dynamisches Programmieren

Auf der Basis des zuvor definierten dynamischen Entscheidungsmodells erfolgt die Optimierung mit Hilfe des Dynamischen Programmierens. Die rekursive Optimierung der Erhaltungsvarianten kann dabei vorwärts (Vorwärtsrekursion) oder rückwärts (Rückwärtsrekursion) über den Betrachtungszeitraum erfolgen. Dabei wird in jedem Schritt entweder der günstigste Pfad vom Anfangszeitpunkt bis zum betrachteten Entscheidungsschritt (Vorwärtsrekursion) oder der günstigste Restpfad vom betrachteten Entscheidungsschritt bis zum Endzeitpunkt (Rückwärtsrekursion) gesucht. Jeder weitere Entscheidungsschritt bezieht sich auf die zuvor ermittelten optimalen Pfade zu den Zustandsausprägungen im vorangegangenen Entscheidungsschritt. Welcher der Pfade insgesamt der optimale ist, entscheidet sich erst im letzten Entscheidungsschritt, wenn alle Varianten wieder zu einem einheitlichen Endzustand zusammengeführt werden. Die Effektivität des Verfahrens ergibt sich daraus, dass in jedem Entscheidungsschritt eine Vielzahl suboptimaler Pfade aussortiert werden können. Nach dem Optimalitätsprinzip von Bellmann [24] ist jeweils nur der aktuelle Zustand eines Systems für die weiteren Entscheidungen ausschlaggebend, der Weg zu diesem Zustand hat keinen Einfluss. Daher müssen nur die jeweils günstigsten Pfade zu den einzelnen möglichen Zustandsausprägungen im Entscheidungsschritt k berücksichtigt werden. Ein Pfad, der sich bis zum Entscheidungsschritt k als suboptimal erwiesen hat, kann auch in den weiteren Schritten nicht mehr optimal werden.

Die Optimierung beginnt jeweils mit einem Initialisierungsschritt und erfolgt dann in einzelnen Rekursionsschritten über den gesamten Betrachtungszeitraum.

Dynamisches Programmieren durch Vorwärtsrekursion:
 Initialisierung: $J_0 (Ix_0) = 0$

Rekursion:

$$J_k (Ix_k) := \min_{x_k \in X_k(Ix_k)} \left(KBW (Ix_k, x_k) + J_{k-1} \left(f_i (Ix_i, x_i) \Big|_{i=0}^{k-1} \right) \right)$$
 mit $T = n \cdot t^*$ und $t^* = t_{k+1} - t_k$ (3)

Dynamisches Programmieren durch Rückwärtsrekursion:

Initialisierung: $J_{n+1} (Ix_{n+1}) = 0$
 Rekursion:

$$J_k (Ix_k) := \min_{x_k \in X_k(Ix_k)} \left(KBW (Ix_k, x_k) + J_{k+1} \left(f_i (Ix_i, x_i) \Big|_{i=n}^{k+1} \right) \right)$$
 mit $T = n \cdot t^*$ und $t^* = t_{k+1} - t_k$ (4)

- mit: $J_k (Ix_k)$ = Zielfunktion der Optimierung in Abhängigkeit von der Ausprägung des Straßenzustands
- $KBW (Ix_k, x_k)$ = Kosten-Barwert im Rekursionsschritt in Abhängigkeit von der Ausprägung des Straßenzustands und dem Entscheidungsvektor
- $f_i (Ix_i, x_i)$ = Funktion der Kosten-Barwerte der vorangegangenen Rekursionsschritte

Mit diesem Vorgehen wird in jedem Entscheidungsschritt ein optimaler Pfad zu allen möglichen Zustandsausprägungen ermittelt (Bild 5). Im letzten Schritt werden alle alternativen Pfade auf einen gemeinsamen Endzustand (Vorwärtsrekursion) bzw. Anfangszustand (Rückwärtsrekursion) zusammengeführt. Damit werden die Systemgrenzen für alle Varianten vereinheitlicht und die zeitliche Systemabgrenzung umgesetzt. Der Pfad, der die insgesamt günstigste Variante über den Betrachtungszeitraum und den Weg vom Anfangszustand zum Endzustand ergibt, stellt die optimale Erhaltungsvariante dar.

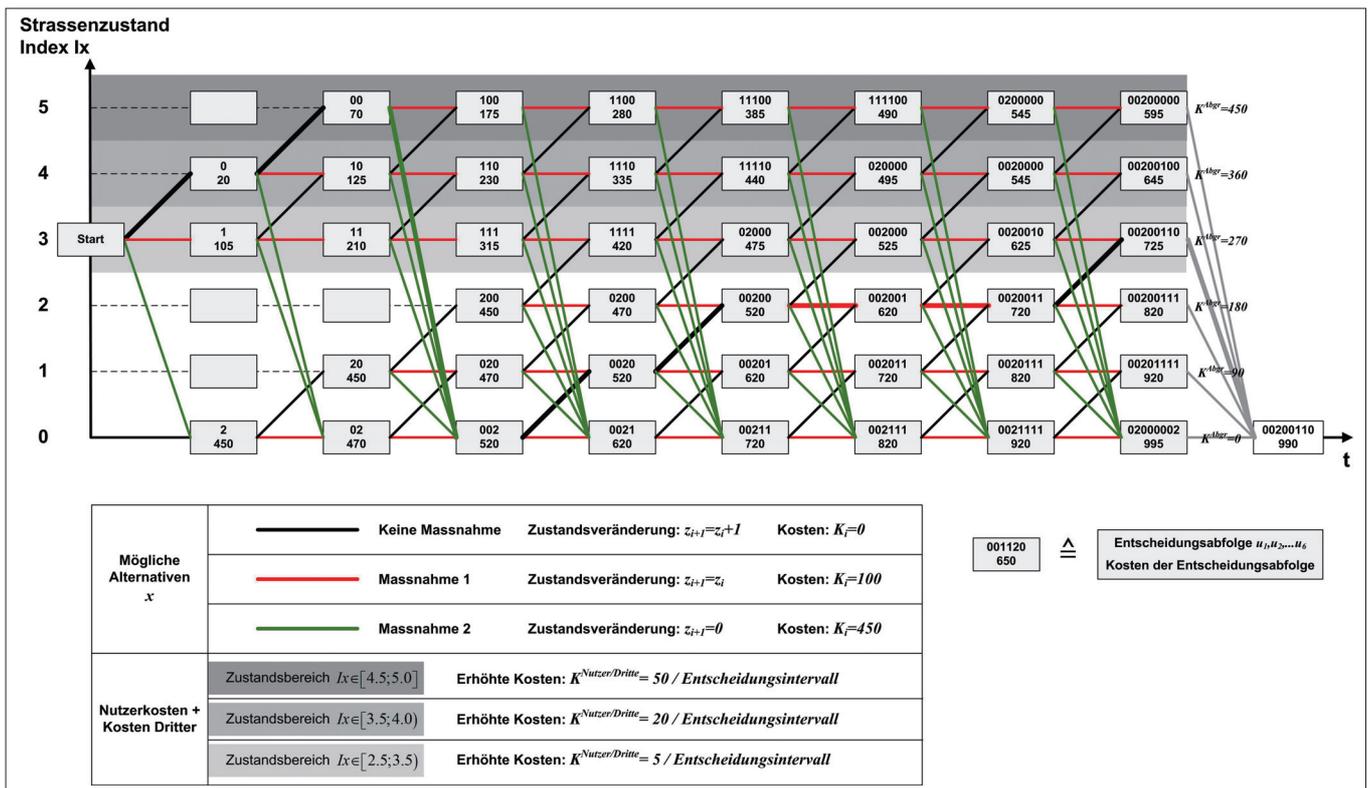


Bild 5. Beispielanwendung des LC-Erhaltungsoptimierungsmodell – Deterministische, dynamische Optimierung einer Massnahmenabfolge über acht Rekursionsschritte

Fig. 5. Example of the application of the LC maintenance management optimization model - Deterministic, dynamic optimization of a sequence of measures over eight recursion steps

Effizienz des Optimierungsverfahrens

Jedes Optimierungsverfahren muss für praktische Anwendungen eine gewisse Effizienzsteigerung gegenüber dem einfachsten Referenzfall, alle möglichen Varianten zu vergleichen, aufweisen, um seinen Einsatz zu rechtfertigen. Bei einer rekursiven Variantenentwicklung über n Entscheidungsschritte ergeben sich bei m möglichen Zustandsausprägungen und einem angenommenen beliebigen Zustandswechsel in jedem Entscheidungsschritt $v = m^{2n}$ theoretisch mögliche Varianten. Dadurch, dass beim Dynamischen Programmieren jeweils nur der optimale Weg zu den möglichen Zustandsausprägungen eines Entscheidungsschritts berücksichtigt werden muss, reduziert sich die Zahl der zu untersuchenden Varianten auf $v = m^2 \cdot n$. Mit einer Steigerung der Rekursionsschritte n wächst der Rechenaufwand bei Dynamischen Programmieren nicht exponentiell wie im Referenzfall, sondern nur linear mit der Anzahl der Rekursionsschritte. Bei den betrachteten langen (lebenszyklusorientierten) Betrachtungszeiträumen ergeben sich also durch den Einsatz des Optimierungsverfahrens erhebliche Effizienzvorteile für die Ermittlung des optimalen Erhaltungspfads bei definierten Einwirkungen.

5.2.1 Anwendungsbeispiel Dynamisches Programmieren

Im Folgenden wird das zuvor beschriebene Verfahren des Dynamischen Programmierens in einem Anwendungsbeispiel dargestellt. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit wurde eine stark vereinfachte Modellkonfiguration gewählt, an der sich aber dennoch das prinzipielle Vorgehen bei der Optimierung gut darstellen lässt.

Betrachtet wird ein System, das sechs Zustandswerte $z_k = lx_k \in \{0,1,2,3,4,5\}$ annehmen kann. Die Zustandsentwicklung wird vereinfachend linear, d.h. mit einem konstanten Störvektor $r_k = 1$ angenommen. Im Entscheidungsvektor stehen in jedem Entscheidungsschritt drei Optionen zur Auswahl:

- Keine Maßnahme ($m_i^x = 0$), Zustandsänderung entspricht dem Störvektor, Kosten $K_i = 0$
- Maßnahme 1 ($m_i^x = 1$), Zustandsänderung $\Delta lx = -1$, d.h. zusammen mit dem Störvektor bleibt der Straßenzustand konstant, Kosten $K_i = 100$
- Maßnahme 2 ($m_i^x = 2$), der Straßenzustand wird unabhängig vom Ausgangszustand auf $lx = 0$ (neuwertig) gebracht, Kosten $K_i = 450$

Neben den Maßnahmekosten werden ab dem Grenzzustand $lx^{grenz} = 5$ erhöhte Kosten für Nutzer und Dritte angesetzt (Bild 5). In Abhängigkeit vom aktuellen Zustandsniveau werden in jedem Entscheidungsschritt die entsprechenden Kosten der Nutzer und Dritten $K^{Nutzer/Dritte}$ berücksichtigt. Die Optimierung erfolgt über acht Rekursionsschritte. Bild 5 zeigt in jedem Rekursionsschritt die optimalen Pfade zu den möglichen Zustandsausprägungen sowie den zugeordneten Zielfunktionswert (Kosten). Die Optimale Maßnahmenfolge, d.h. die optimale Erhaltungsvariante (fett dargestellt in Bild 5) ergibt sich zu $U_{\chi^{opt}} = \{m_i^x = \{0, 0, 2, 0, 0, 1, 1, 0\}\}$ mit einem Gesamtkostenwert von $K_{\chi^{opt}} = 990$.

6 Fazit

Mit dem LC-Erhaltungsoptimierungsmodell wurde der dritte Teil des holistischen LC-Erhaltungsmanagementmodells vorgestellt, in dem die Ergebnisse der beiden anderen Teilmodelle [1], [2] zusammengeführt und zu einer Optimierung des Erhaltungsmanagements erweitert werden. Dem Entscheidungsträger im Straßenunterhalt wird mit dem Gesamtmodell ein Tool zur Definition, Bewertung und Optimierung von Erhaltungsstrategien und darauf aufbauenden Erhaltungsvarianten bereitgestellt. Mit der ergänzenden probabilistischen Simulation des Erhaltungsmanagements, die in einer folgenden Veröffentlichung dargestellt wird, wird es zusätzlich möglich, sämtliche Unsicherheiten bezüglich der Prognosen von Zustands- und Kostenwerten in die Betrachtung einzubeziehen und so zu einer fundierteren Entscheidungsfindung zu kommen.

8

Literatur

- [1] *Girmscheid, G.*: Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Strategiebildung und Unterhaltsvarianten für Straßennetze. Bauingenieur, 2007. 82 (7/8): 346–355.
- [2] *Girmscheid, G.*: Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Unterhaltsstrategien für Straßennetze. Bauingenieur, 2007. 82 (7/8): 356–366.
- [3] *Gertsbakh, I.B.*: Models of preventive maintenance. 1977, Amsterdam a.o.: North-Holland. XIV, 257.
- [4] *Narayan, V.*: Effective maintenance management - Risk and reliability strategies for optimizing performance. 2004, New York: Industrial Press. 246.
- [5] *Liu, M. and D.M. Frangopol*: Multiobjective Maintenance Planning Optimization for Deteriorating Bridges Considering Condition, Safety, and Life-Cycle Cost. Journal of Structural Engineering, 2005. 131(5): 833–842.
- [6] *Grant, R.M.*: Contemporary strategy analysis. 5th ed. 2005, Malden, Mass.: Blackwell Publishing. 548.
- [7] *Mintzberg, H.*: The strategy process concepts, contexts, cases. 4th ed. 2003, Harlow: Pearson Education. 489.
- [8] *Johnson, G. and K. Scholes*: Exploring corporate strategy. 6th ed. 2002, London: Prentice Hall. 1082.
- [9] *Guillaumont, V.M., P.L. Durango-Cohen, and S.M. Madanat*: Adaptive Optimization of Infrastructure Maintenance an Inspection Decisions under Performance Model Uncertainty. Journal of Infrastructure Systems, 2003. 9(4): 133–139.
- [10] *Chan, W.T., T.F. Fwa, and C.Y. Tan*: Road-Maintenance Planning Using Genetic Algorithms. Journal of Transportation Engineering, 1994. 120 (5): p. 693–709.
- [11] *Ferreira, A., A. Antunes, and L. Picado-Santos*: Probabilistic Segment-linked Pavement Management Optimization Model. Journal of Transportation Engineering, 2002. 128 (6): p. 568–577.
- [12] *Girmscheid, G. and A. Fastrich*: Maßnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen – Zusatzkosten infolge Vor- oder Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen. 2010, Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Straßen.
- [13] *Girmscheid, G.*: Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften. 2nd ed. 2007, Zürich: Eigenverlag des IBI, ETH Zürich.
- [14] *Glaserfeld, E.v.*: Radikaler Konstruktivismus Ideen, Ergebnisse, Probleme. 2. Aufl. ed. 1998, Frankfurt a.M.: Suhrkamp. 375.
- [15] *Bertalanffy, L.v.*: General System Theory – Foundations, development, applications. Revised Ed. ed. 1969, New York: George Braziller. 295.
- [16] *Boulding, K.*: General Systems Theory, in General systems : year-book of the International Society for the Systems Sciences. 1956, International Society for the Systems Sciences: New York. 11–17.
- [17] *Schneeweiss, H.*: Das Grundmodell der Entscheidungstheorie. Statistische Hefte, 1966. 7: 178–220.
- [18] *Baddeley, M.C.*: Investment theories and analysis. 2004, Houndmills, Basingstoke: Palgrave Macmillan. 258.
- [19] *Bleicher, K.*: Das Konzept Integriertes Management. Vierte, rev. und erw. Aufl. ed. 1996, Frankfurt/Main etc.: Campus-Verlag. 606.
- [20] *Curran, M.W.*: Range Estimating – Measuring Uncertainty and Reasoning with Risk. Cost Engineering, 1998. 31: 18–26.
- [21] *Fastrich, A. and G. Girmscheid*: Public Private Partnership for Maintenance Activities – System Boundaries for a Life Cycle Oriented Economic Efficiency Analysis, in CIB World Building Congress, T.C. Haupt and R. Milford, Editors. 2007, CIB: Cape Town.
- [22] *Schneeweiss, C.*: Dynamisches Programmieren. 1974, Würzburg Wien: Physica-Verlag. 226.
- [23] *SN 640925b*: Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) – Zustandserhebung und Indexbewertung. 2003, Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute.
- [24] *Bellman, R.E.*: Dynamic programming. 1957, Princeton – N.J.: Princeton University Press. 339