



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la
communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle
comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen

**Zusatzkosten infolge
Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen**

**Coûts supplémentaires engendrés par l'exécution anticipée ou
retardée des mesures d'entretien**

**Additional costs caused by bringing forward or delaying of
standard interventions for road maintenance**

**Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich
Prof. Dr.-Ing. G. Girmscheid
Dipl.-Ing. A. Fastrich**

**Forschungspaket Massnahmenplanung im Erhaltungsmana-
gement, Forschungsauftrag VSS 2004/715, Einzelprojekt 5, auf
Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und
Verkehrsfachleute (VSS)**

Mai 2010

1282

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Résumé	6
Abstract.....	7
1. Einleitung	9
1.1. Problemstellung	9
1.2. Auftrag und Ziel.....	9
1.2.1. Zusatzkosten	9
1.3. Einordnung in das Forschungspaket.....	10
1.4. Aufbau des Berichts	11
1.5. Begriffsdefinitionen.....	13
2. Stand der Praxis und Forschung	16
2.1. Stand der Praxis.....	16
2.1.1. Pavement-Management-Systeme.....	16
2.1.2. Normen zum Erhaltungsmanagement.....	17
2.2. Fragen der Praxis.....	18
2.3. Stand der Forschung / Forschungslücke	18
2.3.1. Erhaltungsmanagement allgemein.....	19
2.3.2. Erhaltungsmanagement Strasse	19
2.3.3. Grundlagen der Strategieentwicklung	21
2.3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse	22
2.3.5. Forschungslücke	22
2.4. Fragen der Forschung.....	23
2.5. Forschungsmethodik / Methodisches Vorgehen	23
2.5.1. Theoretischer Bezugsrahmen	26
2.5.2. Methodisches Vorgehen	28
3. System- und Modelldefinition.....	31
3.1. Systemdefinition und Systemabgrenzung.....	31
3.1.1. Inhaltliche Dimension	33
3.1.1.1 Hierarchische Definition der inhaltlichen Dimension des Systems.....	34
3.1.1.2 Systemtheoretische Einordnung des Systems <i>Strassennetz</i>	36
3.1.1.3 Elementgruppe <i>Oberbau</i>	37
3.1.2. Räumliche Dimension	40
3.1.2.1 Vertikale Systemdefinition und Systemabgrenzung	40
3.1.2.2 Horizontale Systemdefinition und Systemabgrenzung.....	41
3.1.3. Zeitliche Dimension	42
3.2. Modellbildung und Modellabgrenzung	42
3.2.1. Inhaltliche Dimension	42
3.2.1.1 Einordnung der entwickelten Modelle in die Systemstruktur.....	43
3.2.1.2 Bewertung des Strassenzustands.....	44
3.2.1.3 Prognose der Entwicklung des Strassenzustands	47
3.2.1.4 Finanztechnische Systemauswahl	47
3.2.1.5 Einbezogene Kostenanteile.....	51
3.2.1.6 Kostenmässige Bewertung des Inputs und Outputs des Systems.....	52
3.2.1.7 Berechnungsmethode	54

3.2.2.	Räumliche Dimension	55
3.2.2.1	Gegenseitige Beeinflussung der homogenen Verhaltensabschnitte	57
3.2.3.	Zeitliche Dimension	57
3.2.3.1	Definition des Betrachtungszeitraums	58
3.2.3.2	Abgrenzung im Anfangszeitpunkt	59
3.2.3.3	Abgrenzung im Endzeitpunkt	59
4.	LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell – Definition der Erhaltungsvarianten	67
4.1.	Erhaltungsstrategie Γ	69
4.1.1.	Kategorien von Erhaltungsstrategien	71
4.1.2.	Anforderungen an eine Erhaltungsstrategie	72
4.2.	Entwicklung von Erhaltungsvarianten χ aus einer Erhaltungsstrategie Γ	73
4.2.1.	Bildung homogener Verhaltensabschnitte	73
4.2.2.	Entscheidungsbaumverfahren	74
4.3.	Definition der Optimal- und Alternativvariante	90
4.3.1.	Grundsätze für die Definition der Optimal- und Alternativvariante für die Zusatzkostenberechnung	91
4.3.2.	Definition des Betrachtungszeitraums für eine Zusatzkostenberechnung	93
4.3.3.	Definition des LC-Betrachtungszeitraums für einen Vergleich verschiedener Erhaltungsstrategien bzw. Erhaltungsvarianten	95
5.	LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell – Finanzielle Bewertung der Erhaltungsvarianten	96
5.1.	Berechnung der Kostenanteile in Abhängigkeit vom Strassenzustand	97
5.2.	Kostenanteile der Stakeholdergruppen	100
5.2.1.	Betreiberkosten	102
5.2.2.	Nutzerkosten	106
5.2.3.	Kosten Dritter	108
5.2.4.	Kostenansätze (Betreiber / Nutzer / Dritte)	109
5.3.	LC-Kosten-Barwert Berechnung für die LC-Erhaltungsvarianten	110
5.3.1.	Kostensteigerung und Diskontierung	111
5.3.2.	Kosten-Barwert einer Erhaltungsvariante	118
5.4.	Gegenüberstellung verschiedener Erhaltungsvarianten - Optimierungsprozess 122	
5.5.	Kosten-Barwert-Differenz der Zusatzkosten durch Verschiebung von Massnahmen	123
6.	Probabilistische Simulation	137
6.1.	Grundlagen der probabilistischen Simulation	137
6.1.1.	Wahrscheinlichkeitsverteilung der Eingangsparameter	138
6.1.2.	Simulation mittels Monte Carlo Sampling Verfahren	141
6.1.3.	Simulation mittels Latin Hypercube Sampling Verfahren	143
6.2.	Probabilistische Kostenermittlung	146
6.3.	Probabilistisches LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell	148
6.3.1.	Grundlagen der probabilistischen Prognose des Zustands eines Strassennetzes	149
6.3.2.	Streubreite der retrospektiven Verhaltenskurven	149
6.3.3.	Streubreite der prospektiven Verkehrsprognose	150
6.3.4.	Beurteilung der Prognose des Strassenzustands	151

6.3.5.	Probabilistisch betrachtete Parameter des LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodells	153
6.3.6.	Betrachtungszeitraum der probabilistischen Betrachtung	157
7.	Auswirkungen zeitlicher Verschiebungen von Erhaltungsmaßnahmen.....	158
7.1.	Mechanismen der Entstehung von Zusatzkosten	158
7.1.1.	Betreiberkosten	158
7.1.2.	Nutzerkosten	163
7.1.3.	Kosten Dritter	165
7.2.	Zusammenfassung.....	165
Anhang – Berechnungsbeispiele.....		167

Zusammenfassung

Die systematische Massnahmenplanung bei Fahrbahnen stellt im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen einen der zentralen und entscheidenden Prozesse dar. Sie zeigt, welche Erhaltungsmassnahmen in einem längeren Betrachtungszeitraum wann auszuführen sind, um den wirtschaftlich höchsten Nutzen mit den getätigten Aufwendungen zu erzielen. Die Grundlagen für diese Planungs- und Optimierungsaufgabe wurden im Rahmen des Forschungspaketes VSS 2004/710-716 für die Schweiz erarbeitet.

Die engen Beziehungen zwischen den in den Einzelprojekten zu entwickelnden Planungsinstrumenten konnten in den Forschungsarbeiten durch die Vernetzung in einem Forschungspaket herausgearbeitet werden. Dies ermöglichte eine optimale Abstimmung der Forschungsergebnisse. Die Hauptresultate der fünf Einzelprojekte und deren Verwendung im Tätigkeitsablauf der systematischen Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement sind im Synthesebericht zum Forschungspaket aufgezeigt.

Das Einzelprojekt 5 VSS 2004/715 „Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen“ nutzt die Ergebnisse der anderen Einzelprojekte und liefert ein Verfahren zur Ermittlung der optimalen Strategie mit den minimalen Lebenszykluskosten bei vorgegebenen Zielen sowie die Zusatzkosten und den Zusatznutzen von Erhaltungsmassnahmen bei vorgezogener bzw. verzögerter Ausführung der Massnahmen gegenüber dem optimalen Realisierungszeitpunkt. Dieses lebenszyklusorientierte Analyseinstrument dient als Grundlage für die Optimierung in der Massnahmenplanung.

Die Ergebnisse der auf den entwickelten Modellen aufgebauten theoretischen Betrachtungen sowie der Beispielberechnungen zeigen, dass es für den Strassenbetreiber meist ideal ist, die Massnahmen so spät wie möglich innerhalb ihres möglichen Anwendungsbereichs auszuführen. Dies führt jedoch zur Reduzierung des Nutzens, den ein Verbindungsabschnitt oder Netz erzeugen soll. Daher erhöhen sich potentiell die Kosten für Nutzer und Dritte. Welcher Einfluss überwiegt ist im Einzelfall zu prüfen. Da die Strasse, der Verbindungsabschnitt bzw. das Netz nur erstellt wurde / wird um einen volkswirtschaftlichen Nutzen zu erzeugen, ist eine rein betreiberorientierte Kostenminimierung nicht nutzenorientiert. In diesem Zusammenhang sollte der Strassenbetreiber die Kosten der Nutzer und der Dritten in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse ausreichend berücksichtigen.

Résumé

La planification systématique des mesures pour les chaussées est un des processus principaux et décisifs s'agissant de la gestion de l'entretien des infrastructures routières. Elle démontre, pour une période d'observation donnée, quelles mesures d'entretien doivent être exécutées à quel moment afin d'atteindre le meilleur rapport coût-bénéfice. Les bases pour cette tâche de planification et d'optimisation ont été élaborées pour la Suisse dans le cadre du projet de recherche VSS 2004/710-716.

Les relations étroites entre les instruments de planification – développés dans des projets individuels – ont pu être établies dans les travaux de recherche grâce à leur intégration dans un projet de recherche. Ceci a permis une concordance idéale des résultats de recherche. Le rapport de synthèse sur le projet de recherche met en évidence les principaux résultats des cinq projets individuels et leur utilisation lors du déroulement de la planification systématique relative à la gestion de l'entretien des infrastructures routières.

Le projet 5 VSS 2004/715 „Coûts supplémentaires engendrés par l'exécution anticipée ou retardée des mesures d'entretien“ utilise les résultats des autres projets individuels et fournit une procédure pour déterminer la stratégie optimale avec les coûts de cycle de vie minimales en considération des objectifs fixés ainsi que les coûts et les bénéfices supplémentaires des mesures d'entretien lorsqu'elles sont effectuées antérieurement ou postérieurement au meilleur moment pour leur réalisation. Cet instrument d'analyse orienté au cycle de vie sert de base pour l'optimisation de la planification des mesures.

Les résultats obtenus, basés sur des modèles théoriques ainsi que sur des exemples de calculs, montrent qu'il est généralement idéal pour l'opérateur routier de prendre des mesures le plus tard possible, à l'intérieur de leur champ d'application respectif. Cela conduit toutefois à la réduction de l'utilisation qu'une section de route ou de réseau devrait produire. C'est pour cela que, potentiellement, les frais pour les utilisateurs et les tiers augmentent. L'influence prédominante est à examiner selon les cas. Comme la route, la section et/ou le réseau sont seulement fournis à des fins d'utilisation publique, une minimisation des coûts purement économique n'est pas orientée vers l'utilisateur. À cet égard, l'opérateur routier devrait suffisamment prendre en considération les frais des utilisateurs et des tiers dans une analyse de rentabilité.

Abstract

Systematic action planning is a central and crucial process within the management of road maintenance. It demonstrates for a given observation period at what time which interventions for road maintenance are to be performed in order to attain the best cost-benefit ratio. The fundamentals for this planning and optimizing task have been compiled for Switzerland within the research package VSS 2004/710-716.

The close relations between the planning instruments – developed within individual research projects – could be worked out thanks to their integration into a research package. This enabled the optimized adjustment of the research results. The synthesis report of this research package demonstrates the main results of all individual research projects and their use for systematic action planning within the management of road maintenance.

Project 5 VSS 2004/715 “Additional costs caused by bringing forward or delaying of standard interventions for road maintenance” uses the results of the other projects and delivers a method to determine the optimal strategy for road maintenance with minimal life-cycle costs as well as the additional costs and benefits of road maintenance, when measures are implemented before or after the optimum term. It serves as a base for the optimization of action planning.

The findings from the theoretical analyses, which were performed on the basis of the developed models, and the sample calculations show that the execution of the measures at as late as possible a point in time within the possible area of application is ideal for the street operator. This does, however, reduce the benefit that a connecting section or network should generate. As a result, the costs for both users and third parties might potentially increase. The issue of which influence ultimately dominates must be examined in each individual case. Since the street, connecting section or network is being / has been built solely to generate macroeconomic benefit, purely operator-oriented cost minimization is not in the interests of the utilization. In this respect, the street operator should analyze the cost efficiency to also take sufficient account of the users' and third party costs.

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Die meisten Industrienationen, so auch die Schweiz, verfügen über ein dichtes und gut ausgebauten Strassennetz. Diese Strassennetze stellen sowohl substanzial, aufgrund der darin gebundenen Werte, als auch durch den Nutzen, der auf Seiten der Strassennutzer generiert wird, einen erheblichen volkswirtschaftlichen Wert dar. Für die Strassenbetreiber ergibt sich daher die Notwendigkeit einer zielorientierten, strukturierten und kostenmässig optimierten Erhaltung dieser Strassen mit dem Ziel den substanzialen Wert und die Gebrauchstauglichkeit des Strassennetzes mit möglichst geringem Ressourceneinsatz zu erhalten. Dies gilt sowohl für öffentliche, als auch für private Strassenbetreiber. Dennoch existieren bei den meisten Strassenbetreibern, insbesondere bei der öffentlichen Hand, meist keine oder nur unzureichende zielorientierte Erhaltungsstrategien als Grundlage einer langfristigen Planung und Optimierung der Erhaltungsarbeiten.

Vor allem im Bereich des Unterhalts von Maschinen und Industrieanlagen wird bereits seit mehreren Jahrzehnten ein zielorientiertes, strukturiertes Erhaltungsmanagement betrieben. Die in diesem Bereich entwickelten Konzepte lassen sich zwar teilweise auf die Strassenerhaltung übertragen, jedoch müssen auch die besonderen Randbedingungen der Strassenerhaltung berücksichtigt werden. So sind die Schadensmechanismen der Strassenkörper meist von einer kontinuierlichen Verschlechterung des Strassenzustands gekennzeichnet, die linear, progressiv oder degressiv verlaufen kann. Ausfallszenarien mit einem plötzlichen Verlust der Gebrauchstauglichkeit treten dagegen kaum auf. Daher ist der Eingreifzeitpunkt nicht eindeutig festgelegt. Es muss eine Abwägung zwischen den Kosten einer Massnahme, den Kosten einer später ausgeführten Massnahme und den durch die Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit entstehenden Kosten auf Seiten der Nutzer und Dritter erfolgen.

Aus diesem Grund wurde vom Schweizer Bundesamt für Strassen (ASTRA) in Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) das Forschungspaket „Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen“ initiiert. Ziel dieses Forschungspakets ist die Erarbeitung von Grundlagen für eine wirtschaftlich optimale Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen. Auf der Basis der Erhaltungsziele und der Strategie des Betreibers können mit diesem Planungsinstrument die optimalen Erhaltungsmassnahmen gefunden werden, die zu den minimalen lebenszyklusorientierten Erhaltungskosten führen. Dies führt zur Reduktion der Erhaltungskosten über mittlere bis grössere Zeiträume. Die Ergebnisse sollen die Grundlage für einen systematisierten und vereinheitlichten Planungsprozess bilden.

1.2. Auftrag und Ziel

1.2.1. Zusatzkosten

Das Projekt *Zusatzkosten infolge Vor- oder Aufschiebung von Erhaltungsmassnahmen* ist Teil des Forschungspakets *Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen*. Ziel des Projekts ist die Quantifizierung der minimalen Lebenszykluskosten für die gewählten Erhaltungsziele und der gewählten Strategie sowie der Zusatzkosten, die durch zeitliche Verschiebungen von Erhaltungsmassnahmen entstehen. Der Referenzfall für die Untersu-

chung ist die Ausführung der betrachteten Erhaltungsmassnahmen zum optimalen Zeitpunkt, d.h. zum dem Zeitpunkt an dem sie das optimale (minimale) Kosten-Nutzen-Verhältnis erreichen. Die Verschiebung kann einen zeitlichen Vor- oder auch Aufschub der Massnahmen bedeuten und eine oder mehrere Massnahmen betreffen.

Es sollen die Einflüsse und Zusammenhänge zwischen Wirkung, Kosten und Nutzen bei Auf- oder Vorschub von Erhaltungsmassnahmen aufgezeigt werden und ein Verfahren zur monetären Bestimmung der Auswirkungen von Auf- und Vorschub von Erhaltungsmassnahmen entwickelt werden.

1.3. Einordnung in das Forschungspaket

Das Forschungspaket „Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen“ gliedert sich in fünf Einzelprojekte:

- Einzelprojekt 1 (VSS 2004/711) – Standardisierte Erhaltungsmassnahmen
- Einzelprojekt 2 (VSS 2004/712) – Schadensprozesse und Zustandsverläufe
- Einzelprojekt 3 (VSS 2004/713) – Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit
- Einzelprojekt 4 (VSS 2004/714) – Gesamtnutzen – Kosten-Nutzen-Verhältnisse
- Einzelprojekt 5 (VSS 2004/715) – Zusatzkosten infolge Vor- oder Aufschub von Erhaltungsmassnahmen

Die fünf Einzelprojekte bauen aufeinander auf und bilden die erforderlichen Bausteine zur Erreichung des Gesamtziels des Forschungspakets.

Im Einzelprojekt 1 wurde ein Katalog von standardisierten Erhaltungsmassnahmen mit einer Beschreibung der einzelnen Massnahmen, dem Anwendungsbereich der einzelnen Massnahmen in Abhängigkeit der fünf Strassenzustandsindizes, der Wirkung der Massnahmen auf den Strassenzustand sowie auf die Verhaltensklasse und den fixen und variablen Kosten der Massnahmen erstellt. Dieser Massnahmenkatalog bildet die erste Stufe der Standardisierung der Erhaltungsplanung und damit die Grundlage des Einzelprojekts 4 sowie des integralen Einzelprojekts 5.

Das Einzelprojekt 2 behandelt die Schadensprozesse von Strukturschäden und Rissen, Längs- und Querunebenheit, Griffigkeit und Tragfähigkeit. Auf der Grundlage von Zustandsdaten, die über mehrere Jahre auf verschiedenen Strassenabschnitten in der ganzen Schweiz gesammelt wurden, wurden Verhaltenskurven für die einzelnen Strassenzustandsindizes, in Abhängigkeit vom Strassentyp (Hochleistungsstrasse, Hauptverkehrsstrasse etc.), der Verkehrsbelastung und den klimatischen Verhältnissen empirisch ermittelt. Mit Hilfe dieser Verhaltenskurven kann die Entwicklung des Strassenzustands zwischen den Erhaltungsmassnahmen für die einzelnen Streckenabschnitte prognostiziert werden. Die Ergebnisse dieses Projekts dienen als Input in das Einzelprojekt 4 sowie das integrale Einzelprojekt 5.

Im Einzelprojekt 3 sollte zunächst ein Zusammenhang zwischen dem Oberflächenzustand und der Tragfähigkeit einer Strasse untersucht werden. Es wurde gezeigt, dass dieser Zusammenhang nicht besteht, bzw. auf Grundlage der vorhandenen Daten nicht nachweisbar

ist. Im Weiteren wurde auf der Grundlage theoretischer Überlegungen eine wissenschaftlich fundierte Definition des Gebrauchs- und Substanzwertes einer Strasse entwickelt.

Das Ziel des Einzelprojekts 4 ist die Ermittlung des Gesamtnutzens der im Einzelprojekt 1 definierten standardisierten Erhaltungsmassnahmen. Zusammen mit den Kosten der Erhaltungsmassnahmen lassen sich daraus die Kosten-Nutzen-Verhältnisse der standardisierten Massnahmen bestimmen. Auf Grundlage der SN 641820 wurden dazu die verschiedenen monetarisierten Kosten- und Nutzenkomponenten der betroffenen Stakeholder im Falle der Ausführung der untersuchten Massnahme mit dem Referenzfall keine Massnahme auszuführen verglichen. Die Ergebnisse des Einzelprojekts 4 liefern die Inputgrössen für die Wirtschaftlichkeitsanalysen im Einzelprojekt 5.

Im Einzelprojekt 5, das sowohl zeitlich, als auch inhaltlich am Ende des Forschungspakets steht, werden die Ergebnisse der vorgelagerten Einzelprojekte zusammengeführt und als Grundlage für die wirtschaftliche Gegenüberstellung verschiedener Erhaltungsvarianten herangezogen. Das Einzelprojekt 5 stellt somit das integrierende Projekt des Forschungspakets dar. Im Einzelnen werden die folgenden Inputparameter aus den Einzelprojekten 1 bis 4 einbezogen:

- Einzelprojekt 1:
 - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen
 - Anwendungsbereiche der Erhaltungsmassnahmen
 - Wirkung der Erhaltungsmassnahmen auf den Strassenzustand
 - Kosten der Erhaltungsmassnahmen (materielle Kostendimension)
- Einzelprojekt 2:
 - Verlauf des Strassenzustands nach einer Massnahme bzw. zwischen zwei Massnahmen (zeitliche Dimension)
- Einzelprojekt 3:
 - Definition des Gebrauchs- und Substanzwertes einer Strasse
- Einzelprojekt 4:
 - Monetarisierte Nutzenkomponenten
 - Kosten-Nutzen-Verhältnisse der standardisierten Erhaltungsmassnahmen in Abhängigkeit vom Strassenzustand in der Ausgangslage (zeitliche Kostendimension)

1.4. Aufbau des Berichts

Der vorliegende Forschungsbericht gliedert sich in sieben Hauptkapitel, die aufeinander aufbauen (Bild 1).

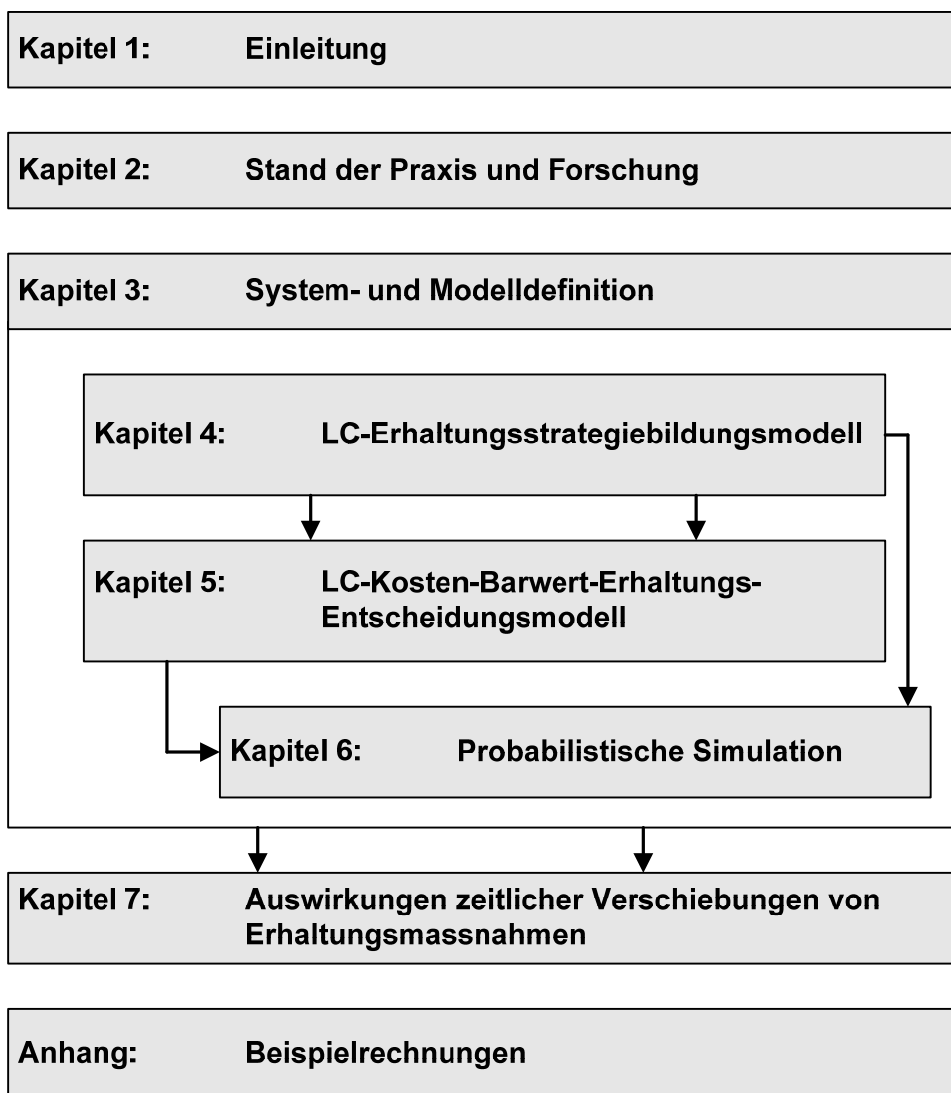


Bild 1: Kapitelstruktur des Forschungsberichts

Kapitel 1 gibt eine allgemeine Einleitung in die Problemstellung und den Auftrag und Ziel des Forschungsprojekts. Ausserdem wird das methodische und wissenschaftstheoretische Vorgehen beschrieben.

In Kapitel 2 werden der derzeitige Stand der Praxis und der Stand der Forschung national und international dargelegt.

In Kapitel 3 wird das betrachtete System gemäss der Systemtheorie definiert und abgegrenzt. Damit wird der Rahmen für die entwickelten Modelle zur Planung und Entscheidungsfindung im Erhaltungsmanagement aufgespannt.

In Kapitel 4 wird das LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell zur Definition von Erhaltungsvarianten, als konkrete Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen über den Betrachtungszeitraum, entwickelt. Damit werden die Grundlagen für die anschliessende Bewertung der Varianten im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell gelegt.

Kapitel 5 behandelt die wirtschaftliche Bewertung der mit dem LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell entwickelten Erhaltungsvarianten. Dazu wird das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zum Vergleich alternativer Varianten des Strassenunterhalts entwickelt.

Kapitel 6 beschreibt die probabilistische Simulation verschiedener Erhaltungsvarianten. Dabei wird einerseits die kostenmässige Bewertung der verschiedenen Varianten im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell, andererseits aber auch auf die Entwicklung der Erhaltungsvarianten im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell probabilistisch betrachtet.

Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der vorausgegangenen Untersuchungen zusammen und liefert allgemeine Rückschlüsse auf die monetären Auswirkungen von Verschiebungen von Erhaltungsmaßnahmen innerhalb einer Erhaltungsvariante.

Im Anhang werden praktische Berechnungsbeispiele zu den entwickelten Modellen dargestellt.

1.5. Begriffsdefinitionen

Erhaltungsstrategie

Eine Erhaltungsstrategie basiert auf Zielen und legt die strategischen Grundsätze des Erhaltungsmanagements fest. Die Erhaltungsstrategie gibt auf der strategischen Ebene den Rahmen für die Entwicklung einer oder mehrerer konkreter Erhaltungsvarianten auf der operativen Ebene vor. Damit orientiert sich der in dieser Arbeit verwendete Begriff der Erhaltungsstrategie an der allgemeinen betriebswirtschaftlichen Definition der Strategie, wie z.B. im St. Galler Management-Modell (Bleicher 1996; Ulrich 2001). Die rein operativ orientierte Definition der SN 640931 (SN 640931 2000) wird hier nicht übernommen, diese beschreibt in der hier verwendeten Begriffssystematik eine Erhaltungsvariante.

Erhaltungsvariante

Eine Erhaltungsvariante beschreibt die zeitliche Abfolge von bestimmten Erhaltungsmaßnahmen über den Betrachtungszeitraum. Auf der Grundlage der strategischen Vorgaben aus der Erhaltungsstrategie werden auf der operativen Ebene die Art und der Umfang der einzelnen Massnahmen definiert. Damit orientiert sich die Begriffsdefinition an der Definition einer Erhaltungsvariante gemäss SIA 469 (SIA 469 1997). Diese Definition entspricht der Definition einer Erhaltungsstrategie nach SN 640931 (SN 640931 2000) (zu beachten: Der Begriff Erhaltungsstrategie wird in dieser Arbeit abweichend von SN 640931 definiert).

Erhaltungsmassnahme

Erhaltungsmassnahmen sind Massnahmen des baulichen Unterhalts, die der Instandsetzung, d.h. Substanzerhaltung bzw. der Wiederherstellung des Sollzustandes dienen. Erhaltungsmassnahmen betreffen grössere Flächen und sind im Gegensatz zu Reparaturen meist im Voraus planbar.

Reparatur

Reparaturen sind bauliche Massnahmen kleineren Umfangs und bauliche Sofortmassnahmen zur Beseitigung von Fahrbahnschäden (z.B. Schlaglöcher, Risse) und zur Verhinderung von Folgeschäden. Diese Massnahmen umfassen nur kleine Flächen und werden in der Regel unmittelbar nach dem Eintreten des Schadens im Rahmen des betrieblichen Unterhalts ausgeführt.

Wirkungszeitspanne einer Erhaltungsmassnahme

Die Wirkungszeitspanne gibt den zeitlichen Einflussbereich einer Erhaltungsmassnahme an. Er entspricht der Zeitspanne zwischen der Ausführung der Erhaltungsmassnahme und dem Zeitpunkt, zu dem der Strassenzustand, der vor der Erhaltungsmassnahme vorlag, wieder erreicht ist. Damit ist der Einflussbereich einer Erhaltungsmassnahme keine feste Grösse, sondern eine zeitliche Grösse, die von den äusseren Einwirkungen auf die Strasse abhängig ist.

Optimalvariante

Die Optimalvariante stellt innerhalb einer vorgegebenen Strategie die Variante dar, die zu den geringsten Gesamtkosten der betrachteten Stakeholdergruppen führt.

Basisvariante

Die Basisvariante repräsentiert bei der Zusatzkostenberechnung die ursprünglich geplante Erhaltungsvariante, bevor eine oder mehrere Erhaltungsmassnahmen verschoben werden. Sie dient also als Referenzfall für die Berechnung der Zusatzkosten, die sich aus dem Vor- oder Aufschub von Erhaltungsmassnahmen ergeben (kann Optimalvariante sein, muss aber nicht).

Alternativvariante

Die Alternativvariante entspricht der Erhaltungsvariante, die sich aus der Veränderung der Basisvariante ergibt. Sie wird in der Zusatzkostenberechnung der Basisvariante gegenübergestellt.

Betrachtungszeitraum

Fester zeitlicher Rahmen (Lebenszyklusdimension z.B. 30-60 Jahre) für alle zu vergleichenden Erhaltungsstrategien bzw. Erhaltungsvarianten. Der Betrachtungszeitraum wird definiert durch einheitliche Anfangs- und Endzeitpunkte für alle Varianten.

Kosten-Barwert

Der Kosten-Barwert einer Erhaltungsvariante bezeichnet die auf den Bezugszeitpunkt diskontierte Summe der einzelnen Kostenanteile der drei Stakeholdergruppen (Betreiber, Nutzer, Dritte) über den gesamten Betrachtungszeitraum der Untersuchung.

System

Grundlage der Entwicklung und Bewertung verschiedener Varianten des Strassenunterhalts ist die Definition des betrachteten Systems. Dabei wird auf Grundlage der Systemtheorie mithilfe der Systemparameter ein möglichst homorphes Abbild der Realität definiert. Auf dieser Grundlage bauen die entwickelten Modelle zur Definition (LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell) und wirtschaftlichen Bewertung (LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell) von Erhaltungsvarianten auf.

Modell

Ein Modell stellt eine konzeptionelle Abbildung des zugrundeliegenden Systems dar. Dabei werden lediglich die für den intendierten Output des Modells wichtigen Parameter des Systems einbezogen. Zur Erreichung des intendierten Outputs werden die determinierenden Input- und Systemparameter in einer technischen bzw. mathematischen Formulierung betrachtet.

2. Stand der Praxis und Forschung

2.1. Stand der Praxis

In der Schweiz, wie auch in den meisten anderen Industrieländern, hat sich in den vergangenen Jahren die Einsicht durchgesetzt, dass ein zielorientierter wirtschaftlicher Strassenunterhalt, unter Beachtung der volkswirtschaftlichen nachhaltigen Bedeutung, nur im Rahmen eines umfassenden Erhaltungsmanagements auf der Grundlage einer regelmässigen Zustandsaufnahme sowie einer vorausschauenden lebenszyklusorientierten Planung möglich ist. In den meisten Kantonen sowie beim Autobahnnetz erfolgt bereits eine systematische Erfassung des Strassenzustands, was die Grundvoraussetzung für eine weitere Erhaltungsplanung des Strassenunterhalts ist. Da diese Erfassung aber zumeist erst seit wenigen Jahren erfolgt, ist die Datenbasis vor allem im Hinblick auf die Zustandsentwicklung noch relativ eingeschränkt.

2.1.1. Pavement-Management-Systeme

In vielen Ländern wurden in den vergangenen Jahren als Unterstützung eines systematisierten Erhaltungsmanagements EDV-basierte Pavement-Management-Systeme (PM-Systeme) entwickelt bzw. implementiert. Diese Systeme versuchen sämtliche Aspekte des Erhaltungsmanagements abzubilden und in einer EDV-Anwendung zusammenzuführen.

In den USA wurde bereits in den 1980er Jahren mit der Einführung erster PM-Systeme begonnen (Finn 1998), die allerdings nicht den Leistungsumfang moderner Systeme abbildeten. Vorreiter waren die Staaten Arizona, Kalifornien, Idaho, Utah und Washington. Derzeit sind in allen US-Bundesstaaten PM-Systeme im Einsatz.

In Deutschland wurde 1999 mit der Einführung eines solchen Systems begonnen (Maerschalk 2000). Dabei wurde auf die kanadische Software VIAPMS zurückgegriffen, die dann auf die landesspezifischen Besonderheiten angepasst wurde. In Österreich wurde auf der Grundlage derselben Software im Jahr 2001 ein PM-System eingeführt (Weninger-Vycudil, Simanek et al. 2002).

Grundvoraussetzung für den Einsatz derartiger Systeme ist eine systematische Erfassung des Strassenzustands. Zusammen mit dem prognostizierten Zustandsverlauf können dann notwendige Erhaltungs- und Erneuerungsmassnahmen geplant und der sich daraus ergebende Finanzbedarf in den einzelnen Jahren ermittelt werden. Die meisten Programme ermöglichen dabei eine statische oder dynamische Wirtschaftlichkeitsanalyse. Ziel der Pavement-Management-Systeme ist eine Optimierung des Strassenunterhalts unter technischen, betriebswirtschaftlichen und volkswirtschaftlichen Aspekten sowie die kurz-, mittel- und langfristige Prognose des Finanzbedarfs.

In der Schweiz ist derzeit noch kein Pavement-Management-System für das Autobahnnetz im Einsatz. Es wurde allerdings mit den Programmen zur systematisierten Kosten-Nutzen-Analyse NISTRA bzw. eNISTRA ein erster Schritt zur Entwicklung eines solchen Systems gegangen (Ecoplan 2006). Dies Tools NISTRA bzw. eNISTRA arbeiten auf der Ebene einzelner Projekte und fokussiert daher auf Neubau von Strassen. Die hier erarbeiteten Ansätze können allerdings die Grundlage für ein umfassendes Pavement-Management-System bilden. Das Forschungspaket *Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbah-*

nen setzt an dieser Stelle an und beinhaltet die Entwicklung der Grundlagen für eine, den spezifischen Voraussetzungen in der Schweiz angepasste, Planung und Optimierung des Strassenunterhalts.

2.1.2. Normen zum Erhaltungsmanagement

Die Grundlagen des Erhaltungsmanagements werden, soweit sie den allgemeinen Stand der Technik darstellen, in Normen festgeschrieben.

Das Erhaltungsmanagement von Strassen stellt einen Spezialfall der Erhaltung von Bauwerken im Allgemeinen dar. Auf dieser allgemeinen Ebene definiert die europäische Norm EN 13306 (EN 13306 2001) die übergreifend gültigen Begriffe der Instandhaltung. Die Grundlagen der Instandhaltung werden für die Schweiz in der SIA Norm 469 (SIA 469 1997) beschrieben, in Deutschland existiert analog hierzu die DIN 31051 (DIN EN 31051 2003).

Im Bereich Erhaltungsmanagements von Strassen bezieht sich die Normung im Einzelnen auf Festlegungen bezüglich

- standardisierter Strassenquerschnitte und Strassenaufbauten,
- der Aufnahme und Bewertung des Strassenzustands,
- der prognostizierten Entwicklung des Strassenzustands sowie
- der monetären Bewertung des Einflusses der Strasse und deren Zustands auf die einzelnen Stakeholdergruppen.

In der Schweiz werden diese Fragestellungen in der VSS Normung wie folgt abgebildet:

- Der Strassenaufbau wird in Querrichtung in Form des geometrischen Normalprofils in der SN 640200 (SN 640200a 2003) definiert. Den horizontalen Strassenaufbau, d.h. die Dimensionierung, beschreibt die SN 640324 (SN 640324a 1997). Diese beiden Bereiche spielen allerdings für das Erhaltungsmanagement nur im Sinne einer allgemeinen Grundlage eine Rolle, da in den hier betrachteten Fällen davon ausgegangen wird, dass das Strassennetz als solches bereits vorhanden ist und nicht neu erstellt werden muss.
- Die Aufnahme und Bewertung des Strassenzustands ist Teil der Normenreihe zum Erhaltungsmanagement. Diese basiert auf der Erhaltungsmanagement-Grundnorm SN 640900 (SN 640900a 2004) in der die Begriffe, Aufgabenbereiche und Ziele des Erhaltungsmanagements definiert werden. Die Zustandserhebung und –bewertung wird in den zugeordneten Detailnormen behandelt. Die SN 640925 (SN 640925b 2003) definiert die Verfahren zu Bestimmung der Strassenzustandsindizes I1 bis I5 aus den zugrundeliegenden Messwerten bzw. den visuell erhobenen Daten. In der SN 640926 (SN 640926 2005) werden die Einzelindizes IA1 bis IA5 bzw. IB1 bis IB5 und die Ableitung des Zustandsindex I1 aus diesen Einzelindizes definiert. Aus den einzelnen Zustandsindizes I1 bis I5 lassen sich Indizes zur Gesamtbewertung des Strassenzustands ableiten. Dazu werden in der SN 640904 (SN 640904 2003) Substanz- und Gebrauchswerte als kombinierte Indizes definiert.
- Zur Zustandsentwicklung und Zustandsprognose existieren derzeit in der Schweiz noch keine Normen. Die Grundlagen hierfür wurden im Teilprojekt 2 Schadensprozesse und Zustandsverläufe entwickelt (Scazziga 2008) (siehe Kapitel 1.3).

- Die monetäre Bewertung des Strassenzustands für die einzelnen Stakeholdergruppen ist einerseits in der Normenreihe zum Erhaltungsmanagement in der SN 640907 (SN 640907 2003) enthalten, zum anderen existiert eine eigene Normenreihe zur Kosten-Nutzen-Analyse mit der Grundnorm SN 641820 (SN 641820 2006). Die SN 640907 definiert die Grundlagen zur Berechnung der Gesamtkosten des Erhaltungsmanagements aus den Kosten der Stakeholdergruppen Betreiber, Nutzer und Dritte. Im Anhang werden konkrete Kostenansätze für die einzelnen Kostenanteile gegeben. In den Detailnormen zur SN 641820 werden die Ansätze zur Kostenberechnung auf einer detaillierteren Basis festgelegt. Im Einzelnen enthalten die Detailnormen SN 641822 und SN 641823 (SN 641822 2007; SN 641823 2007) eine Berechnungsmethode sowie die Kostenansätze für die Zeitkosten der Strassenutzer, die über die mögliche Maximalgeschwindigkeit vom Strassenzustand abhängen. Die SN 641826 (SN 641826 2008) definiert die Betriebs- und Erhaltungskosten des Strassenbetreibers. Die SN 641827 (SN 641827 noch unveröffentlicht-a) gibt Ansätze zur Bestimmung der Fahrzeugbetriebskosten auf Seiten der Strassenutzer in Abhängigkeit vom Strassenzustand. Die SN 641827 (SN 641827 noch unveröffentlicht-b) definiert die externen Kosten, d.h. die Kosten Dritter, wie Umweltkosten und Lärmkosten.

2.2. Fragen der Praxis

Das ASTRA, kantonale sowie private Strassenbetreiber stehen vor folgenden Fragestellungen, die in der Praxis bzw. vorhandenen Normen nicht gelöst wurden:

- Ableitung einer lebenszyklusorientierten Erhaltungsstrategie aus den Anforderungen an den Strassenzustand und das Erhaltungsmanagement
- Umsetzung der strategischen Vorgaben in eine konkrete Massnahmenplanung
- Lebenszyklusorientierte Bewertung der Erhaltungsstrategien und Berücksichtigung der Kosten aller Stakeholder
- Berechnung der Zusatzkosten, die sich bei einem Abweichen von einer vorgegebenen Strategie, d.h. bei einer Verschiebung von Erhaltungsmassnahmen, entstehen
- Zu Klärung dieser Fragen müssen entsprechende wissenschaftlich fundierte und praktisch anwendbare Modelle zur Verfügung gestellt werden.

2.3. Stand der Forschung / Forschungslücke

Die Notwendigkeit die öffentlichen Haushalte durch effektiven Unterhalt der öffentlichen Infrastruktur zu entlasten, hat in den vergangenen Jahren zu verstärkten Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet geführt. Neben den Strassen werden dabei auch Brücken, Ver- und Entsorgungsleitungen und andere Infrastruktureinrichtungen betrachtet. Trotz dieser Anstrengungen fehlen in der Praxis Entscheidungsinstrumente, die den Unterhalt von Strassen im mehrdimensionalen wirtschaftlichen Kontext bezüglich Lebenszykluskosten, Stakeholderkosten und Zusatzkosten bei unterschiedlichen Erhaltungsmassnahmen bei einer optimierten Strategie betrachten. Im Kapitel Stand der Forschung soll untersucht werden, in-

wieweit die Wissenschaft bereits Lösungsansätze entwickelt hat, die die Fragen der Praxis beantworten und welche Forschungslücke besteht.

2.3.1. Erhaltungsmanagement allgemein

Die Modelle zur Erhaltungsplanung für Infrastruktureinrichtungen beruhen darauf, den Zustandsverlauf der betrachteten Bauten unter Berücksichtigung der vorhandenen Unsicherheiten vorherzusagen und diesen durch eine geeignete Massnahmenplanung positiv zu beeinflussen (Frangopol und Neves 2003; Costello, Snaith et al. 2005; Kuhn und Madanat 2005).

Die Grundlegenden Verfahren sind zwischen den unterschiedlichen Infrastruktureinrichtungen übertragbar und basieren meist auf Ansätzen, die auch in anderen Bereichen, wie z.B. bei der Erhaltung von Produktionseinrichtungen, Anwendung finden (Gerbach 1977; Narayan 2004). Im Einzelnen unterscheiden sich jedoch die jeweiligen spezifischen Anforderungen, die an das Erhaltungsmanagement gestellt werden. So spielt beispielsweise bei Brücken (Liu und Frangopol 2005; Liu und Frangopol 2006) das Ausfallrisiko und damit die Sicherheit des Bauwerks eine entscheidende Rolle, da ein Versagen der Konstruktion plötzlich auftreten und fatale Auswirkungen haben kann. Das Selbe gilt auch für ausgefallene Bauwerke wie z.B. Pipelines (Bea, Fellow et al. 2000) oder Kernkraftwerke (Mayer 1995). Auch bei der Erhaltung von Produktionseinrichtungen stellt die Bewertung des Ausfallrisikos einen wichtigen Punkt in der Erhaltungsplanung dar. Arbeiten in diesen Gebieten fokussieren daher stark auf diesen Punkt (Liu und Frangopol 2004; Narayan 2004). Im Strassenunterhalt spielt der Aspekt der Ausfallsicherheit allerdings eine eher untergeordnete Rolle, da hier die Schadensprozesse meist langsam ablaufen. Im Strassenunterhalt stellt sich vielmehr die Frage, welche Auswirkungen eine zunehmende Verschlechterung des Strassenzustands auf die Nutzbarkeit und vor allem die Substanzentwicklung der Strasse hat. Diesen Unterschieden ist bei der Adaption der allgemeinen Verfahren für den Strassenunterhalt Rechnung zu tragen.

2.3.2. Erhaltungsmanagement Strasse

In deutschsprachigen Raum wurde der Bereich des Erhaltungsmanagements von Strassen schon früh, vor allem am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Strassenwesen der Universität der Bundeswehr in München aufgegriffen. Oefner und Schmuck geben einen ersten Überblick über den Einsatz verschiedener Verfahren der Investitionsrechnung bei der Bewertung und Auswahl von Erhaltungsstrategien (Oefner und Schmuck 1979) sowie die Entwicklung von Managementmodellen für den Strassenunterhalt (Oefner und Schmuck 1980). In einem Forschungsprojekt des deutschen Bundesministeriums für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen e.V. wurden später erste Versuche einer wirtschaftlichen Optimierung von Erhaltungsstrategien unternommen (Breiter, Oefner et al. 1985).

Im internationalen Bereich wurde eine Vielzahl von Modellen im Bereich des Erhaltungsmanagements entwickelt. Diese fokussieren meist auf einzelne Teilbereiche des Erhaltungsmanagements. So stellen Lee und Ibbs drei mögliche Erhaltungsmassnahmen zur umfassenden Verbesserung des Strassenzustands gegenüber und vergleichen die entstehenden Kosten für den Strassenbetreiber (Lee und Ibbs 2004). Costello beschreibt ein Modell zur strategi-

schen Planung des Strassenunterhalts und fokussiert dabei auf die Abbildung des Strassenzustandsverlaufs mit Hilfe eines stochastischen Markov-Prozesses (Costello, Snaith et al. 2005). Labi und Kumares bewerten verschiedene Erhaltungsvarianten auf Basis einer Kosten-Nutzen Betrachtung (Labi und Kumares 2005). Die Bewertung erfolgt durch die Betrachtung Verlängerung der Lebensdauer einer Strasse mit dem Einsatz von eine Million Dollar. In die Betrachtung einbezogen werden lediglich die Betreiberkosten und Zeitkosten der Nutzer. Kuhn und Madant stellen ein Erhaltungsmanagement Modell für ein System von Infrastruktureinrichtungen unter Berücksichtigung der Interaktionen der Verschiedenen Teilsysteme vor (Kuhn und Madanat 2005). Smith stellt die Kosten-Nutzenverhältnisse eines kontinuierlichen Strassenerhalts dem Neubau bzw. einer Strategie mit wenigen umfassenden Massnahmen gegenüber (Smith, Titus-Glover et al. 2005).

Das Thema der zusätzlich entstehenden Kosten bei einer Verschiebung von Erhaltungs-massnahmen wurde in seinen Grundzügen von Maerschalk und Schmuck bereits 1987 aufgegriffen (Maerschalk und Schmuck 1987). Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern einen Input in die im Rahmen dieses Forschungsprojekts zu bearbeitenden Fragestellungen, enthalten aber kein umfassendes Konzept zur Entwicklung und Bewertung verschiedener Varianten im Strassenunterhalt.

Im Rahmen des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojekts wurde, basierend auf den teilweise bereits im Schweizer Normensystem vorliegenden Grundlagen (siehe Kapitel 2.1.2), ein umfassendes monetäres Bewertungssystem der Einflüsse des Strassenzustands auf die einzelnen Stakeholder erarbeitet. Dieses liefert die Grundlage zur Ermittlung der holistischen Lebenszykluskosten einer Strasse bei verschiedenen Erhaltungsvarianten. In zwei Veröffentlichungen zur Entwicklung von Erhaltungsstrategien (Girmscheid 2007a) sowie deren finanzieller Bewertung (Girmscheid 2007b) wurden bereits erste Ergebnisse des Forschungsprojekts vorgestellt.

VSS-Forschungsarbeiten

Die Grundlagen für die weitere Entwicklung von Erhaltungsmanagementkonzepten im Bereich der VSS-Normung wurden von Lindenmann et al. entwickelt (Lindenmann, Bär et al. 2000). Im Rahmen des dieser Arbeit zugrundeliegenden VSS-Forschungsprojektes wurde ein Überblick über die generellen Fachkonzepte im Erhaltungsmanagement gegeben. Im einzelnen wurden als Ziele des Erhaltungsmanagements

- die Schaffung von Entscheidungsgrundlagen für die optimale Mittelbewirtschaftung der Gesamtheit der Verkehrsanlagen
- die Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen zur Wahl der zweckmässigsten Massnahmenfolgen
- das Aufzeigen der Dringlichkeiten der einzelnen Massnahmenfolgen

definiert.

Auf der Grundlage einer vereinheitlichten Begriffssystematik wurden generelle Fachkonzepte zum Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen, Kunstbauten und elektromechanischen Anlagen sowie zum Massnahmenmanagement und zur Baustellenplanung entwickelt.

Im Rahmen des VSS-Forschungsprojekts *Tätigkeitsabläufe und Entscheidungshilfen im Management der Strassenerhaltung* wurden die einzelnen Tätigkeiten und Abläufe im Management der Strassenerhaltung in Haupt- und Teilprozesse untergliedert sowie die Prozessbeteiligten und der zeitliche Ablauf der einzelnen Teilprozesse definiert (Steiner, Landolt et al. 2001).

Im Bereich des kommunalen Strassenunterhalts wurde von der Emch & Berger AG in Zusammenarbeit mit weiteren Forschungspartnern (Emch & Berger Bern AG 2003) ein Konzept zur Optimierung des Unterhalts im Hinblick auf die Interaktionen der einzelnen Teilsysteme Strasse, Abwasser, Gas- und Wasserversorgung, Telekommunikations- und Elektrizitätsleitungen entwickelt. Hierbei handelt es sich allerdings nicht um ein mathematisch formuliertes Optimierungsverfahren, sondern um eine Prozessbeschreibung zur Bildung von teilsystemübergreifenden Massnahmenpaketen mit dem Ziel Synergieeffekte zu erzielen. Hierzu werden die anstehenden Massnahmen in den einzelnen Teilsystemen nach ihrer Dringlichkeit geordnet und zu Massnahmenpaketen zusammengeführt.

Die Grundlagen für eine auf mathematischen Verfahren aufbauende Optimierung des Strassenunterhalts wurden von Rafi, Hajdin und Welte im Rahmen des Forschungsprojekts *Optimierungsprozesse im Management der Strassenerhaltung* erarbeitet (RAFI Managementberatung (Zürich) 2005). Es werden verschiedene nicht-monetäre Optimierungsverfahren (Gewichtete Summation, Multiattributive Netzwerkfunktion, Analytischer Hierarchieprozess, Multiattributive Nutzentheorie) und ein monetäres Optimierungsverfahren (Inkrementelles Nutzen/Kosten-Verfahren) sowie deren mögliche Anwendung im Erhaltungsmanagement von Bauwerken vorgestellt. Ausserdem wird ein mathematischer Ansatz zur Bildung von optimalen teilsystemübergreifenden Massnahmenpaketen mit Hilfe linearer Optimierungsverfahren entwickelt.

2.3.3. Grundlagen der Strategieentwicklung

Die Entwicklung von LC-Erhaltungsstrategien im Strassenunterhalt stützt sich allgemein auf die Strategien im Unternehmensmanagement ab. In diesem Bereich nimmt die Universität St. Gallen eine Vorreiterrolle im deutschsprachigen Raum ein. Hier wurden Grundlegende Modelle zur strategischen Führung von Unternehmen entwickelt (Bleicher 1996; Ulrich 2001). Am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich wurden diese Modelle den speziellen Anforderungen an die Strategieentwicklung und -umsetzung in Bauunternehmen angepasst und weiterentwickelt (Girmscheid 2006c).

Die Strategien des Erhaltungsmanagements von technischen Anlagen in der Industrie, die sich sinngemäss auch auf den Strassenunterhalt übertragen lassen, lassen sich in zwei grundlegende Strategievarianten unterteilen:

- Interventionsstrategie
- Präventionsstrategie

Diese Einteilung sowie eine umfassende Beschreibung dieser Strategien finden sich allgemein bzw. auf die jeweilige Anwendung angepasst in verschiedenen Grundlagenwerken zum allgemeinen Erhaltungsmanagement (Gertsbakh 1977; Boussabaine und Kirkham 2004; Narayan 2004) bzw. zur speziellen Anwendungen bei Infrastrukturbauten (PIARC Technical Committee on Road Management 2005; Smith, Titus-Glover et al. 2005). Diese Grundeinteilung

lung der Strategien lässt sich übergreifend auf die Erhaltung verschiedenster Bauwerke und Anlagen anwenden und ist damit auch für den speziellen Fall des Strassenunterhalts geeignet. In der SN 940931 wurde diese Einteilung weiter verfeinert und folgende Strategievarianten definiert (SN 640931 2000):

- Nullunterhalt
- Unterhalt mit festgelegten Intervallen
- Unterhalt mittels verschiedener Einzelmassnahmen
- Unterhalt mittels Sofortmassnahmen
- Instandsetzung: Wiederherstellen des Anfangszustands bei Erreichen des Schwellenwerts
- Partielle Instandsetzung

In diesem Forschungsprojekt wurde allerdings auf eine derart detaillierte Einteilung der Strategien, die sich auch teilweise überschneiden, verzichtet. Es sollen die grundlegenden Strategievarianten dargestellt werden, innerhalb derer der jeweilige Strassenbetreiber eine für sich ideale LC-Strategie entwickeln sollte.

2.3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse verschiedener LC-Strategien und Varianten der Strassenerhaltung stützt sich auf die allgemeinen Verfahren der Investitionsrechnung, die aus dem Bereich der Betriebswirtschaft bekannt sind (Wöhe 1984; Thommen 1999; Hirst 2001; Ross, Westerfield et al. 2002; Baddeley 2004; Newnan, Eschenbach et al. 2004).

Die Grundlagen des speziellen Falls einer Berechnung der Lebenszykluskosten (LCCA) einer Anlage wurden unter anderem von Boussabaine und Kirkham (Boussabaine und Kirkham 2004) erarbeitet.

Am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich wurden in den vergangenen Jahren Modelle der NPV-Lebenszyklusbetrachtung alternativer baulicher Lösungen (Girmscheid 2006b), von PPP-Abwicklungsmodellen (Girmscheid 2006a) und von Bereitstellungsvarianten verschiedener Bauproduktionseinrichtungen (Girmscheid 2008) entwickelt. Auf diese Grundlagen wird im vorliegenden Forschungsbericht zurückgegriffen.

2.3.5. Forschungslücke

Im Bereich des Erhaltungsmanagements verschiedenster Produktions- und Industrieanlagen liegen umfangreiche Erkenntnisse zur Entwicklung und Umsetzung von Erhaltungsstrategien vor. Im Erhaltungsmanagement von Infrastruktureinrichtungen und im speziellen von Strassen wurden in den letzten Jahren verstärkt Anstrengungen unternommen derartige Konzepte auf diese Bereiche zu übertragen bzw. entsprechend angepasste Konzepte zu entwickeln. Allgemein und insbesondere für die speziellen Gegebenheiten in der Schweiz fehlen aber umfassende Modelle zur Entwicklung und Bewertung verschiedener LC-Erhaltungsstrategien und LC-Erhaltungsvarianten unter Berücksichtigung

- der langen Lebenszyklusdauer einer Strasse,

- der kostenmässig bewerteten Einflüsse auf alle relevanten Stakeholdergruppen,
- der in allen Ausgangsparametern enthaltenen Unsicherheiten in einem probabilistischen Modell
- sowie einer geschlossenen umfassenden Systemdefinition und Systemabgrenzung.

Insbesondere ist die Frage unbeantwortet, wie sich der Zeitpunkt der Ausführung einer Massnahme bzw. die Verschiebung einer Massnahme, d.h. das Abweichen von einer vorgegebenen Strategie auf die Gesamtkosten des Strassenunterhalts auswirkt.

2.4. Fragen der Forschung

Die vorliegende Arbeit versucht folgende Fragen der Forschungslücke zu beantworten:

- Wie ist der Prozess der Strategieentwicklung zu gestalten um eine für den Einzelfall optimale LC-Erhaltungsstrategie zu entwickeln?
- Mit welchen Verfahren lassen sich aus den Vorgaben der Erhaltungsstrategie sowie vorgegebenen Randbedingungen konkrete Massnahmenabfolgen für die einzelnen Strassenabschnitte entwickeln?
- Mit welchen finanzmathematischen Verfahren lassen sich die Lebenszykluskosten alternative Erhaltungsvarianten vergleichen um zu einer optimalen Lösung zu kommen?
- Wie hat die Systemdefinition zu erfolgen um eine sinnvolle Gegenüberstellung verschiedener Varianten zu gewährleisten?

2.5. Forschungsmethodik / Methodisches Vorgehen

Zur Begründung der Forschungsmethodik (Girmscheid 2007c) wird die wissenschaftliche Einteilung der Welt nach Popper (Popper 1984) in die drei Welten vorgenommen (Bild 2). Diese Einteilung gliedert die Welt (Triadismus) 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 interpretavistischen (Weber und Winkelmann 1990) und konstruktivistischen (Guba und Lincoln 1994), (Glaserfeld 1998) Forschungsparadigmen ab.

Im Gegensatz zu dem von Popper (Popper 1984) aufgestellten Kriterium der Falsifikation von Theorien durch ihre Anwendung, fasst der Konstruktivismus die aus einer Theorie gewonnenen Daten nicht als unabhängige Kriterien für Wahrheit und Falschheit, sondern als Konstrukte des Forschers auf (Berger und Luckmann 1977). Der Forscher nimmt eine zentrale Position im wissenschaftlichen Arbeitsprozess ein, so dass durch den Konstruktivismus

Objektivität und Wahrheit als Bezugspunkte des Handelns abgelehnt werden. An Stelle des Begriffs der Wahrheit (wissenschaftlicher oder individueller) Theorien setzt von Glasersfeld (Glasersfeld 1998) den Begriff der Viabilität, der die Gangbarkeit oder Brauchbarkeit eines Weges zur Lösung eines selbst gewählten Problems bezeichnet.

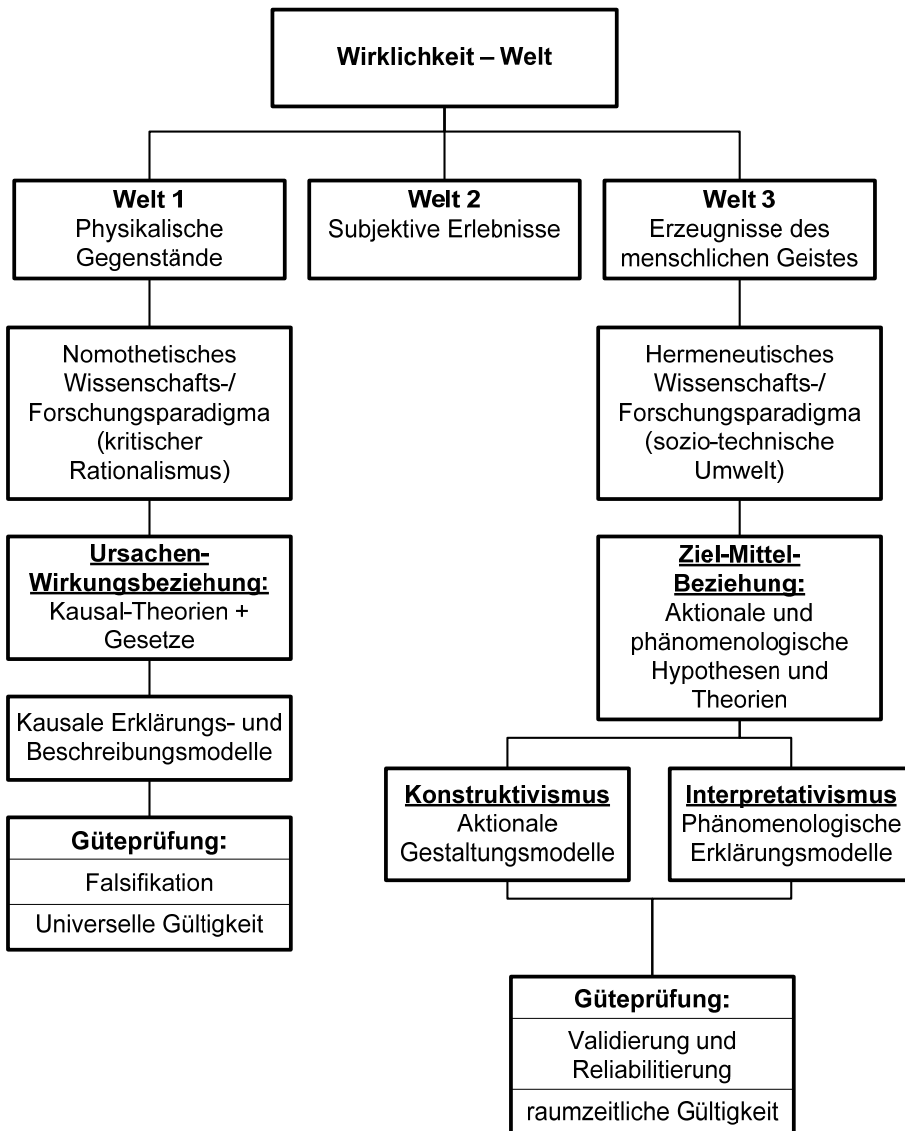


Bild 2: Weltbild der Wissenschaftstheorien in Anlehnung an Popper (Popper 1984) und Plessner (Plessner 1965) und erkenntnistheoretische Konsequenzen für Wissenschaftstheorie und Forschungsmethodik (Girmscheid 2007c)

Das holistische Modell zur Entwicklung und Bewertung von LC-Erhaltungsstrategien und LC-Erhaltungsvarianten setzt sich aus zwei konstruktivistischen, viablen Teilen zusammen:

- LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell - Konzept und Prozess der Bildung von LC-Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten
- LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zur wirtschaftlichen Bewertung der LC-Erhaltungsstrategien bzw. LC-Erhaltungsvarianten

Für die viable Gestaltung des LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodells und des LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodells wird das konstruktivistische Forschungsparadigma angewendet (Girmscheid 2007c). Die Modelle wurden denklogisch-deduktiv konstruiert (Validität). Zur wissenschaftlichen Güteprüfung wird die Triangulation (Yin 1994) herangezogen. Dazu wird das denklogisch-deduktive Modell in einen theoretischen Bezugsrahmen eingebettet und durch Realisierbarkeitstests (Reliabilität) auf die intendierte Input-Output-Beziehung überprüft (Girmscheid 2007c).

Als theoretischen Bezugsrahmen für das denklogisch-deduktiv entwickelte Konzept zur Erhaltungsstrategie- und Erhaltungsvariantenplanung wird die Systemtheorie (Boulding 1956), (Bertalanffy 1969) herangezogen. Das zugrundeliegende System in dem die LC-Erhaltungsstrategien und LC-Erhaltungsvarianten abgebildet werden wird durch folgende Systemdimensionen bestimmt:

- Willensbildungs-Dimension
 - Politische, volkswirtschaftliche, soziale und ökologische Bedingungen
 - Gewichtung der Mobilität in der Gesellschaft
 - Gewichtung der Verkehrsträger
 - Politische Zielbildung
 - Zielbildung für Strassenunterhalt
 - Budgetzuweisung
- 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 Belagskonstruktionen unter Belastung
 - Zeitliches Verhalten von Instandsetzungs- und Erneuerungsmassnahmen unter Belastung
- Technische Dimension
 - Struktureller Strassenaufbau
 - Typisierung der Schäden
 - Zuordnung von Instandsetzungs- und Erneuerungsmassnahmen zu den Schadenskategorien
- Nutzerdimension
 - Verkehrsaufkommen
 - Verkehrsmix

Das Konzept zur Bildung der viablen LC-Erhaltungsstrategien und LC-Erhaltungsvarianten gliedert sich in:

- Mission und Vision des Strassenunterhalts
- Zielbildung des Strassenunterhalts
- LC-Erhaltungsstrategiebildung zur Entwicklung von LC-Erhaltungsvarianten zur Umsetzung der Ziele
- LC-Erhaltungsvariantenbildung mit Schadens-Massnahmenvarianten-Zuordnung, Grenzwertbildung

Das viable LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell basiert auf den Grundlagen der LC-Erhaltungsstrategie- und LC-Erhaltungsvariantenbildung des LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodells sowie folgenden konstruktivistischen Ansätzen:

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

In diesem LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell werden

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

Der theoretische Bezugsrahmen für das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zur Sicherung der Validität wurde zweistufig gewählt:

- Systemabgrenzung mittels Systemtheorie (Boulding 1956), (Bertalanffy 1969) mit den räumlichen, inhaltlichen (Technische- und Nutzerdimension) und zeitlichen Dimensionen
- Strukturierung mittels Finanz- und Entscheidungstheorien (Ross, Westerfield et al. 2002), (Weber und Winckelmann 1990) sowie Simulationstheorien (Curran 1998).

2.5.1. Theoretischer Bezugsrahmen

Die in dieser Forschungsarbeit entwickelten Modelle zur Entwicklung und lebenszyklusorientierten Bewertung von Erhaltungsvarianten des Strassenunterhalts ordnen sich in den Gesamtkontext des Erhaltungsmanagements einer Strasse im Speziellen bzw. eines technischen Systems im Allgemeinen ein. Das Erhaltungsmanagement wird in begrifflicher Analogie zum Unternehmensmanagement (Bleicher 1996; Johnson und Scholes 2002; Grant 2005) in drei Ebenen gegliedert (Bild 3):

- Normative Ebene

- Strategische Ebene
- Operative Ebene

Im Unternehmensmanagement legt das normative Management die Unternehmenspolitik (Mission, Vision sowie Ziele) unter Berücksichtigung der gesellschaftlichen Legitimation fest. Das strategische Management befasst sich mit der Strategie, wie Ziele umgesetzt werden, unter Berücksichtigung der Innen- und Aussensicht zur Vorbereitung des operativen Erfolgs. Im operativen Management erfolgt die Umsetzung der Strategie sowie die Umsetzung und Steuerung des laufenden unternehmerischen Wertschöpfungsprozesses.

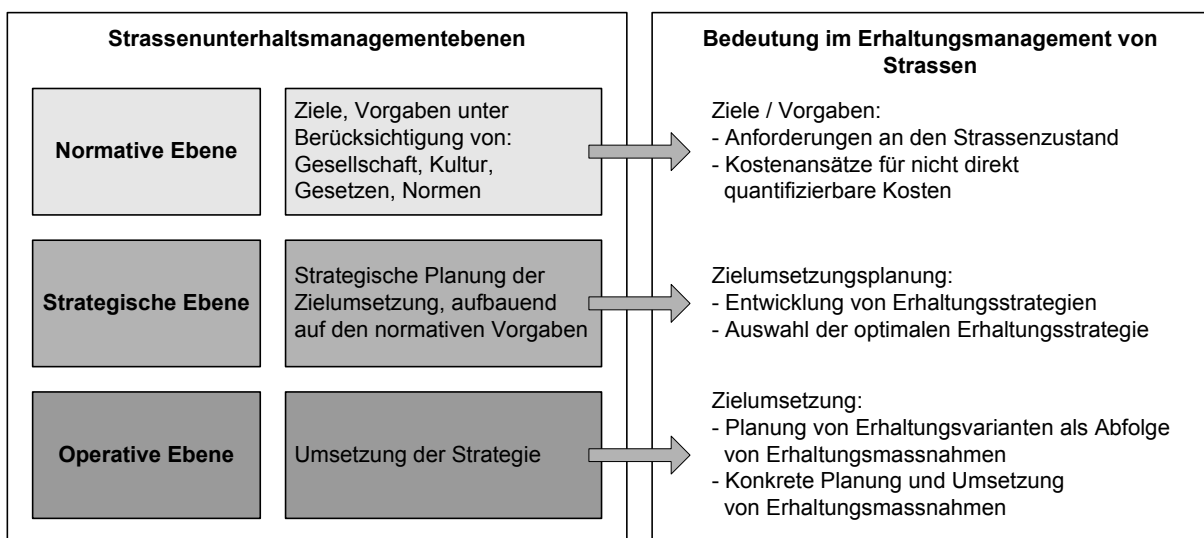


Bild 3: Strassenerhaltungsmanagementebenen in Anlehnung an Bleicher (Bleicher 1996)

Überträgt man diese Einteilung auf das Erhaltungsmanagement einer Strasse so ergibt sich analog zum Unternehmensmanagement die folgende Definition der drei Managementebenen (Bild 3):

- **Normative Ebene**
Auf der normativen Ebene werden von der Politik (Legislative) allgemeine Rahmenbedingungen für das Erhaltungsmanagement abgesteckt. Dies geschieht unter Berücksichtigung der gesellschaftlichen und kulturellen Vorgaben, die sich z.B. in Normen und Gesetzen widerspiegeln. Im Einzelnen werden die Anforderungen an den Strassenzustand in Bezug auf nicht zu unterschreitende Mindestanforderungen und einem gesellschaftlich akzeptablem Verhältnis von monetärem Input und der Verbesserung des Strassenzustands sowie die Kostenansätze für nicht direkt quantifizierbare Kostenarten wie z.B. Zeitkosten festgelegt.
- **Strategische Ebene**
Auf der strategischen Ebene werden die Vorgaben der normativen Ebene durch die Exekutive (Verwaltung) in LC-Erhaltungsstrategien umgesetzt. Die LC-Erhaltungsstrategie gibt den Rahmen für die Entwicklung einer oder mehrerer konkreter LC-Erhaltungsvarianten auf der operativen Ebene sowie die Nutzen- und Kostenbedingungen vor. Dabei müssen jeweils die kostenmässigen Auswirkungen bzw. der Kostenrah-

men auf der operativen Ebene beachtet und damit eine möglichst optimale Strategie entwickelt werden.

- Operative Ebene

Auf der operativen Ebene werden auf der Grundlage der gewählten LC-Erhaltungsstrategie verschiedene LC-Erhaltungsvarianten als konkrete Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen entwickelt. Ausserdem wird im nächsten Schritt die konkrete praktische Umsetzung der geplanten oder kurzfristig notwendigen Massnahmen koordiniert und überwacht. Die entwickelten Varianten lassen sich mit Hilfe von entsprechenden Kostenansätzen monetär bewerten und vergleichen. Damit ist auch eine wirtschaftliche Bewertung der gewählten Strategie möglich, die auf dieser Grundlage, im Rückgriff auf die strategische Ebene, angepasst und optimiert werden kann.

Die normative Ebene wird durch die Prioritätssetzung der Exekutiven unter Beachtung der legislativen Rahmenbedingungen gegeben und lässt sich im Erhaltungsmanagement einer Strasse bzw. eines Strassennetzes nicht beeinflussen. Die auf dieser Ebene gemachten Vorgaben sind als Grundlagen des Erhaltungsmanagements vom Betreiber des Strassennetzes zu übernehmen. Der Einfluss des Erhaltungsmanagements beginnt auf der strategischen Ebene und beinhaltet auch die konkrete Umsetzung auf der operativen Ebene.

In dieser Forschungsarbeit liegt der Fokus auf der operativen Ebene, d.h. auf der konkreten Planung und Bewertung verschiedener Massnahmenabfolgen. Hierzu muss allerdings auch auf die Vorgaben der strategischen Ebene zurückgegriffen werden, d.h. es muss eine Möglichkeit der Verlinkung der beiden Ebenen geschaffen werden. Dies geschieht im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell, das eine Methodik zur Entwicklung verschiedener LC-Erhaltungsvarianten auf der Grundlage einer vorgegebenen LC-Strategie liefert.

Die Entwicklung und Optimierung einer LC-Erhaltungsstrategie für das betrachtete Strassennetz ist nicht Gegenstand dieser Forschungsarbeit. Dieser wichtige Punkt des Erhaltungsmanagements sollte in weiteren Forschungsarbeiten genauer betrachtet werden.

2.5.2. Methodisches Vorgehen

Die Bewertung von zeitlichen Verschiebungen einzelner oder mehrerer Erhaltungsmaßnahmen setzt voraus, dass zunächst eine Basis- und eine Alternativvariante definiert wird. Dazu ist es erforderlich ein Modell zu entwerfen, das die Entwicklung und lebenszyklusorientierte wirtschaftliche Bewertung von verschiedenen LC-Erhaltungsvarianten im Rahmen der gewählten LC-Erhaltungsstrategie unter Berücksichtigung der relevanten Randbedingungen ermöglicht. Damit kann dann sowohl die Berechnung der Zusatzkosten einer zeitlichen Verschiebung von Massnahmen realisiert werden, als auch die kostenmässige Gegenüberstellung verschiedener LC-Erhaltungsvarianten bzw. der zugrundeliegenden LC-Erhaltungsstrategien vorgenommen werden.

Für die Planung und Bewertung verschiedener LC-Erhaltungsstrategien und der daraus abgeleiteten Erhaltungsvarianten wird ein zweistufiges Vorgehen vorgeschlagen (Bild 5).

In einem ersten Schritt erfolgt die Definition der LC-Erhaltungsvariante als konkrete Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen über den Betrachtungszeitraum. Auf Grundlegenden Vorgaben hierfür werden durch die in Mission und Vision festgelegten Zieldefinition gegeben. Aus den Inputparametern in das System Strassennetz, insbesondere dem Verkehrsaufkommen leitet

sich zunächst die Zustandsentwicklung ohne geplante Erhaltungsmassnahmen ab. Die Erhaltungsvariante leitet sich dann aus der im Vorfeld festzulegenden LC-Erhaltungsstrategie ab. Als Grundlage für die Definition der Erhaltungsvariante auf Grundlage der Vorgaben aus der LC-Erhaltungsstrategie wird das LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell als Leitfaden für die praktische Umsetzung entwickelt. Zu jeder LC-Erhaltungsvariante ergibt sich in Abhängigkeit von den geplanten Massnahmen der Zustandsverlauf und die Substanzentwicklung der Strasse.

Im Falle eines Vor- oder Aufschubs einer Erhaltungsmassnahme im Rahmen einer Erhaltungsvariante, muss die Massnahme – möglicherweise eine andere als ursprünglich geplant – strategiekonform sein.

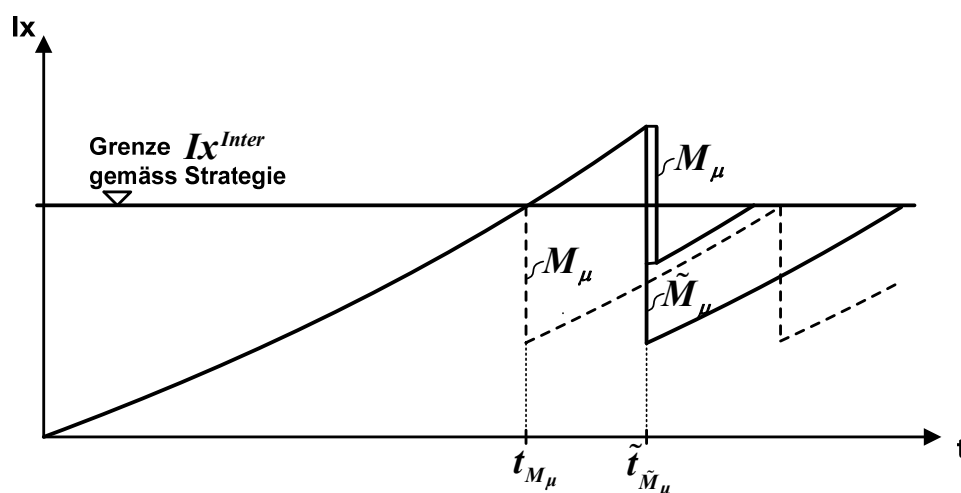


Bild 4: Aufschub einer notwendigen Massnahme und Wahl einer strategiekonformen Ersatzmassnahme

Die Entwicklung von LC-Erhaltungsstrategien ist nicht Gegenstand dieser Forschungsarbeit, in diesem Zusammenhang wird auf entsprechende spezifische Literatur verwiesen (SN 641931 2000; Girmscheid 2006c; Girmscheid 2007a).

Im zweiten Schritt werden die verschiedenen LC-Erhaltungsvarianten einer gewählten LC-Erhaltungsstrategie unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet. Dazu wird mit dem Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell ein Tool zur Quantifizierung der Kosten, d.h. des Werteverzehrs, aller relevanter Stakeholdergruppen entwickelt. Damit lassen sich einerseits die Gesamtkosten der einzelnen LC-Erhaltungsvarianten berechnen und gegenüberstellen und so die optimale LC-Erhaltungsvariante nach dem ökonomischen Minimalprinzip für die gewählte Strategie prognostizieren, andererseits können aus dem Vergleich einer ursprünglich geplanten LC-Erhaltungsvariante mit einer Verschiebungsalternative, die die entsprechenden Massnahmenverschiebungen abbildet, die Zusatzkosten einer zeitlichen Verschiebung von Erhaltungsmassnahmen berechnet werden.

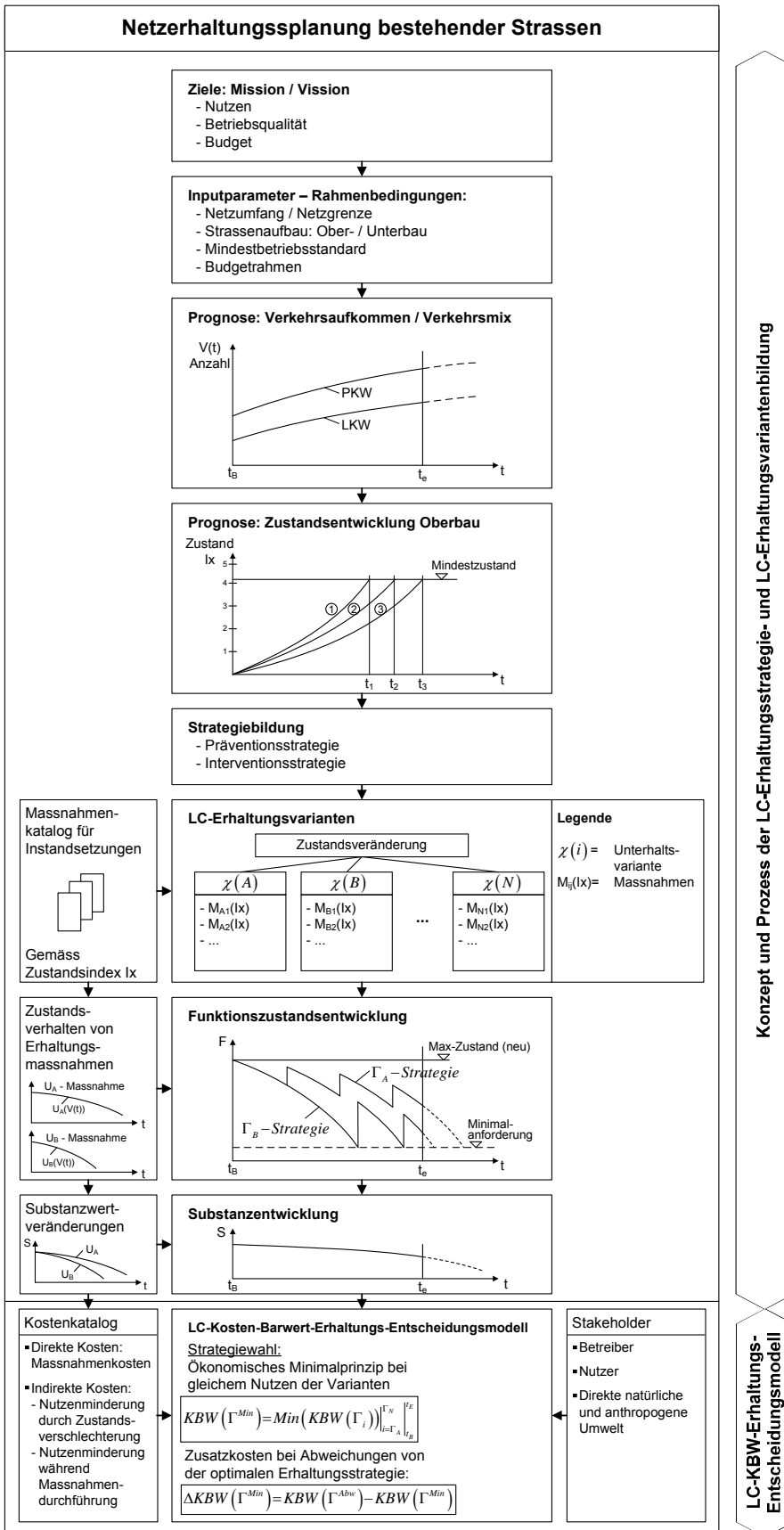


Bild 5: LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zur Variantendefinition und Kosten- bzw. Zusatzkostenberechnung (Girmscheid 2007a)

3. System- und Modeldefinition

Jedes vergleichende Wirtschaftlichkeitsanalysemodell muss zunächst mittels Systemtheorie in seine räumlichen, inhaltlichen und zeitlichen Strukturen und Interaktionen gegliedert werden. Als Grundlage für die Entwicklung von Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten sowie deren Bewertung in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse, muss also das betrachtete System definiert und abgegrenzt werden. Mit dem betrachteten System wird die Wirklichkeit möglichst exakt und vollumfänglich bezüglich der intendierten Aussage beschrieben. Auf dieser Grundlage können verschiedene Modelle als Abstraktion der Wirklichkeit für eine intendierte Aussage entwickelt werden, mit denen verschiedene Teilbereiche des Systems betrachtet werden. Die Modelle werden auf der Basis des konstruktivistischen Forschungsparadigmas entwickelt (Glaserfeld 1998; Girmscheid 2007c). Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Modelle zur Entwicklung bzw. Bewertung verschiedener Erhaltungsstrategien bzw. Erhaltungsvarianten konstruiert:

- LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell
- LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell

Im Kapitel System- und Modeldefinition werden zunächst die allgemeinen Grundlagen der Modellbildung beschrieben. In den Kapiteln 4 (LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell) und 5 (LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell) werden die beiden Modelle detailliert behandelt.

3.1. Systemdefinition und Systemabgrenzung

Bei der Systemdefinition zur Sicherung der Viabilität und Validität wird auf die Grundlagen der Allgemeinen Systemtheorie zurückgegriffen. Die Grundzüge der Allgemeinen Systemtheorie wurden von Bertalanffy für eine interdisziplinäre Anwendung definiert (Bertalanffy 1969). Die allgemeinen Grundsätze gelten auch für den Bereich der Baubetriebswissenschaften, müssen aber in der Anwendung entsprechend angepasst werden. Dies gilt insbesondere auch für die Systemabgrenzung, die bei den hier betrachteten Modellen eine grosse Rolle spielt.

Die Definition des Systems kann, je nach Blickwinkel der durchzuführenden Untersuchungen, auf drei Arten erfolgen (Bild 6):

- Funktionales Konzept
Es wird lediglich der Input ins und Output aus dem System sowie die Systemzustände betrachtet, die internen Beziehungen und Vorgänge im System werden nicht betrachtet.
- Strukturales Konzept
Es werden die einzelnen Teilsysteme innerhalb des Gesamtsystems und deren Relationen und Interaktionen betrachtet.
- Hierarchisches Konzept
Als Erweiterung des strukturalen Konzepts werden nicht nur die Relationen der einzelnen Teilsysteme auf einer Ebene betrachtet, sondern auch die hierarchische Anordnung der Teilsysteme untereinander betrachtet.

Das im Folgenden definierte System *Strassennetz* wird in Anlehnung an Ropohl (Ropohl 1999) in einer allgemeinen Systemdefinition beschrieben, die Elemente aller drei Konzepte enthält. Damit lassen sich die unterschiedlichen Anforderungen an die Systemdefinition in den beiden auf diesem System aufbauenden Modellen (LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell) erfüllen. In der detaillierten Systemdefinition wird im Folgenden jeweils angegeben welchem Konzept die Beschreibung zuzuordnen ist.

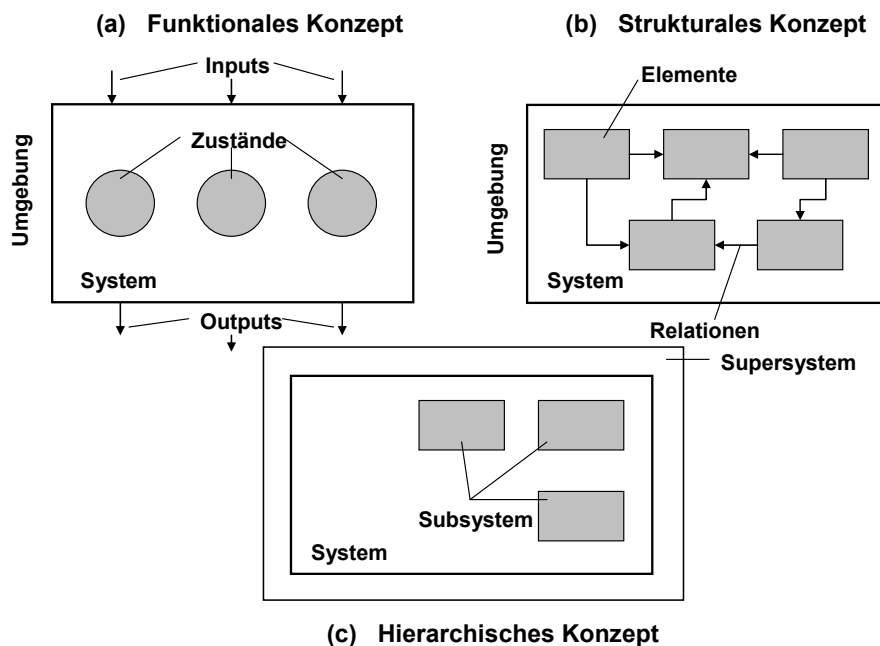


Bild 6: Konzepte zur Systembeschreibung (Girmscheid 2007c)

Des Weiteren wird in der Systemtheorie unterschieden in (Bertalanffy 1969):

- Statische Systeme, die über die Zeit unverändert bleiben
- Dynamische Systeme, bei denen mindestens ein Systemattribut eine Abhängigkeit von der Zeit aufweist

Das hier betrachtete System *Strassennetz* ist als dynamisches System einzuordnen, da sich der Strassenzustand laufend verändert und durch Erhaltungsmassnahmen in das System eingegriffen wird.

Das LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell zur Entwicklung und Definition von Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten (siehe Kapitel 4) und das darauf aufbauende LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zur finanziellen Bewertung der unterschiedlichen Erhaltungsvarianten (siehe Kapitel 5) sind auf demselben System mit denselben Systemgrenzen aufgebaut, daher muss das zugrundeliegende System für beide Modelle nur einmal definiert werden.

Bei der Definition des Systems erfolgt gegenüber dem im Kapitel Forschungsmethodik (siehe Kapitel 2.5) dargelegten holistischen Ansatz für die Systemdefinition eine Einschränkung auf die drei Hauptdimensionen inhaltlich, räumlich und zeitlich des Systems. Dabei führt die inhaltliche Dimension die technische Dimension und die Nutzerdimension zusammen. Die De-

definition und Abgrenzung des Systems erfolgt also in den folgenden Dimensionen (Fastrich und Girmscheid 2007):

- **Inhaltliche Dimension:**
In der inhaltlichen Definition und Abgrenzung des Systems wird das System an sich und die betrachteten Elemente des Systems festgelegt. Ausserdem erfolgt die Systemgliederung in Teilsysteme. Für die einzelnen Elemente des Systems bzw. der Teilsysteme werden Parameter und Bewertungsgrössen zur Zustandsbeschreibung festgelegt. Des Weiteren muss festgelegt werden, auf welcher Ebene des Rechnungswesens und mit welchen Methoden der Investitionsrechnung gearbeitet werden soll.
- **Räumliche Dimension:**
Die räumliche Dimension beschreibt die Ausdehnung des Systems in vertikaler und horizontaler Richtung. Das heisst es wird definiert welche Strassen eines Netzes in die Betrachtung einfließen, welche Bereiche der Strasse betrachtet werden (Fahrbahn, Randstreifen, Bankette, etc.) und inwieweit der horizontale Aufbau der Strasse betrachtet wird (Oberbau, Tragschichten, etc.).
Ausserdem wird eine Einteilung des Betrachtungsraums in Verbindungsabschnitte (orientiert an Verkehrsströmen und Verbindungen) und Verhaltensabschnitte (orientiert an Strassenaufbau und Verkehrsbelastung) vorgenommen.
- **Zeitliche Dimension:**
Es muss ein Anfang und Endzeitpunkt der Untersuchung bzw. Simulation festgelegt werden. Insbesondere im Endzeitpunkt ist sicherzustellen, dass bei allen betrachteten Varianten vergleichbare Verhältnisse bzgl. aller Randbedingungen vorliegen bzw. dass vorliegende Unterschiede in der Systemabgrenzung ausgeglichen werden.

Im Folgenden werden die betrachteten Systeme sowie deren Systemgrenzen in den obenstehenden drei Dimensionen definiert.

3.1.1. Inhaltliche Dimension

Die entwickelten Modelle fokussieren auf den Bereich der National- bzw. Kantonalstrassen, d.h. vor allem auf Strasse im Ausserortsbereich. Grund für diese Einschränkung ist die Tatsache, dass im innerörtlichen Bereich die Einflussparameter auf das System der Strasse ungleich höher sind als ausserorts und zudem viele dieser Parameter nichts mit dem eigentlichen Erhaltungsmanagement der Strasse zu tun haben. Dies gilt vor allem für Arbeiten die an im Strassenbereich verlegten Infrastrukturen auszuführen sind (Gas- und Wasserversorgung, Abwasser, Telekommunikation, etc.). Derartige Arbeiten führen zwangsläufig, auch bei fachgerechter Ausführung, zu einer Schädigung des Strassenkörpers, lassen sich aber in allgemeinen Modellen zur Zustandsentwicklung nicht vorhersagen. Die hier entwickelten Modelle können für innerörtliche Netze angepasst werden wenn entsprechende Einflussparameter der im Strassenkörper verlegten Infrastrukturen auf den Strassenkörper technisch vorgegeben werden.

3.1.1.1 Hierarchische Definition der inhaltlichen Dimension des Systems

In SN 640900 (SN 640900a 2004) wird die Strassenverkehrsanlage als Gesamtsystem mit den Modulen

- Fahrbahnen, Wege
- Kunstbauten
- Technische Ausrüstung
- Werkleitungen
- Nebenanlagen und sonstige Objekte

definiert (Bild 7).

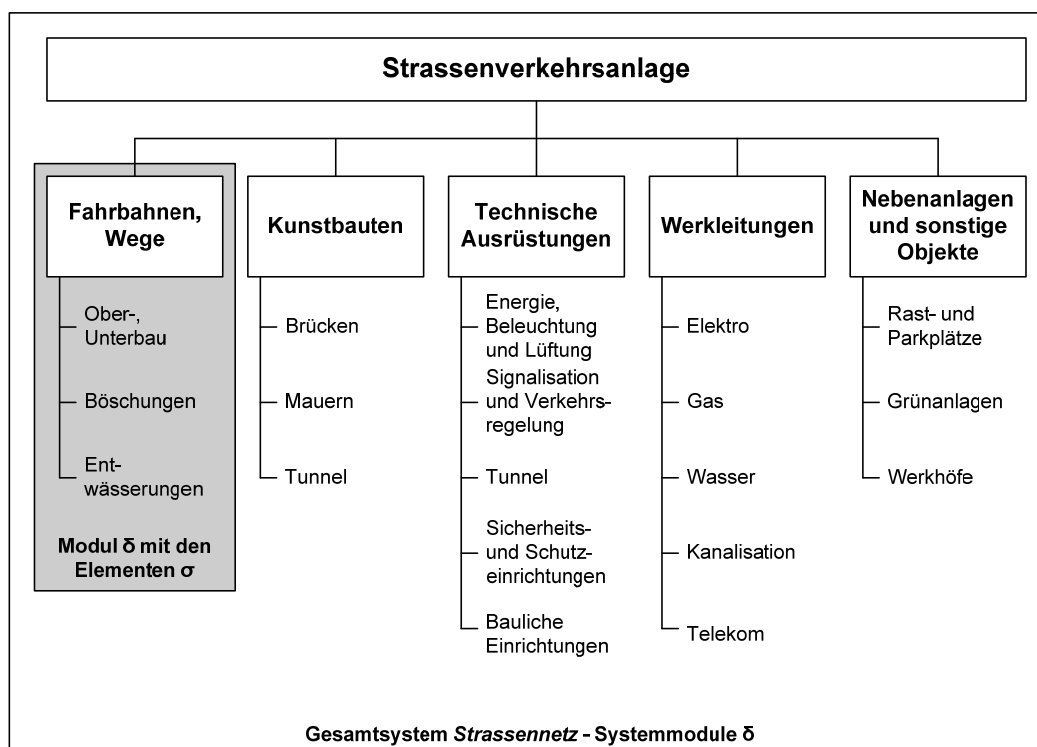


Bild 7: Systemmodule des Strassennetzes nach SN 640900

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird das Modul *Fahrbahnen und Wege* betrachtet, das sich in Ober- und Unterbau, Böschungen und Entwässerungen unterteilen lässt. Gegenstand der Untersuchungen ist das Modul δ *Fahrbahnen und Wege* mit dem Element σ *Oberbau* der Strasse. Das Erhaltungsmanagement der anderen Module δ wie z.B. Kunstbauten und technischen Ausrüstungen ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die entwickelten Modelle lassen sich jedoch mit entsprechenden Anpassungen auch auf diese Module anwenden.

Aufbauend auf der Systemgliederung nach SN640900 wird für die Definition und die wirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten im **LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell** bzw. im **LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell** die in Bild 8 dargestellte hierarchische Systemstruktur definiert. Die Systemdefinition der SN 640900 wird als Einteilung für die Systemebenen, nicht aber als

Systemdefinition übernommen. Auf diesen Systemebenen sind dann jeweils mehrere parallele Teilsysteme möglich.

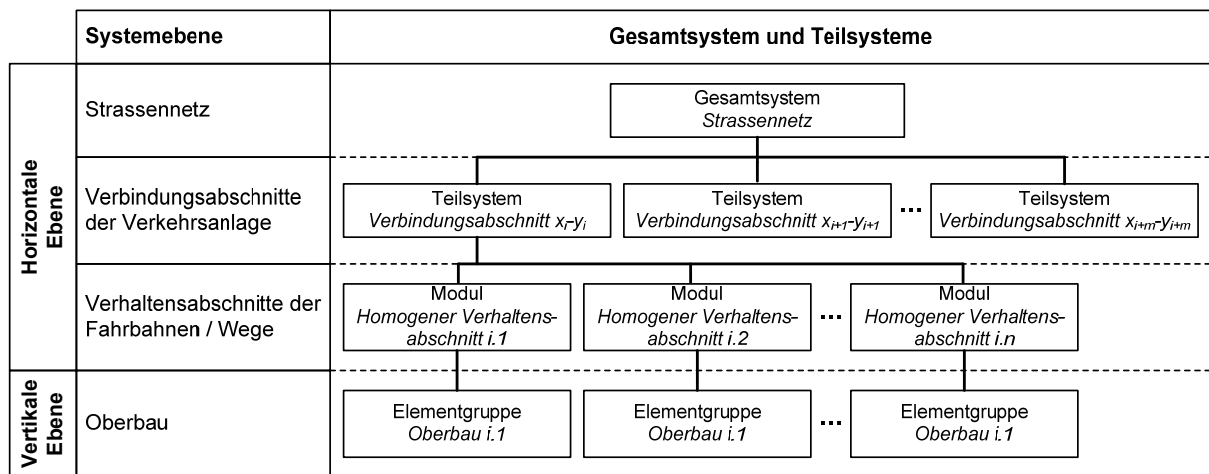


Bild 8: Strukturelles System Strasse - hierarchische Systemgliederung des Gesamtsystems auf den einzelnen Systemebenen

Als oberste Ebene des Systems wird oberhalb der Strassenverkehrsanlage das *Strassennetz* definiert. Dieser Ebene liessen sich weitere Systemebenen, wie das Infrastrukturnetz, die gesamte Volkswirtschaft etc. überordnen, eine derartige Erweiterung bringt allerdings für die durchzuführenden Untersuchungen keinen weiteren relevanten Input.

Unterhalb der Netzebene ist die Systemebene *Verbindungsabschnitt der Strassenverkehrsanlage* angeordnet. In einem Strassennetz unterteilt sich das System hier in mehrere parallele, voneinander unabhängige Teilsysteme, die je einen in sich „abgeschlossenen“ **Verbindungsabschnitt** repräsentieren (selbstständiger, räumlicher Verbindungsabschnitt, z.B. Nationalstrasse XY von A nach B).

Die nächste Systemebene beinhaltet die Verhaltensabschnitte des Moduls δ der *Fahrbahnen und Wege*. Die Strassenverkehrsanlagen untergliedern sich auf der Modulebene der *Fahrbahnen und Wege* in verschiedene homogene Verhaltensabschnitte. Die homogenen **Verhaltensabschnitte** werden in Hinblick auf die Verkehrsbelastung, den Strassenaufbau und den aktuellen Strassenzustand gebildet.

Die unterste Systemebene stellt die Elementgruppe σ , der *Oberbau* dar. Auf dieser Systemebene (Elementgruppe Oberbau) liegt der Focus der entwickelten Modelle, die darüber liegenden Module *Verhaltensabschnitt* und *Verbindungsabschnitt* dienen der Aggregation der Ergebnisse, der Einordnung in das Gesamtsystem sowie zur Abbildung von Interaktionen zwischen den einzelnen Teilsystemen. In die Entwicklung von Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten fliessen lediglich die Parameter der Elementgruppe *Oberbau* ein. Da in einem Strassennetz jedoch viele unterschiedliche abgeschlossene Elementgruppen (Oberbau / Unterbau / Bauwerke) auf der Ebene des Moduls *Fahrbahnen und Wege* und damit auch auf der Elementebene *Oberbau* bestehen, werden die Parameter der Elementgruppe *Oberbau* auf der obersten betrachteten Systemebene aggregiert (z.B. Netzebene oder Verbindungsabschnittsebene), ohne dabei aber zusätzliche Elementgruppen (z.B. Brücken) mit ihren Parametern in der gleichen oder übergeordneter Ebenen einzubeziehen. Die letztend-

liche Planung des Strassenerhalts sollte also möglichst auf der Ebene der *Verbindungsabschnitte* oder des *Strassennetzes* erfolgen, unter Beachtung der Parameter des *Oberbaus*. Die entwickelten Modelle - LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell - liessen sich jedoch auch auf die anderen Elementgruppen (Bild 7), wie z.B. *Technische Ausrüstungen, Kunstbauten, Werkleitungen* etc. erweitern, bzw. es liessen sich andere Elementgruppen (Bild 8) in das Gesamtsystem integrieren.

3.1.1.2 Systemtheoretische Einordnung des Systems *Strassennetz*

Das System *Strassennetz*, wie auch die untergeordneten Teilsysteme (Bild 8) und Module (Bild 7), können als offene, dynamische Systeme (Bertalanffy 1969), die mit der Umwelt interagieren angesehen werden. Es gibt also sowohl Input in das System, als auch Output aus dem System. Damit sind die einzelnen Parameter des Systems Veränderungen unterworfen und hängen funktional von der Zeit ab. Der Input besteht aus der Belastung der Strasse durch den Verkehr und Umwelteinflüsse sowie dem Erhaltungsaufwand des Betreibers. Der Output setzt sich aus dem Nutzen der durch die Bereitstellung der Strasse generiert wird und der Belastung für Nutzer und Dritte zusammen (Bild 9). Da ausser dem Erhaltungsmanagement keine weiteren Einflüsse auf das System betrachtet werden, bzw. diese als konstant für alle Varianten angesehen werden, kann der Input und Output des Gesamtsystems direkt für die Betrachtung der Elementgruppe *Oberbau* übernommen werden. Es wird also davon ausgegangen, dass alle Änderungen des Inputs oder Outputs des Gesamtsystems vom *Oberbau* beeinflusst werden. Die Grössen des Inputs und Outputs sind allerdings für jede Elementgruppe unterschiedlich, je nach Verkehrsbelastung, klimatischen Verhältnissen, etc.

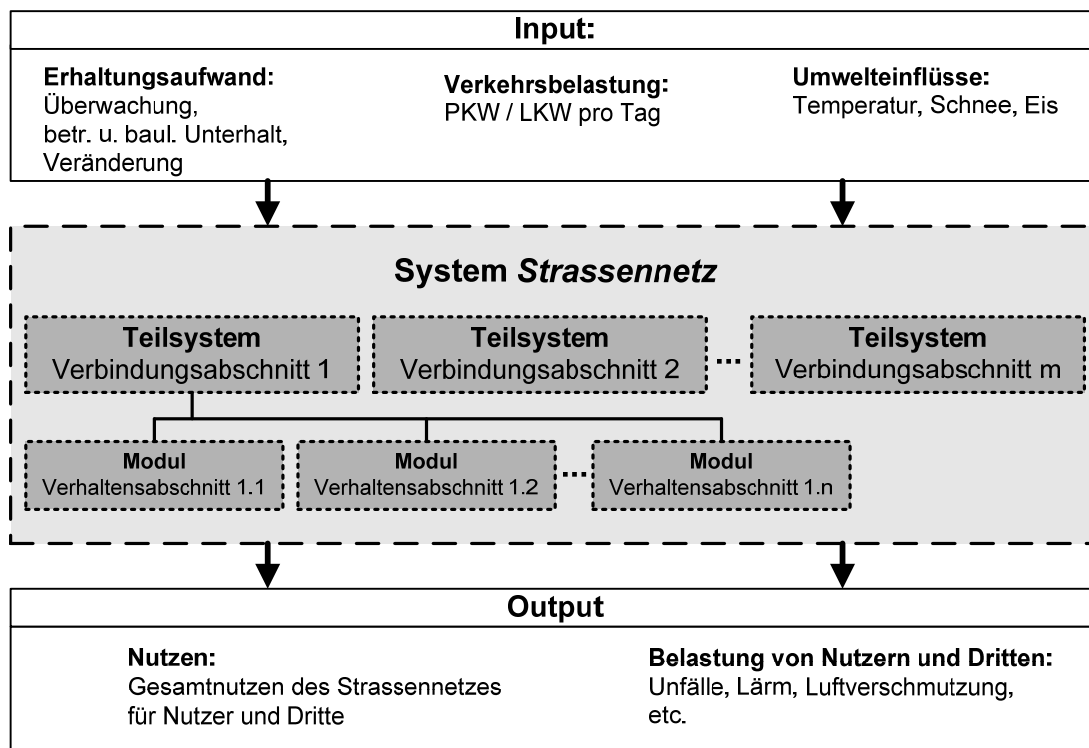


Bild 9: System *Strassennetz* – Input ins System und Output aus dem System

Für die Entwicklung und Bewertung verschiedener Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten müssen nicht alle Parameter des Systems *Strassennetz* (Bild 8) bzw. der untergeordneten Teilsysteme berücksichtigt werden. So können der Nutzen der Bereitstellung der Strasse, sowie sämtliche Kostenanteile, die unabhängig vom Strassenzustand und damit von der Erhaltungsvariante sind, im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell vernachlässigt werden (siehe Kapitel 5). Dennoch sind diese Parameter Teil des betrachteten Systems und müssen somit in die Systemdefinition einbezogen werden. Bertalanffy definiert das betrachtete System als eine von der Umwelt abgrenzbare Menge von Elementen, die untereinander in Wechselbeziehungen stehen, so dass ein zielgerichtetes Zusammenwirken erreicht wird (Bertalanffy 1969). Demnach ist das System, unabhängig davon, welche Parameter später benötigt werden, als eine abgeschlossene Einheit zu definieren. Aufbauend auf dem System stellen die Modelle - LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell - die Relationen der Elemente sowie die Dimensionen des Systems mit dem Betrachtungsfokus Nutzen-Kosten-Bewertung von Erhaltungsmassnahmen dar. In den Modellen werden dann jeweils lediglich die Systemparameter einbezogen, die für die jeweilige Betrachtung relevant sind.

3.1.1.3 Elementgruppe *Oberbau*

Die Grundlagen für das Erhaltungsmanagement und die Bewertung der verschiedenen Erhaltungsvarianten sind Parameter der Elementgruppe *Oberbau*. Im Folgenden werden daher die interne Sicht (strukturelle bzw. hierarchische Systemdefinition), als Grundlage des LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodells, sowie die Interaktionen mit der Umwelt (funktionale Systemdefinition), als Grundlage des LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodells, der Elementgruppe *Oberbau* genauer betrachtet.

Elementgruppe *Oberbau* - Interaktion mit der Umwelt

Die Interaktionen der Elementgruppe *Oberbau* und damit auch des Gesamtsystems *Strassennetz* mit der Umwelt, d.h. der Input ins System und der Output aus dem System, werden im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell bewertet. Der Input ins System kann für den Zustand des Oberbaus positiv (finanzieller Input) oder negativ (Verkehrsbelastung, Umwelteinflüsse) sein. Genauso kann der Output aus dem System einen Nutzen oder auch Kosten für die Stakeholder bedeuten (Bild 9). In dem auf der Systemdefinition aufbauenden LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell besteht der Output aus dem Modell lediglich aus Kostenanteilen, da von einem definierten Soll-Nutzen ausgegangen wird und die Strategie- bzw. Variantenentscheidung nach dem ökonomischen Minimalprinzip erfolgt. Dabei werden lediglich die Kostenabweichungen infolge eines schlechteren Strassenzustands bewertet, die beim Überschreiten definierter Grenzwerte des Strassenzustands anfallen. Es erfolgt also eine Relativbetrachtung im Vergleich zum Neuzustand. Aus der Verschlechterung des Strassenzustands resultieren einerseits erhöhte Kostenkomponenten und andererseits ein reduzierter Nutzen, der wiederum in Form von zusätzlichen Kosten ausgedrückt werden kann. In den Modellen können jedoch auch die absoluten Kosten berücksichtigt werden.

Inputkomponente – Erhaltungsaufwand

Der Input durch den vom Strassenbetreiber betriebenen Erhaltungsaufwand der Elementgruppe *Oberbau* umfasst sämtliche vom Strassenbetreiber erbrachten oder beauftragten Leistungen in diesem Bereich, d.h. Überwachung und Kontrolle sowie betrieblicher und baulicher Unterhalt (SN 640900a 2004).

Im Einzelnen setzt sich der Erhaltungsaufwand aus folgenden Komponenten zusammen:

- Überwachung
- Betrieblicher Unterhalt
- Baulicher Unterhalt
- Veränderung

Der Bereich der Überwachung sowie eine etwaige grundlegende Veränderungen der Strasse sind nicht Gegenstand der Untersuchungen im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell. Diese Komponenten können daher in der Betrachtung ausgeblendet werden.

Der betriebliche und bauliche Unterhalt lässt sich wie folgt aufteilen:

- Betrieblicher Unterhalt
 - Reinigung, Pflege
 - Wartung
 - Instandhaltung
 - Kleinreparaturen
- Baulicher Unterhalt
 - Reparaturen
 - Instandsetzung
 - Erneuerung

Die aus dem Erhaltungsaufwand resultierenden Kosten für den Strassenbetreiber werden im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell betrachtet (siehe Kapitel 5). Da für die Bewertung unterschiedlicher Erhaltungsvarianten nicht alle Komponenten des Erhaltungsaufwands relevant sind, wird bei der Definition des Modells differenziert in Kostenkomponenten, die vom Strassenzustand und von den Erhaltungsmassnahmen abhängig sind und davon unabhängigen Kostenkomponenten. Letztere können im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell, d.h. im Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener Erhaltungsstrategien bzw. Erhaltungsvarianten, vernachlässigt werden.

Inputkomponente – Verkehrsbelastung

Die Belastung der Fahrbahn (Autobahn) durch den Schwerverkehr stellt für die meisten Schadensprozesse die grösste Belastungskomponente dar. Die Belastung durch normale PKWs kann dagegen meist vernachlässigt werden. Für eine Prognose des Strassenzustands in die Zukunft ist es daher erforderlich die aktuelle Belastung durch den Schwerverkehr, so-

wie dessen wahrscheinliche Entwicklung zu kennen. In der Elementgruppe *Oberbau* resultiert aus einer Veränderung der Verkehrsbelastung eine Veränderung der Verhaltensfunktionen und Verlaufskurven des Strassenzustands.

Nach SN 640320 (SN 640320a 2000) wird die Belastung der Fahrbahn durch die äquivalente Verkehrslast ausgedrückt. Diese gibt die der tatsächlichen Belastung gleichwertige Anzahl von Überfahrten einer Referenzachse (8.16 t) an.

Inputkomponente – Umwelteinflüsse

Die Umwelteinflüsse auf den Oberbau können vielfältiger Natur sein. Hauptanteil der Inputkomponente Umwelteinflüsse sind extreme (hohe oder tiefe) Temperaturen. Darüber hinaus können vor allem ungewöhnliche Ereignisse wie Unwetter und Überschwemmungen zu Schäden am Oberbau führen. Da derartige Ereignisse unregelmässig auftreten und nicht vorhergesagt werden können wird im Einzelprojekt 2 (VSS 2004/712) bei der Ermittlung der Verlaufsfunktionen des Strassenzustands nur der Einfluss extremer Temperaturen berücksichtigt. Dieser Einfluss wird indirekt über die Höhenlage der Strasse erfasst. Eine komplette Erfassung der Umwelteinflüsse würde eine umfangreiche Risikobetrachtung erfordern, die aber bei entsprechender Datenlage einfach im Modell berücksichtigt werden kann.

Outputkomponente – Gesamtnutzen des Strassennetzes für Nutzer und Dritte

Der Gesamtnutzen des Strassennetzes beinhaltet sämtliche volkswirtschaftliche Vorteile, die sich aus der Existenz des Strassennetzes gegenüber dem Zustand ohne dieses ergeben. Da dies ein sehr hypothetischer Zustand ist, lässt sich der Gesamtnutzen meist nur auf der Ebene einzelner Strassen bzw. Strassenabschnitte (Verbindungsabschnitte) bestimmen.

Für die in diesem Forschungsbericht betrachteten Fragestellungen spielen die Nutzenkomponenten eine Rolle, die die Auswirkungen des Strassenzustands einer vorhandenen Strasse auf den Nutzen für Nutzer und Dritte beschreiben. Dementsprechend werden in den auf der Systemdefinition aufbauenden Modellen, insbesondere im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell nur die relevanten Nutzenkomponenten einbezogen. Ausserdem werden sämtliche betrachtete Nutzenkomponenten durch die Modellkonfiguration, die einen Vergleich zum optimalen Strassenzustand vorsieht, im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zu Kostenkomponenten, da der im Vergleich zum optimalen Zustand verringerte Nutzen dann als Kostenkomponente in die Bewertung einfliesst (siehe Kapitel 5).

Outputkomponente – Belastung von Nutzern und Dritten

Die Nutzung einer Strassenverkehrsanlage durch Personen- und Schwerverkehr bewirkt eine Belastung sowohl der Nutzer als auch unbeteiligter Dritter bzw. der Umwelt.

Die Belastung der Nutzer setzt sich aufgrund des jeweiligen Strassenzustands wie folgt zusammen:

- Zeitverlust in Abhängigkeit von der möglichen Fahrtgeschwindigkeit
- Erhöhter Verschleiss an den Fahrzeugen

- Erhöhter Treibstoffverbrauch
- Schäden durch Unfälle (von den Betroffenen zu tragender Anteil)

Die Belastung der Dritten bzw. der Umwelt setzt sich aufgrund des jeweiligen Strassenzustands zusammen aus:

- Schäden durch Unfälle (von der Allgemeinheit zu tragender Anteil)
- Erhöhte Lärmbelastung
- Erhöhte Luftverschmutzung

Die kostenmässige Bewertung der einzelnen Belastungskomponenten für Nutzer und Dritte erfolgt im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell (siehe Kapitel 5).

3.1.2. Räumliche Dimension

Die Systemdefinition und Systemabgrenzung in der räumlichen Dimension beschreibt die vertikale und horizontale Ausdehnung des betrachteten Systems. Ausserdem wird hier die Aufteilung der Verbindungsabschnitte in die einzelnen homogenen Verhaltensabschnitte vorgenommen, d.h. es erfolgt eine Systemgliederung nach dem strukturalen Konzept.

3.1.2.1 Vertikale Systemdefinition und Systemabgrenzung

In vertikaler Richtung kann der Strassenaufbau nach SN 640302b in die Module Oberbau und Unterbau unterteilt werden. Je nach den spezifischen Anforderungen bestehen diese aus verschiedenen gebundenen oder ungebundenen Schichten. Der Oberbau kann entweder aus bituminösen Schichten oder einer Betonfahrbahn aufgebaut sein. Im zugrundeliegenden Forschungspaket *Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen* wird lediglich der Oberbau bestehend aus einer oder mehreren Tragschichten sowie der Decke betrachtet. Die horizontale Systemgrenze liegt also bei der Oberkante des Planums. Alle darunter liegenden Schichten des Unterbaus werden nicht betrachtet (Bild 10).

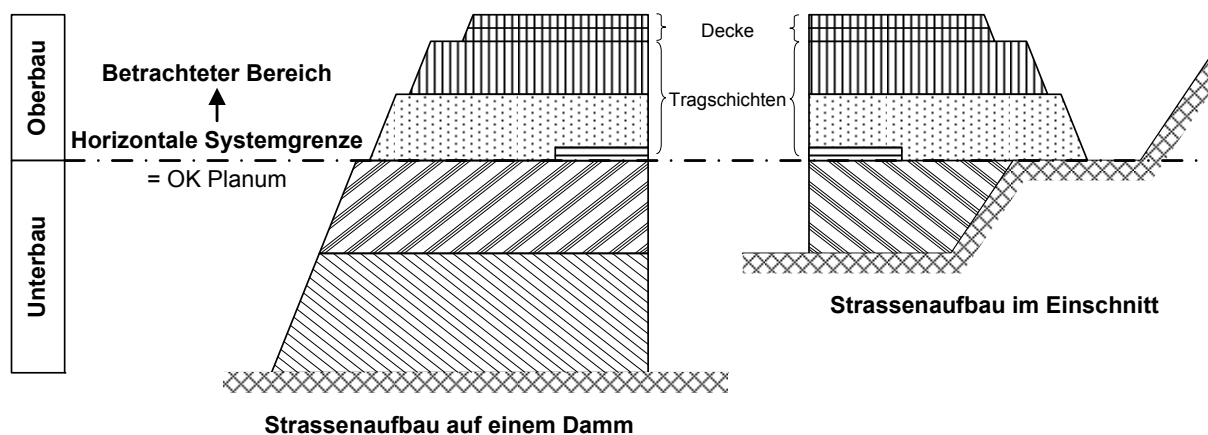


Bild 10: Strassenaufbau nach SN 640302b (SN 640302b 2000) – Horizontale Systemabgrenzung

3.1.2.2 Horizontale Systemdefinition und Systemabgrenzung

Die horizontale Systemdefinition und Systemabgrenzung legt fest welche Strassen oder Strassenabschnitte in die Betrachtung einfliessen sollen. Dies kann das gesamte Strassen-netz eines Strassenbetreibers beinhalten oder auch nur Teile des Netzes oder einzelne Ver-bindungsabschnitte von A nach B.

Die Planung von Erhaltungsmassnahmen mit Hilfe des LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodells basiert auf der Betrachtung einzelner Verbindungsab-schnitte (Teilabschnitte) eines Strassennetzes als unterste Ebene der hierarchischen Sys-temstruktur. Ein solcher Verbindungsabschnitt wird wiederum in homogene Verhaltensab-schnitte unterteilt, die folgende Punkte erfüllen müssen:

- Gleiche Verkehrsbelastung
- Gleicher oder vergleichbarer Strassenaufbau
- Gleicher Strassenzustand im Anfangszeitpunkt

In Bild 11 ist die Einteilung eines Strassenabschnitts (Verbindungsabschnitt) in homogene Verhaltensabschnitte beispielhaft dargestellt.

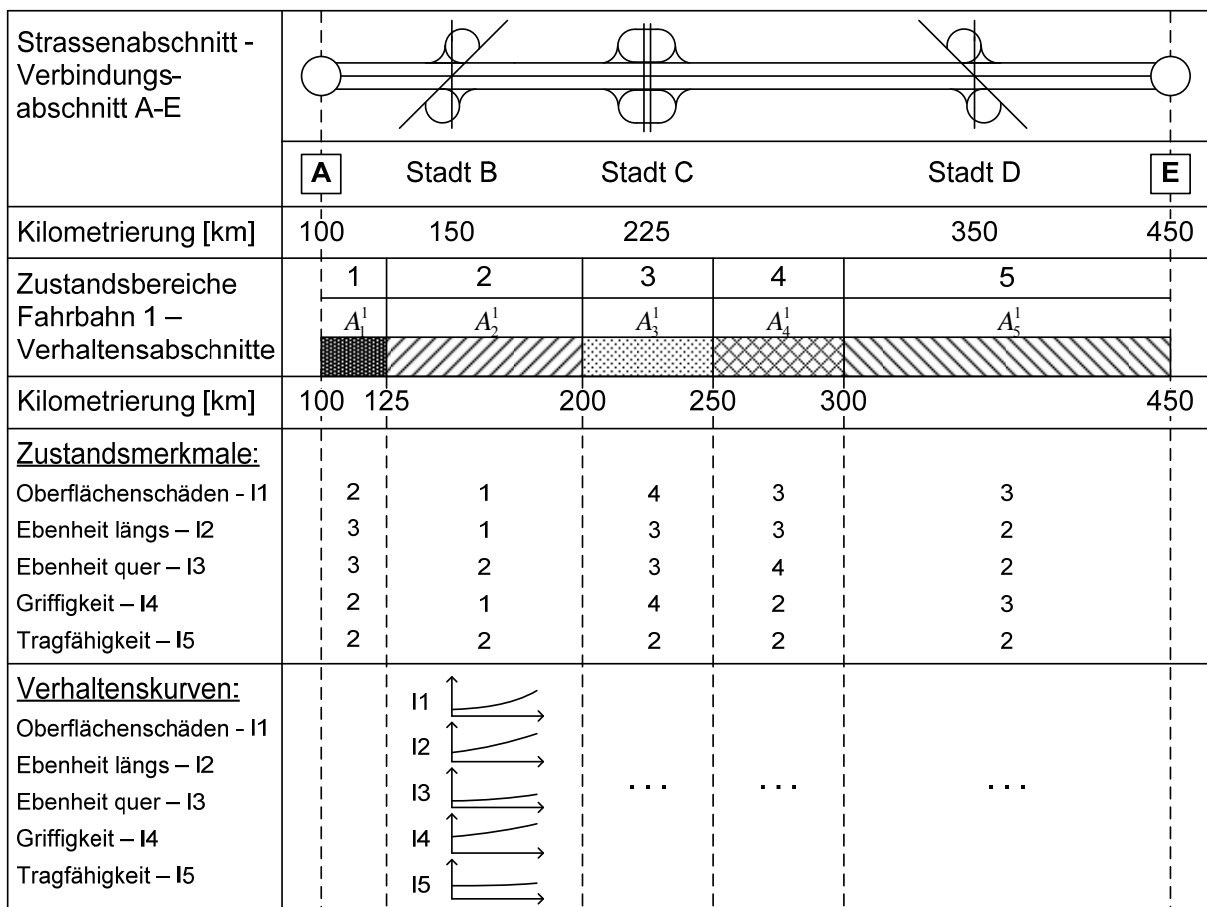


Bild 11: Einteilung eines Strassenabschnitts (Verbindungsabschnitt) in homogene Verhaltensabschnitte hinsichtlich Zustand, Aufbau und Belastung (Girmscheid 2007a)

3.1.3. Zeitliche Dimension

Das System Strassennetz stellt ein dynamisches System dar, d.h. es gibt Input ins und Output aus dem System. Damit haben die Systemparameter auch eine zeitliche Komponente und sind zeitlich veränderlich. Daher muss das System auch in der zeitlichen Dimension betrachtet und abgegrenzt werden.

Die natürlichen zeitlichen Grenzen des Systems *Strassennetz* stellen die Errichtung der Strassenverkehrsanlagen und deren Rückbau dar. Da aber bei den durchgeführten Betrachtungen davon ausgegangen wird, dass ein bereits bestehendes Strassennetz bezüglich des Unterhalts betrachtet werden soll und auch ein Rückbau nicht vorgesehen ist, ist das betrachtete System zunächst in zeitlicher Hinsicht als unbegrenzt anzusehen. In der Betrachtung auf Basis des Erhaltungsmanagement- und LC-Kosten-Barwert-Erhaltungsmodells wird ein definiertes in sich abgeschlossenes Intervall (Betrachtungszeitraum) aus dem gesamten Lebenszyklus der Strasse betrachtet. Die Definition des Betrachtungszeitraums sowie die zeitliche Abgrenzung erfolgt in der Modelldefinition (siehe Kapitel 3.2). Zur Bewertung der zeitlichen Abgrenzung wird im System der bauliche Zustand technisch gegenüber dem Neuzustand (technischer Lebenszyklus) bewertet. Im Modell erfolgt aufgrund dieser technischen Bewertung die kostenmässige Bewertung des Restwerts oder der Wiederherstellung.

3.2. Modellbildung und Modellabgrenzung

Aufbauend auf der Systemdefinition bildet ein Modell die in der Systemdefinition beschriebene Realität in Hinblick auf ein intendiertes Ziel der Betrachtung ab. Im Modell werden also zum einen gewisse Einschränkungen bezüglich der betrachteten Parameter im Hinblick auf die Relevanz in der jeweiligen Fragestellung vorgenommen, zum anderen werden neben den Systemparameter auch abgeleitete Grössen wie Kosten, Zustandsbewertungsindizes, etc. definiert.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden zwei aufeinander aufbauende Modelle entwickelt (LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell), denen dieselbe Systemdefinition zugrunde liegt. Daher können die Grundlagen der Modellbildung und Modellabgrenzung für beide Modelle gemeinsam definiert werden.

Die Modelldefinition und Modellabgrenzung erfolgt analog zur Systemdefinition und Systemabgrenzung in den Dimensionen:

- Inhaltliche Dimension
- Räumliche Dimension
- Zeitliche Dimension

3.2.1. Inhaltliche Dimension

Die internen Vorgänge im betrachteten System spielen vor allem für das LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell eine Rolle. Dieses Modell dient zur Entwicklung von Erhaltungsstrategien und den daraus abgeleiteten Erhaltungsvarianten. Grundlage aller Planungen von Erhaltungsmassnahmen sind die Veränderungen des betrachteten Teilsystems

Oberbau. Durch die Verkehrsbelastung und durch Umwelteinflüsse verschlechtert sich der Zustand des Oberbaus. Um diese Verschlechterung auszugleichen müssen in den Erhaltungsvarianten entsprechende Erhaltungsmassnahmen vorgesehen werden. Für die langfristige Planung von Erhaltungsmassnahmen ist es also erforderlich die Systemparameter messtechnisch aufzunehmen, zu bewerten und deren zukünftige Entwicklung zu prognostizieren.

3.2.1.1 Einordnung der entwickelten Modelle in die Systemstruktur

Das LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell legen unterschiedliche Schwerpunkte bezüglich des betrachteten Systems (Bild 12).

Das LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell legt den Focus auf die internen Vorgänge im System, das heisst vor allem die Entwicklung des Strassenzustands ohne bzw. mit entsprechenden Erhaltungsmassnahmen. Ziel ist die Aufrechterhaltung eines Mindeststandards der Strasse, d.h. die Sicherstellung des Bestands und der Funktionalität des Systems. Für das LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell sind also die strukturalen und hierarchischen Beziehungen im System von entscheidender Bedeutung.

Das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell hingegen fokussiert auf die Interaktionen des Systems mit der Umwelt, d.h. den In- und Output des Systems. In der Wirtschaftlichkeitsanalyse wird die Effizienz des Systems bei den einzelnen Erhaltungsvarianten bewertet, d.h. es wird das optimale Verhältnis von Input ins System zu Output aus dem System gesucht. Dies stellt eine rein externe Betrachtung des Systems dar, die sich in einem funktionalen Systemkonzept abbilden lässt.

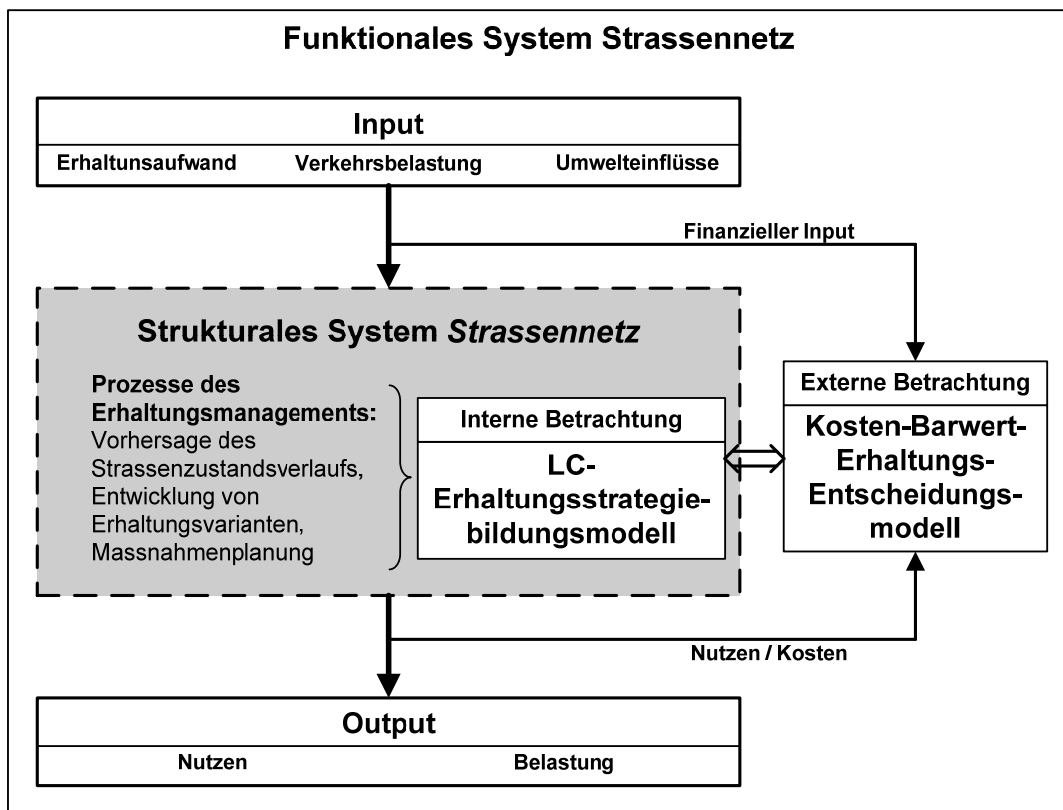


Bild 12: Modellbildung – Interne Betrachtung im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und externe Betrachtung im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell

3.2.1.2 Bewertung des Strassenzustands

Um den Strassenzustand objektiv und mathematisch beschreiben zu können werden aus den vor Ort aufgenommenen Daten Zustandsindizes zu den einzelnen Parametern des Strassenzustands abgeleitet. Zusätzlich können auch zusammengesetzte Indizes zur Gesamtbewertung des Strassenzustands gebildet werden.

Bewertung des Strassenzustands - Zustandsindizes

Wichtigster Parameter im System ist der Strassenzustand sowie dessen Entwicklung. Die Notwendigkeit von Erhaltungsmassnahmen und damit die Erhaltungskosten, sowie sämtliche Kostenanteile der Nutzer und Dritten hängen direkt vom Strassenzustand ab.

Die Aufnahme und Bewertung des Strassenzustands in verschiedenen Zustandsindizes ist abhängig von nationalen Normen in den einzelnen Ländern. In der Schweiz definiert die SN 640925 (SN 640925b 2003) die Zustandserhebung und Indexbewertung des Strassenzustands. Die Bewertung erfolgt in fünf Einzelindizes:

- I_1 – Oberflächenschäden
- I_2 – Ebenheit in Längsrichtung

- I_3 – Ebenheit in Querrichtung
- I_4 – Griffigkeit
- I_5 – Tragfähigkeit

Die Indizes I_2 bis I_5 beschreiben jeweils eine einzelne Eigenschaft des Oberbaus, wohingegen der Index I_1 unterschiedliche Schäden, die in Merkmalgruppen ermittelt werden, zusammenfasst. Bei der Bildung der Merkmalgruppen des Einzelindex I_1 , wird unterschieden in Strassen mit bitumenhaltigem Belag und Strassen mit Betonbelag:

Strassen mit bitumenhaltigem Belag:

- I_{A1} – Oberflächenglätte
- I_{A2} – Belagsschäden
- I_{A3} – Belagsverformungen
- I_{A4} – Strukturelle Schäden
- I_{A5} – Flicke

Strassen mit Betonbelag:

- I_{B1} – Oberflächenglätte
- I_{B2} – Materialverluste
- I_{B3} – Fugen- und Kantenschäden
- I_{B4} – Vertikalverschiebung
- I_{B5} – Risse, Brüche
- I_{B6} – Flicke

Die Erhebung des Zustands der Einzelindizes erfolgt durch visuelle oder messtechnische Erfassung. Aus den Zustandswerten werden dann die Indexbewertungen für die jeweiligen Einzelindizes abgeleitet. Das entsprechende Vorgehen bei den verschiedenen Einzelindizes ist in SN 640925 ausführlich beschrieben (SN 640925b 2003).

Gesamtbewertung des Strassenzustands – zusammengesetzte Indizes

Die Einzelindizes beschreiben jeweils nur eine bzw. einige Eigenschaften des Oberbaus. Für das Erhaltungsmanagement ist es aber erforderlich nicht nur einzelne Merkmale zu betrachten, sondern auch den Gesamtzustand des Oberbaus zu bewerten. Daher wurden in der SN 640904 (SN 640904 2003) aus den Einzelindizes abgeleitete Substanz- und Gebrauchswerte entwickelt. Aufbauend dieser Norm entwickelten Rafi, Scazziga und Lindenmann ein detailliertes Konzept zur Gesamtbewertung des Fahrbahnzustands (Rafi, Scazziga et al. 2006). Darin definieren sie drei, aus den jeweils massgebenden Einzelindizes zusammengesetzte Spartenindizes:

- **Sicherheitswert** I_{SEC} – umfasst Parameter welche die Verkehrssicherheit beeinflussen

$$I_{SEC} = \text{Max}(I_3, I_4)$$

- **Gebrauchswert GW** – umfasst Parameter welche die Qualität der Fahrbahn aus Sicht des Strassennutzers beeinflussen

- Asphaltbelag, visuelle / manuelle Erfassung:

$$GW_{A1} = 1/4(I_{A1} + I_{A2} + I_{A3} + I_3) + 1.25 \cdot \sigma(I_{A1}, I_{A2}, I_{A3}, I_3)$$

- Asphaltbelag, messtechnische Erfassung:

$$GW_{A2} = 1/5(I_{A2} + I_{A3} + I_2 + I_3 + I_4) + 1.25 \cdot \sigma(I_{A2}, I_{A3}, I_2, I_3, I_4)$$

- Betonbelag, visuelle / manuelle Erfassung:

$$GW_{B1} = 1/4(I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} + I_{B4}) + 1.25 \cdot \sigma(I_{B1}, I_{B2}, I_{B3}, I_{B4})$$

- Betonbelag, messtechnische Erfassung:

$$GW_{B2} = 1/5(I_{B2} + I_{B3} + I_{B4} + I_2 + I_4) + 1.25 \cdot \sigma(I_{B2}, I_{B3}, I_{B4}, I_2, I_4)$$

mit σ = Standardabweichung der Einzelindizes I_{Ax}, I_{Bx}, I_x

- **Substanzwert SW** – umfasst Parameter welche für den Bestand der Anlage massgeben sind:

- Asphaltbelag, visuelle / manuelle Erfassung:

$$SW_{A1} = 1/3(I_{A3} + I_{A4} + I_{A5}) + 1.25 \cdot \sigma(I_{A3}, I_{A4}, I_{A5})$$

- Asphaltbelag, messtechnische Erfassung:

$$SW_{A2} = 1/5(I_{A3} + I_{A4} + I_{A5} + I_2 + I_5) + 1.25 \cdot \sigma(I_{A3}, I_{A4}, I_{A5}, I_2, I_5)$$

- Betonbelag, visuelle / manuelle Erfassung:

$$SW_{B1} = 1/5(I_{B2} + I_{B3} + I_{B4} + I_{B5} + I_{B6}) + 1.25 \cdot \sigma(I_{B2}, I_{B3}, I_{B4}, I_{B5}, I_{B6})$$

- Betonbelag, messtechnische Erfassung:

$$SW_{B2} = 1/6(I_{B2} + I_{B3} + I_{B4} + I_{B5} + I_{B6} + I_2) + 1.25 \cdot \sigma(I_{B2}, I_{B3}, I_{B4}, I_{B5}, I_{B6}, I_2)$$

mit σ = Standardabweichung der Einzelindizes I_{Ax}, I_{Bx}, I_x

Diese drei Spartenindizes (I_{SEC} , GW , SW) werden im betrachteten System sowie den darauf aufbauenden Modellen – LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell – für die Gesamtbewertung des Fahrbahnzustands herangezogen.

Mindeststandards – Interventionsgrenzen

Im Rahmen des Erhaltungsmanagements muss der Strassenbetreiber einen gewissen Mindeststandard des Strassenzustands aufrechterhalten. Dies wird einerseits von den Ansprüchen der Nutzer vorgegeben, andererseits sollten auch rechtliche Konsequenzen berücksichtigt werden, falls durch einen zu schlechten Strassenzustand Unfälle verursacht werden. Die Schweizer Norm macht bezüglich des Mindeststandards keine konkreten Vorgaben und überlässt die Festlegung damit den einzelnen Strassenbetreibern. Der Strassenbetreiber sollte sich daher gewisse Mindeststandards für die einzelnen Strassenzustandsindizes definieren und diese als Interventionsgrenzen für das Erhaltungsmanagement vorgeben. Die

Interventionsgrenzen beziehen sich entweder auf einen der fünf Einzelindizes oder auf die daraus abgeleiteten Spartenindizes. Die Interventionsgrenzen

$$I_{1,Grenz}, I_{2,Grenz}, I_{3,Grenz}, I_{4,Grenz} \text{ und } I_{5,Grenz}$$

berücksichtigen nur eine Eigenschaft des Oberbaus, während die Interventionsgrenzen der Spartenindizes

$$I_{SEC,Grenz}, GW_{Grenz} \text{ und } SW_{Grenz}$$

zur Sicherstellung des Gesamtzustands des Oberbaus dienen.

Die Interventionsgrenzen stellen das absolute Minimum des Strassenzustands dar, das nicht unterschritten werden darf. Zusätzlich zu diesen Grenzen können in der Erhaltungsstrategie zusätzliche Grenzwerte, wie z.B. eine Präventiv bzw. eine Korrektivgrenze festgeschrieben werden, die im Rahmen der gewählten Strategie nicht unterschritten werden sollten (siehe Kapitel 4.1). Diese Grenze sind prinzipiell unabhängig von der Interventionsgrenze, können aber mit dieser zusammenfallen.

3.2.1.3 Prognose der Entwicklung des Strassenzustands

Für ein langfristiges Erhaltungsmanagement ist es erforderlich, nicht nur den aktuellen Strassenzustand zu kennen, sondern auch dessen zukünftige Entwicklung zu prognostizieren. Im Rahmen des Forschungspakets *Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement* wurden daher im Einzelprojekt 2 (VSS 2004/712) Verhaltensfunktionen und die dazugehörigen Verlaufskurven für den Fahrbahnzustand in den fünf Einzelindizes entwickelt. Dabei wurde nach Strassentyp ($StrTyp$ = Hochleistungsstrasse, Hauptverkehrsstrasse, etc.), der äquivalenten Verkehrslast (TF_n), den klimatischen Verhältnissen (berücksichtigt durch die Höhenlage H) und der Verhaltensklasse (V) differenziert.

$$I_x(t) = f(StrTyp, TF_n, H, V)$$

mit: $I_x(t)$ = Zeitlicher Verlauf des Strassenzustandsindex x mit $x = \{1, 2, 3, 4, 5\}$

$StrTyp$ = Strassentyp (Hochleistungsstrasse, Hauptverkehrsstrasse, etc.)

TF_n = Äquivalente Verkehrslast

H = Höhenlage

V = Verhaltensklasse

Damit wurde die Möglichkeit geschaffen den wahrscheinlichen Verlauf des Strassenzustands speziell für die in der Schweiz vorliegenden Rahmenbedingungen vorherzusagen.

3.2.1.4 Finanztechnische Systemauswahl

Die finanztechnische Seite der Modelldefinition regelt wie und mit welchem finanzmathematischen Verfahren die Bewertung der verschiedenen Erhaltungsvarianten in der Wirtschaftlich-

keitsanalyse erfolgen soll. Sie gibt damit den Rahmen für das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zur Bewertung der verschiedenen Erhaltungsvarianten vor. Damit liegt der Fokus hier auf den Input/Output-Beziehungen des zugrundeliegenden Systems, also einer funktionalen Systembetrachtung.

Betrachtungsebene

Für die monetäre Bewertung der verschiedenen Erhaltungsvarianten in der Wirtschaftlichkeitsanalyse muss festgelegt werden, auf welcher Ebene des Rechnungswesens die Betrachtung erfolgen soll. Damit wird festgelegt welche finanztechnischen Bewegungsgrössen betrachtet werden. Grundsätzlich gibt es vier mögliche Betrachtungsebenen für eine Wirtschaftlichkeitsanalyse (Bild 13):

- Auszahlungen / Einzahlungen
- Ausgaben / Einnahmen
- Aufwand / Ertrag
- Kosten / Leistung

Die verschiedenen Ebenen des Rechnungswesens überschneiden sich teilweise. So können beispielsweise Kosten in einigen Fällen gleichzeitig Ausgaben sein und umgekehrt.

Bewegungsgrössen		Bestandsgrössen	Ebene des Rechnungswesens
Auszahlungen	Einzahlungen	Liquide Mittel	Finanzbuchhaltung
Ausgaben	Einnahmen	Geldvermögen	
Aufwand	Ertrag	Gesamtvermögen	
Kosten	Leistung	Betriebsnotwendiges Vermögen	Kostenrechnung

Bild 13: Modellebene Finanzen: Bewegungsgrössen und Bestandsgrössen auf den unterschiedlichen Ebenen des Rechnungswesens

Insbesondere im angelsächsischen Sprachraum liegt der Fokus von Investitionsentscheidungen und Wirtschaftlichkeitsanalysen immer auf der dynamischen Betrachtung der Cash-Flows, beispielsweise in einer Net-Present-Value-Analyse (Hirst 2001; Ross, Westerfield et al. 2002; Newnan, Eschenbach et al. 2004). In diesem Fall werden die Auszahlungen und Einzahlungen bzw. die Ausgaben und Einnahmen betrachtet. Dies findet sich insbesondere auch in Grundlagenwerken im Bereich der Lebenszykluskostenberechnung (Boussabaine und Kirkham 2004).

Im Falle einer kalkulatorischen Kostenbetrachtung wird im englischen von „Book Costs“ gesprochen. Eine Analyse auf der Ebene der „Book Costs“ wird in der entsprechenden Fachliteratur ausdrücklich nicht für Investitionsentscheide und langfristige Wirtschaftlichkeitsanaly-

sen empfohlen (Ross, Westerfield et al. 2002; Newnan, Eschenbach et al. 2004). Die Kostenrechnung mit kalkulatorischen Kosten stellt ein Verfahren des internen Rechnungswesens dar. Sie eignet sich für das rückwärtsgewandte Controlling sowie für kurzfristige Planungen z.B. um Prozesskosten umzulegen und die Kosten von Produkten zu kalkulieren. Als Tool für die strategische, langfristige Finanzplanungen ist sie aber ungeeignet.

Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse verschiedener Erhaltungsvarianten im Strassenunterhalt wäre demnach also prinzipiell auf der Ebene von Ausgaben und Einnahmen (meist gleich Auszahlungen und Einzahlungen) durchzuführen. Für das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell wurde dennoch die Ebene der Kostenrechnung gewählt, um auch den nicht zahlungswirksamen Werteverzehr der verschiedenen Stakeholdergruppen erfassen zu können. Allerdings wird nicht mit kalkulatorischen Kosten (Abschreibungen, Umlagen, etc.) gerechnet, sondern die tatsächlichen Zahlungsströme als direkte Kosten berücksichtigt.

Stakeholderebene

Im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell werden die Kosten der Stakeholdergruppen

- Strassenbetreiber
- Nutzer
- Dritte

betrachtet. Im Allgemeinen beziffern Kosten den Werteverzehr zur Erbringung einer betrieblichen Leistung (Wöhe 1984). Angepasst auf den hier vorliegenden Fall drücken die Kosten den mit der Nutzung und der Erhaltung der Strasse verbundenen Werteverzehr auf Seiten der Stakeholder aus, wenn ein definierter Soll-Zustand des Strassenzustands unterschritten wird.

Die Kosten einer Erhaltungsvariante setzen sich zusammen aus:

- Dem Werteverzehr des Strassenbetreibers für den laufenden Strassenunterhalt und für Erhaltungsmassnahmen
- Dem Werteverzehr bei den Nutzern infolge einer Nutzenminderung bzw. erhöhter Kosten, wenn ein definierter Soll-Zustand unterschritten wird
- Dem Werteverzehr bei Dritten (Umwelt, Gesellschaft) infolge einer erhöhten Belastung der Allgemeinheit, wenn ein definierter Soll-Zustand unterschritten wird

Auf Seiten der Nutzer und der Dritten liegt fast ausschliesslich ein abstrakter Werteverzehr z.B. in Form von Zeitverlusten, erhöhtem Schadstoffausstoss, etc. vor, der nicht zu direkten und messbaren Zahlungsströmen führt. Daher ist die Betrachtung auf Kostenebene die einzige Möglichkeit, diese Effekte in der Wirtschaftlichkeitsanalyse einzufangen, da bei diesen keinerlei Ausgaben oder Auszahlungen entstehen.

Für die Betrachtung der Kosten des Strassenbetreibers wird das System so konfiguriert, dass sämtliche Zahlungsströme direkt zum Zeitpunkt ihres Auftretens in der Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt werden. Kalkulatorische Ansätze wie Abschreibungen über längere Zeiträume werden vermieden. Damit wird erreicht, dass der Strassenbetreiber im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse auch einen Überblick über die Höhe und den Zeitpunkt

der einzelnen Cash-Flows bekommt, was vor allem im Hinblick auf die Budgetplanung von entscheidender Bedeutung ist. Es werden daher folgende Annahmen getroffen (Bild 14):

- Strasseneigentümer und Strassenbetreiber sind wirtschaftlich getrennte Entitäten.
- Der Strassenbetreiber übernimmt im Anfangszeitpunkt der Betrachtung ein existierendes Strassensystem und hat die Aufgabe dieses über den Betrachtungszeitraum zu erhalten.
- Es werden die Kosten des Strassenbetreibers für die Erhaltung der Strasse berücksichtigt, die Kosten für die Erstellung der Strasse werden nicht berücksichtigt, da sie bei bestehenden Strassen vor dem Betrachtungszeitraum angefallen sind.
- Unterschiede zwischen dem Strassenzustand im Anfangszeitpunkt und im Endzeitpunkt werden über die Systemabgrenzung berücksichtigt.

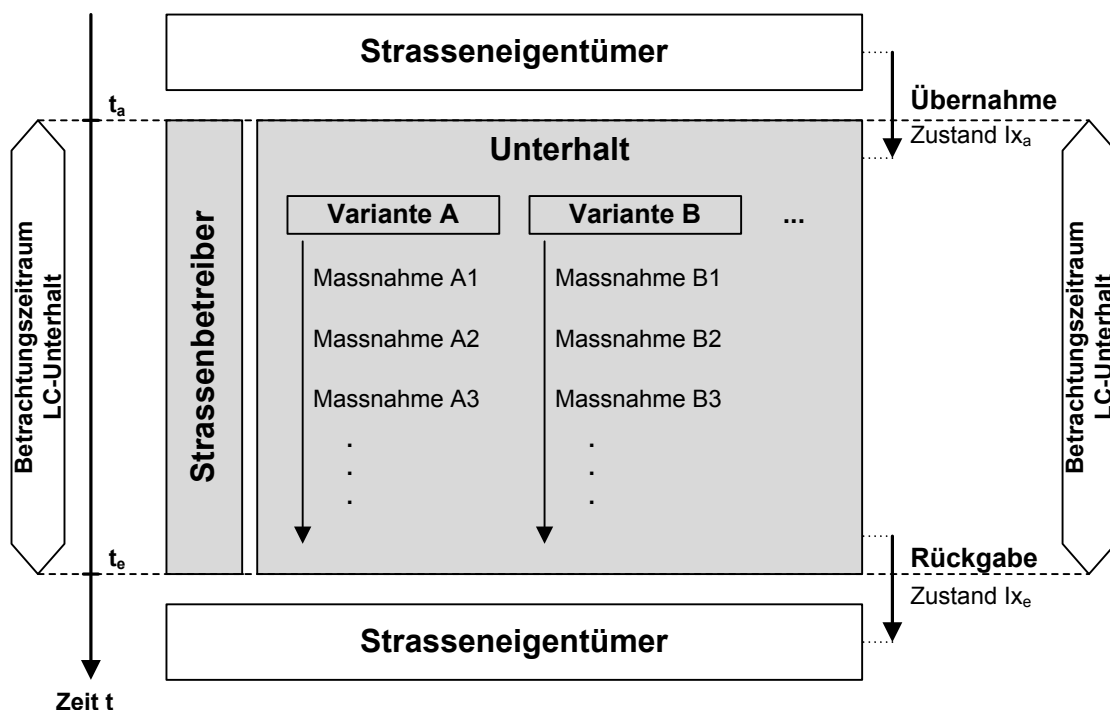


Bild 14: Modellkonfiguration bestehender Strassen bzw. Strassennetze für die Betrachtung der Kosten des Strassenbetreibers

Diese Modellkonfiguration ist für alle Fälle bestehender Strassennetze anwendbar, auch wenn der Strassenbetreiber in der Realität gleich dem Strasseneigentümer ist. Es wird mit dieser Aufteilung lediglich erreicht, dass im Rahmen einer Kostenbetrachtung (die notwendig ist um den Werteverzehr auf Seiten der Nutzer und Dritter einzubeziehen) eine Cash-Flow-orientierte Betrachtung der Betreiberkosten möglich ist. Sämtliche Ausgaben werden direkt im Zeitpunkt ihres Auftretens als Kosten in der Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt. Ein Strassenbetreiber der gleichzeitig Strasseneigentümer ist müsste sonst theoretisch die Ausgaben für Erhaltungsmassnahmen als Investitionen in sein Anlagegut ansehen und diese über einen gewissen Zeitraum abschreiben. Es lässt sich zeigen, dass eine solche Betrachtung sowohl bei einer statischen, als auch bei einer dynamischen Betrachtung zum selben Endergebnis wie bei der direkten Einbeziehung der Ausgaben führt (Lücke 1955). Allerdings

resultiert aus der Berücksichtigung von Abschreibungen eine „Verwischung“ der tatsächlichen Zahlungsströme, sowie ein zusätzlicher Rechenaufwand, der keinen Erkenntnisgewinn darstellt (Girmscheid 2006a). Für die Entscheidungsträger im Erhaltungsmanagement spielt neben der totalen Summe über den Betrachtungszeitraum auch die Frage eine Rolle, wann wie viel Geld ausgegeben werden muss. Durch die Modellkonfiguration wird erreicht, dass für den Strassenbetreiber die Kosten identisch mit den Ausgaben sind. Somit werden einerseits die Vorteile einer Cash-Flow-orientierten Investitionsrechnung, d.h. die Erfassung der tatsächlichen Zahlungsströme beim Strassenbetreiber gewährleistet, andererseits wird aber auch die Erfassung des Werteverzehrs sämtlicher Stakeholder in einem finanzwirtschaftlich konsistenten System ermöglicht.

3.2.1.5 Einbezogene Kostenanteile

Es werden die im Zusammenhang mit der Erhaltung oder der Nutzung der Strasse anfallenden Kosten der drei Stakeholdergruppen Strassenbetreiber, Nutzer und Dritte (Umwelt, Gesellschaft) berücksichtigt. Diese Kosten lassen sich allgemein unterteilen in:

- Kosten die unabhängig vom Strassenzustand immer anfallen (Grundkosten) und
- durch Veränderung des Strassenzustands unterhalb eines Soll-Zustands hervorgerufene erhöhte Kosten sowie Kosten von Erhaltungsmassnahmen.

In die erste Kategorie fallen alle Kosten, die auch beim Betrieb einer neuwertigen Strasse anfallen. Dies sind z.B. auf Seiten des Strassenbetreibers der normale betriebliche Unterhalt (Reinigung, Winterdienst, etc.) oder auf Seiten der Nutzer die Reisezeitkosten ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen oder baustellenbedingten Stau. Sämtliche Kosten dieser Kategorie (Grundkosten) werden in der Wirtschaftlichkeitsanalyse nicht weiter berücksichtigt, da sie unabhängig von der gewählten Erhaltungsstrategie und Erhaltungsvariante immer in der gleichen Höhe anfallen. Derartige Kosten spielen nur dann eine Rolle, wenn über alternative bauliche Lösungen oder Routenführungen beim Neubau einer Strasse (z.B. einer Umgehungsstrasse) entschieden werden soll, mit oder ohne lebenszyklusorientiertem Erhaltungsmanagement.

In die zweite Kategorie fallen einerseits die Kosten für Erhaltungsmassnahmen, andererseits die Kostenanteile die bei den Stakeholdern zusätzlich zu den Grundkosten (erhöhte Kosten) infolge eines schlechteren Strassenzustands unterhalb eines definierten Soll-Zustands anfallen. Die Kosten für Erhaltungsmassnahmen werden in voller Höhe Berücksichtigt, bei allen anderen Kostengruppen geht nur die Erhöhung im Vergleich zu den Grundkosten ein. Es werden also z.B. nur die „Erhöhten Erhaltungskosten“, die „Erhöhten Zeitkosten“, etc. berücksichtigt. Die einzelnen Kostengruppen sowie die Berechnungsansätze zu diesen werden in Kapitel 5.1 behandelt.

In Bild 15 ist der Verlauf der Kosten der einzelnen Stakeholdergruppen schematisch dargestellt. Bei allen Stakeholdergruppen fällt ein gewisser Anteil an Grundkosten (in unterschiedlicher Höhe) an. Ab einem gewissen Grenzzustand (Soll-Zustand), der für jede der Stakeholdergruppen unterschiedlich sein kann, entstehen zusätzlich zu den Grundkosten erhöhte Kosten infolge des schlechten Strassenzustands.

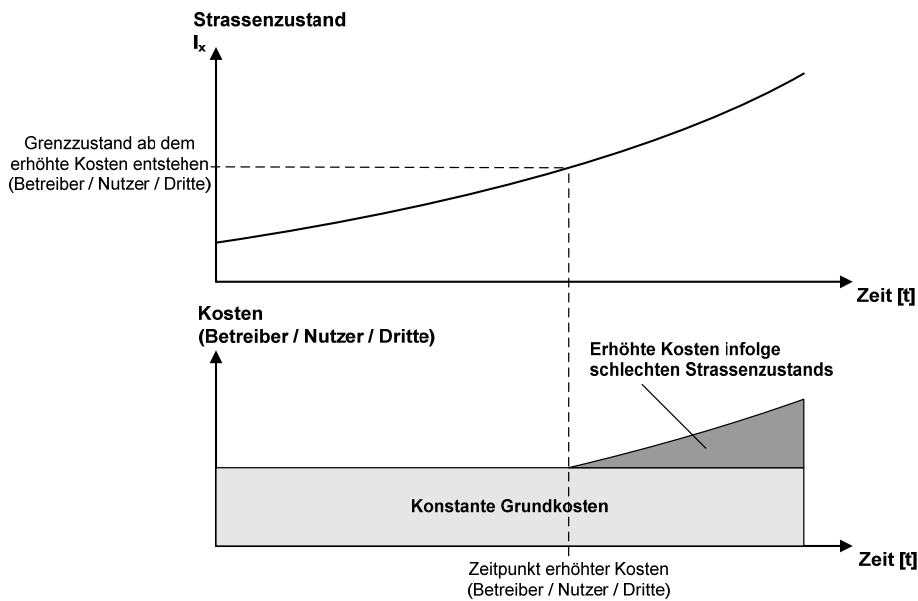


Bild 15: Erhöhte Kosten für Betreiber bzw. Nutzer bzw. Dritte bei Überschreitung eines definierten Grenzzustands - schematische Darstellung des Kostenverlaufs in Abhängigkeit vom Strassenzustand

3.2.1.6 Kostenmässige Bewertung des Inputs und Outputs des Systems

Im Folgenden werden die Input- und Outputkomponenten des Systems, die in Kapitel 3.1 inhaltlich beschrieben wurden, kostenmässig bewertet. Es werden also Bewertungsverfahren definiert, die eine Umwandlung der „realen“ Grössen der Systemdefinition in Kostenanteile der einzelnen Stakeholdergruppen im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell ermöglichen.

Inputkomponente – Erhaltungsaufwand des Betreibers

Die in Kapitel beschriebenen Komponenten des Erhaltungsaufwands lassen sich alle direkt in Form von Kosten des Strassenbetreibers ausdrücken. Entweder werden die Arbeiten durch Vergabe an Dritte erbracht, in diesem Fall fliesst der hierfür vereinbarte Preis in die Betrachtung ein oder die Arbeiten werden vom Strassenbetreiber in Eigenleistung erbracht, in diesem Fall ergeben sich die entsprechenden Kostenansätze aus dem internen Rechnungswesen des Strassenbetreibers.

Zu beachten ist, dass im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell nicht alle Kostenkomponenten des Erhaltungsaufwands berücksichtigt werden. Es werden lediglich die erhöhten Kosten infolge eines nicht optimalen Strassenzustands berücksichtigt. Die konstanten Grundkosten des Strassenunterhalts können vernachlässigt werden. Derartige Kostenkomponenten zeichnen sich dadurch aus, dass sie unabhängig vom Strassenzustand und von Erhaltungsmassnahmen immer in gleicher Höhe anfallen und damit beim Vergleich zweier Erhaltungsvarianten lediglich die absolute Höhe der Kosten, nicht aber die Kostendifferenz (Zusatzkosten) beeinflussen. Dazu gehören z.B. Winterdienst und Grünpflege.

Im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell werden also nur solche Kostenkomponenten betrachtet, die entweder direkt oder indirekt vom Strassenzustand abhängen oder infolge einer Erhaltungsmassnahme auftreten.

Den grössten Anteil des Erhaltungsaufwands stellt der bauliche Unterhalt dar. Im Einzelprojekt 1 *Standardisierte Erhaltungsmassnahmen* (VSS 2004/711) des Forschungspakets *Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement* wurden neben dem Massnahmenkatalog der standardisierten Erhaltungsmassnahmen auch eine Abschätzung der Kosten dieser Massnahmen erarbeitet (Gnehm 2008).

Outputkomponenten – Nutzen und Kosten für Nutzer und Dritte

Unter diesen Punkt fällt einerseits der Gesamtnutzen des Strassennetzes, andererseits die Belastung von Nutzern und Dritten infolge der Nutzung des Strassennetzes.

Die Bestimmung des Gesamtnutzens einer Strassenverkehrsanlage ist in SN 641820 (SN 641820 2006) definiert. Es werden folgende Nutzenindikatoren definiert:

- Betriebskosten der Fahrzeuge
- Reisezeitveränderung
- Veränderungen der Zuverlässigkeit bzgl. der Reisezeit
- Nettonutzen des Mehrverkehrs
- Einnahmen aus Treibstoffsteuern und Maut im Mehrverkehr
- Veränderungen der MwSt.-Einnahmen im öffentlichen Verkehr
- Veränderung der externen Kosten des Verkehrs (Unfälle, Lärm, Luftverschmutzung,...)

Bei dieser Definition ist jedoch zu beachten, dass vom Neubau einer Strassenverkehrsanlage, also dem Unterschied zwischen dem Vorhandensein oder Nichtvorhandensein der Strassenverkehrsanlage, ausgegangen wird und mittels statischer bzw. dynamischer Investitionsrechnung z.B. NPV- oder Kosten-Barwertmethode die optimale Lösungsvariante gesucht wird. Im hier entwickelten LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zur Bestimmung der optimalen Erhaltungsstrategie bzw. Massnahmenabfolge über den Lebenszyklus einer Strasse wird der unterschiedliche Strassenzustand einer grundsätzlich vorhandenen Strasse beurteilt. Als Vergleichsmassstab dient ein neuwertiger Oberbau ($I_1=I_2=I_3=I_4=I_5=0$).

Daraus resultieren folgende Konsequenzen für das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zur Beurteilung der optimalen Erhaltungsstrategie bzw. Erhaltungsmassnahme:

- Sämtliche Kosten- und Nutzenanteile, die unabhängig vom Strassenzustand sind, können vernachlässigt werden.
- Sämtliche für das Erhaltungsmanagement relevanten Nutzenindikatoren werden, wenn sie einen Grenzwert unterschreiten zu Kostenkomponenten (Relativbetrachtung). Bei einer Verschlechterung des Strassenzustands entstehen beim Betreiber, bei den Nutzern oder bei Dritten zusätzliche Kosten gegenüber dem intendierten Nutzenzustand. Es wird die Reduktion des Nutzens in Form von erhöhten Kosten im Vergleich zu einem optimalen Strassenzustand bewertet.

Aus der Reduzierung des Nutzens mit schlechter werdendem Strassenzustand resultieren die folgenden strassenzustandsabhängigen (Relativ-) Kosten, die im LC-Kosten-Barwert-

Erhaltungs-Entscheidungsmodell zur Beurteilung der optimalen Erhaltungsstrategie bzw. Erhaltungsmaßnahme berücksichtigt werden:

- Nutzerkosten
 - Erhöhte Fahrzeugkosten gegenüber dem Soll-Zustand
 - Erhöhte Zeitkosten gegenüber dem Soll-Zustand
 - Erhöhte Unfallkosten gegenüber dem Soll-Zustand
- Kosten Dritter
 - Erhöhte externe Kosten des Verkehrs durch Unfälle, Lärm und Luftverschmutzung

3.2.1.7 Berechnungsmethode

Für die Berechnung der Kosten der verschiedenen Erhaltungsvarianten im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell wird auf Verfahren der Investitionsrechnung zurückgegriffen um den Zeitbezug der betrachteten Kosten der Erhaltung für alle Varianten zu berücksichtigen. Zwar fällt die Anfangsinvestition bei den betrachteten Erhaltungsvarianten weg, da von der Übernahme eines bestehenden Systems ausgegangen wird. Das dynamische Kosten-Barwert-Verfahren eignet sich dennoch um die Kosten- und Zahlungsströme der Erhaltungsvarianten für die betrachteten Strassen über den Betrachtungszeitraum zu bewerten.

Die Verfahren der Investitionsrechnung (Thommen 1992) sowie Verfahren zur Bewertung kurz- und langfristiger Zahlungsströme werden grundsätzlich unterschieden in

- statische Verfahren und
- dynamische Verfahren.

Bei den statischen Verfahren werden die unterschiedlichen Zeitpunkte der Zahlungsströme über den Betrachtungszeitraum nicht berücksichtigt. Sie stellen daher relativ einfache Verfahren dar, die über kurze Zeiträume akzeptable Ergebnisse liefern, für langfristige Betrachtungen aber ungeeignet sind.

Bei der Beurteilung verschiedener Erhaltungsstrategien oder Erhaltungsvarianten handelt es sich um langfristige strategische Entscheidungen. Daher spielt vor allem auch der zeitliche Anfall der einzelnen Zahlungsströme eine Rolle. In der Berechnung müssen sowohl die Preisentwicklung, als auch die Verzinsung des eingesetzten Kapitals einbezogen werden. Es muss also ein dynamisches Wirtschaftlichkeitsanalyseverfahren angewendet werden.

Dynamische Verfahren berücksichtigen durch die Diskontierung der Zahlungsströme auf einen Bezugszeitpunkt die Verzinsung des eingesetzten Kapitals und können daher Zahlungsströme über einen langen Betrachtungszeitraum realistisch bewerten und vergleichen.

Zu den dynamischen Verfahren zählen (Thommen 1992):

- Kapitalwertmethode (Net Present Value bzw. Kosten-Barwert Berechnung)
- Interne Zinsflussmethode
- Annuitätenmethode

Die letztern beiden stellen allerdings lediglich Variationen der Kapitalwertmethode dar, auf die hier nicht genauer eingegangen wird.

Im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell werden mittels der Kapitalwertmethode die diskontierten Zeitwerte der in der Zukunft zu erwartenden Kosten berechnet. Die Berechnung erfolgt dabei in zwei Schritten (siehe Kapitel 5.3):

- Berechnung der in der Zukunft zu erwartenden Kosten mittels Kostensteigerung aus den heutigen Kostenansätzen
- Diskontierung der Kosten auf einen Bezugszeitpunkt

Der erste Schritt ist notwendig, um aus den aktuell bekannten Kostenansätzen, die in Zukunft zu erwartenden Kosten zu berechnen, im zweiten Schritt wird die Verzinsung des zu unterschiedlichen Zeitpunkten eingesetzten Kapitals berücksichtigt (siehe Kapitel 5.3.1).

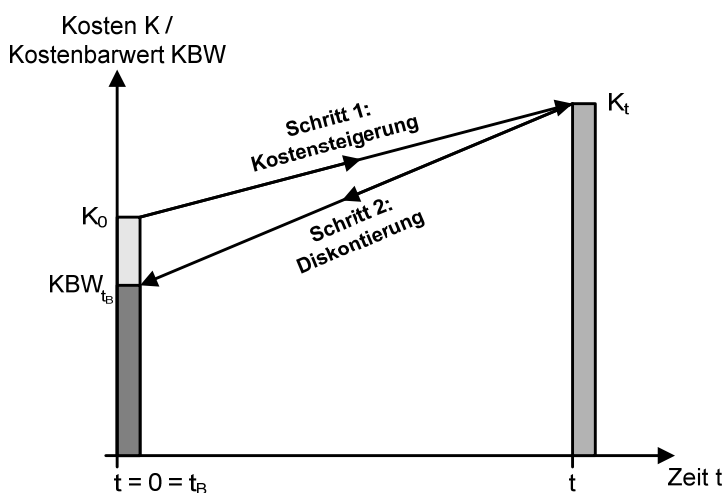


Bild 16: Berechnung des Kosten-Barwerts (KBW) in zwei Schritten (Kostensteigerung, Diskontierung)

3.2.2. Räumliche Dimension

Bezüglich der räumlichen Ausdehnung und Abgrenzung des betrachteten Systems werden in der Modellbildung gegenüber der Systemdefinition und Systemabgrenzung keine Änderungen gemacht (Bild 8, Bild 10 und Bild 11). Die Einteilung der zu betrachtenden horizontalen räumlichen Systemebene erfolgt hierarchisch wie folgt (Bild 8):

- Homogene Verhaltensabschnitte
- Verbindungsabschnitte mit einem oder mehreren homogenen Verhaltensabschnitten
- Teil- oder Gesamtnetz mit mehreren Verbindungsabschnitten

Horizontale Modelldefinition

Die Unterteilung des Betrachtungsraums in Verbindungsabschnitte macht es erforderlich zu definieren, wie die einzelnen Verbindungsabschnitte sowie die Interaktionen zwischen diesen

sowie die einzelnen Verhaltensabschnitte (Module) innerhalb der Verbindungsabschnitte (Teilsysteme) in den entwickelten Modellen (LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell) betrachtet werden, und wie die Betrachtung von der kleinsten Einheit des homogenen Verhaltensabschnitts über den Verbindungsabschnitt bis zu Teil- und Gesamtnetzen aggregiert wird (Bild 8). Im Kapitel 3.1.2 sind die verschiedenen Betrachtungsebenen des Erhaltungsmanagements in Bezug auf die horizontale Systemdefinition (Bild 11), d.h. die Einteilung des Betrachtungsraums in Verbindungsabschnitte und diese wiederum in homogene Verhaltensabschnitte, dargestellt.

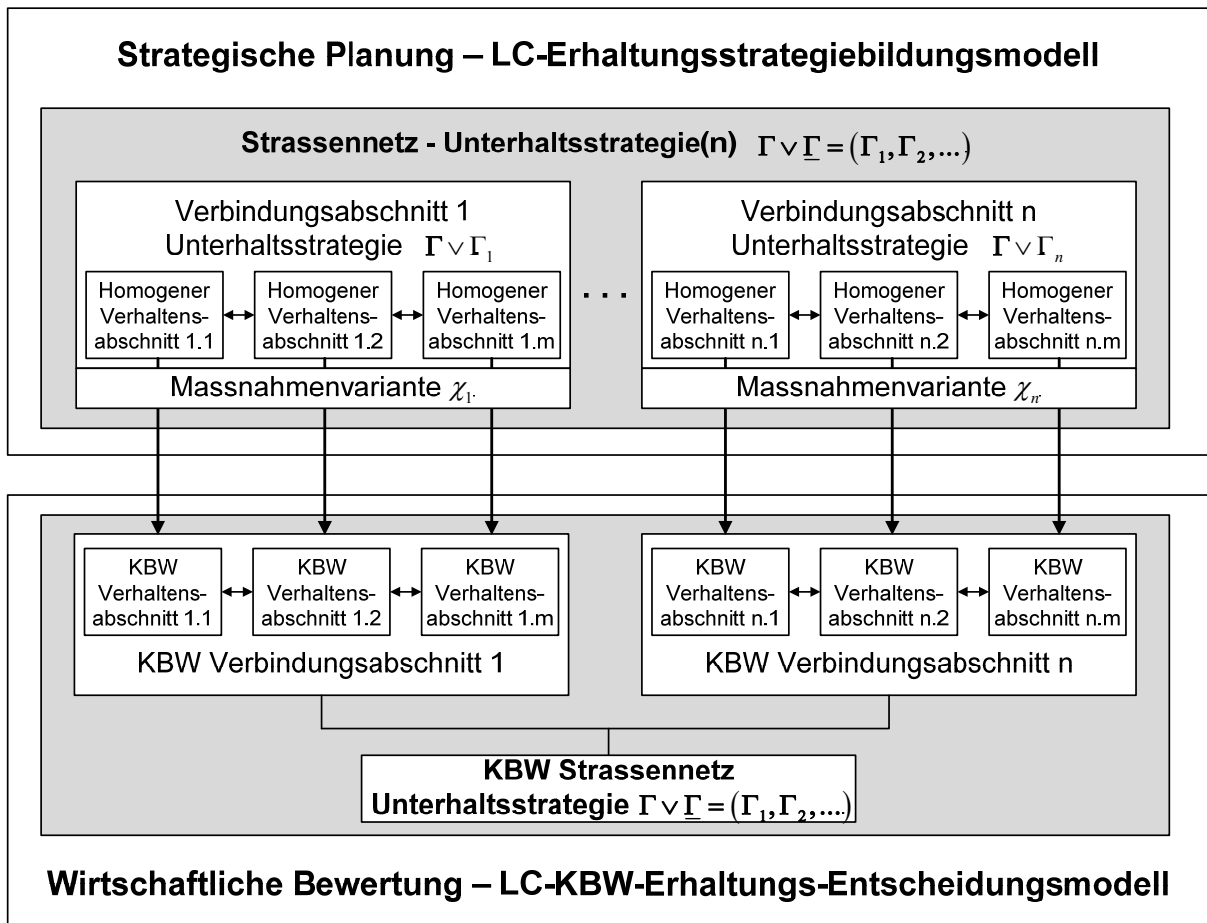


Bild 17: Horizontale Modelldefinition – Abschnittsbildung und Einordnung der entwickelten Modelle

Auf der untersten horizontalen Ebene (Bild 8), d.h. auf der Ebene der einzelnen homogenen Verhaltensabschnitte wird die operative Massnahmenplanung, entsprechend des individuellen Strassenzustands der einzelnen Verbindungsabschnitte mit Hilfe des LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodells durchgeführt. Mit in die Betrachtung einbezogen werden muss die Interaktion mit den angrenzenden Verbindungs- und Verhaltensabschnitte, um eventuelle Synergiepotentiale an den Schnittstellen sowie Abschnittsübergreifend zu erkennen und zu nützen.

In der darüber liegenden horizontalen Ebene (Bild 8) werden die homogenen Verhaltensabschnitte zum gesamten Verbindungsabschnitt bzw. Gesamtnetz zusammengefasst. Dies geschieht im ersten Schritt in Hinblick auf die Entwicklung von Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell, im nächsten Schritt im Hinblick

auf die wirtschaftliche Bewertung und die Entscheidungsfindung im Kosten-Barwert- Erhaltung-Entscheidungsmodell.

Die Strategiebildung erfolgt auf Teil- bzw. Gesamtnetzebene oder auf Verbindungsabschnittsebene. Auf Ebene der homogenen Verhaltensabschnitte erfolgt die Massnahmenplanung gemäss den gewählten Strategien. Die Strategievarianten Γ werden mittels LC-Kosten-Barwert-Erhaltung-Entscheidungsmodell auf der Zielausrichtung des ökonomischen Minimalprinzips bewertet. Analog werden die Erhaltungsvarianten χ einer Strategie Γ bewertet.

3.2.2.1 Gegenseitige Beeinflussung der homogenen Verhaltensabschnitte

Die einzelnen Teilabschnitte (Verhaltensabschnitte) sind zwar von der Entwicklung des Strassenzustands unabhängig voneinander und können somit in dieser Hinsicht völlig getrennt betrachtet werden, allerdings findet bei der Durchführung von Erhaltungsmassnahmen eine Interaktion zwischen den einzelnen Abschnitten statt. Diese Interaktion betrifft folgende Punkte:

- Synergieeffekte bei der Baustelleneinrichtung (Betreiberkosten - Fixkosten)
- Geringerer Einheitspreis pro bearbeiteter Fläche bei grösseren Bauabschnitten (Betreiberkosten – Variable Kosten)
- Geringere Zeitverluste durch Stau bei einer langen Baustelle als bei zwei kurzen (Nutzerkosten)
- Verkehrsumlagerungen innerhalb des Netzes infolge Baustellen

Nicht alle diese Punkte werden im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und im LC-Kosten-Barwert-Erhaltung-Entscheidungsmodell berücksichtigt. Ausserdem werden die Verkehrsumlagerungen infolge einer Baustelle nicht betrachtet, da diese bei jeder Erhaltungsvariante ähnlich sind. Hierfür wäre eine umfangreiche Analyse mithilfe eines Verkehrssimulationsmodells notwendig. Die Ergebnisse dieser Simulation in Bezug auf Umfahrungskosten, Kosten der Umwelt, etc. könnten dann im Modell durch einfache Zusatzterme ergänzt werden.

In den entwickelten Modellen berücksichtigt werden die Synergieeffekte bei der Baustelleneinrichtung sowie die Beeinflussung der Zeitkosten der Nutzer.

3.2.3. Zeitliche Dimension

Die Entwicklung von Erhaltungsvarianten im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und deren wirtschaftliche Bewertung mittel LC-Kosten-Barwert-Erhaltung-Entscheidungsmodell macht es erforderlich die zunächst „unbegrenzte“ Lebensdauer des Systems Strassennetz (es wird von einem bereits existierenden Strassennetz ausgegangen, das durch entsprechende Erhaltungsmassnahmen zumindest auf einem Minimalniveau des Strassenzustands gehalten wird) einzugrenzen. Die Planung von Erhaltungsmassnahmen m_i in einer Erhaltungsvariante χ macht nur über einen überschaubaren und mit ausreichender Sicherheit prognostizierbaren Zeithorizont Sinn. Dies gilt auch für die Bewertung der Erhaltungsvarianten, nicht zuletzt da die Diskontierung der anfallenden Kosten zu einer starken Abwertung der weit in der Zukunft liegenden Kostenanteile führt.

Für die Betrachtung des Strassenunterhalts im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell sowie im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell muss also ein abgegrenztes Zeitintervall mit einer sinnvollen Länge von ca. 30-60 Jahren definiert werden. Die Beschränkung auf ein solches Intervall aus dem gesamten Lebenszyklus einer Strasse macht eine gesonderte Betrachtung des zeitlichen Modellabgrenzung erforderlich.

3.2.3.1 Definition des Betrachtungszeitraums

Da es sich bei dem betrachteten System um ein dynamisches, also zeitlich veränderliches System handelt, muss für den Vergleich unterschiedlicher Erhaltungsvarianten χ einer Strategie Γ ein einheitlicher zeitlicher Rahmen definiert werden. Das heisst, es müssen Anfangs- und Endzeitpunkt als zeitliche Modellgrenzen der Betrachtung für alle zu untersuchenden Erhaltungsvarianten gleich sein. Darüber hinaus muss durch die Definition der Randbedingungen sichergestellt werden, dass an den Modellgrenzen bei den verschiedenen Varianten jeweils vergleichbare Bedingungen vorliegen. Wenn es nicht möglich ist, absolut identische Bedingungen herzustellen, so müssen die Differenzen in den einzelnen Parametern monetär bewertet und somit ein Ausgleich geschaffen werden. Für die Erhaltung der betrachteten Strassensysteme heisst das, dass die einzelnen Parameter des Strassenzustand im Anfangs- und Endzustand jeweils bei allen Erhaltungsvarianten gleich sein, bzw. die Differenzen monetär im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell bewertet werden müssen.

Der Betrachtungszeitraum gibt den zeitlichen Rahmen für die Betrachtung im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell sowie im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell vor. Je nach Intention der durchgeführten Untersuchungen wird unterschieden in:

- Betrachtung mehrerer langfristiger Erhaltungsvarianten χ mit unterschiedlichen Erhaltungsmassnahmenkombinationen m_i einer Strategie Γ
- Isolierte Betrachtung einer einzelnen Erhaltungsmassnahme m_i und deren Verschiebung um Δt
- Betrachtung einer langfristigen Erhaltungsvariante χ und der Verschiebung einer oder mehrerer Erhaltungsmassnahmen innerhalb dieser Erhaltungsvariante

Diese Unterscheidung wird dann auch im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell und im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell übernommen.

Bei der isolierten Betrachtung einer Erhaltungsmassnahme wird der Betrachtungszeitraum durch die Art der Massnahme, sowie den Strassenzustandsverlauf vor und nach der Massnahme vorgegeben. Ziel ist es, den Einfluss der Erhaltungsmassnahme, sowie einer Verschiebung der Massnahme im Betrachtungszeitraum vollständig abzubilden. Die genaue Definition des Betrachtungszeitraums für den Vor- oder Aufschub von Erhaltungsmassnahmen innerhalb einer Erhaltungsvariante wird im Rahmen des LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodells behandelt (siehe Kapitel 3.2).

Bei einer langfristigen Betrachtung einer Erhaltungsvariante sollte sich der Betrachtungszeitraum am Lebenszyklus des betrachteten Bauwerks orientieren.

Eine klassische Lebenszyklusbetrachtung umfasst den

- Bau,
- Betrieb sowie
- Rückbau

des Bauwerks (Boussabaine und Kirkham 2004). Dies stellt im Falle einer Strasse zunächst ein Problem dar, da die Lebensdauer einer Strasse bei entsprechender Erhaltung quasi als unendlich angesehen werden kann. Der Rückbau einer Strasse ist relativ selten, vielmehr wird durch Erhaltungsmassnahmen und Teilerneuerungen die Gebrauchsfähigkeit über sehr lange Zeiträume erhalten. In den in dieser Forschungsarbeit entwickelten Modellen wird davon ausgegangen, dass die Strasse zu Beginn der Betrachtung bereits existiert und auch nach Ende der Betrachtung weiter betrieben werden soll. Es wird also eine langfristige, lebenszyklusorientierte Betrachtung der Erhaltungsvarianten durchgeführt, die für die Betrachtung einer Strasse eine sinnvolle Abwandlung der klassischen Lebenszyklusbetrachtung darstellt.

Als Zeitrahmen für eine langfristige, lebenszyklusorientierten Betrachtung wird ein Zeitraum von 30-60 Jahren vorgeschlagen. Eine weitere Ausdehnung des Betrachtungszeitraums macht meist keinen Sinn, da einerseits durch die Diskontierung der Einfluss der dann neu einbezogenen Kosten immer geringer und andererseits die Vorhersage immer ungenauer wird. Somit relativiert die Kosten-Barwert-Methode durch die Diskontierung den Einfluss der ungenauen langfristigen Prognose auf die Ergebnisgenauigkeit.

3.2.3.2 Abgrenzung im Anfangszeitpunkt

Zu Beginn der Betrachtung wird eine bereits existierende Strasse in dem im Einzelfall vorliegenden Zustand übernommen. Damit ist am Beginn des Betrachtungszeitraums der Strassenzustand für alle zu untersuchenden Erhaltungsvarianten identisch. Der Anfangszustand ist für die verschiedenen zu untersuchenden Varianten immer gleich und es muss kein monetärer Ausgleich zwischen den einzelnen Varianten erfolgen.

3.2.3.3 Abgrenzung im Endzeitpunkt

Am Ende des Betrachtungszeitraums hat der Strassenzustand infolge der unterschiedlichen Art und Zahl der Erhaltungsmassnahmen bei den verschiedenen Erhaltungsvarianten einer gewählten Strategie ein unterschiedliches Niveau erreicht. Eine Erhaltungsvariante mit regelmässigen umfangreichen Erhaltungsmassnahmen wird am Ende des Betrachtungszeitraums einen besseren Strassenzustand zur Folge haben als eine Variante mit weniger und lediglich oberflächlichen Massnahmen. Diese Unterschiede müssen in der Systemabgrenzung monetär bewertet und ausgeglichen werden.

Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten die Unterschiede des Strassenzustands im Endzeitpunkt der Betrachtung auszugleichen, die sich zwar von der theoretischen Herangehensweise, aber nur geringfügig im Ergebnis unterscheiden:

- Betrachtung auf der Ebene des Zustands
- Wertmässige Betrachtung

Im Folgenden wird auf beide Möglichkeiten eingegangen.

In beiden Fällen ist zu beachten, dass hier nur von den an der Oberfläche erkennbaren Zustandsdaten in den einzelnen Zustandsindizes (Ix) ausgegangen wird. Es stellt sich allerdings die Frage, ob diese als alleinige Indikatoren für den Gesamtzustand und den Wertverlust der Strasse ausreichend sind. So weisen die unterschiedlichen Schichten des Strassenaufbaus eine deutlich unterschiedliche Lebenserwartung auf. Es kann also der Fall eintreten, dass zwar der oberflächliche Strassenzustand durch eine entsprechende Massnahme hergestellt wurde, die darunterliegenden Schichten aber aufgrund der Alterung eine deutliche Schädigung aufweisen. Das führt dann dazu, dass die durchgeführten Massnahmen nur kurzfristig wirken, da der Strassenzustand an der Oberfläche zwar zunächst gut ist, die darunterliegenden Schichten aber weiterhin geschädigt sind. Einen Ansatz zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verhaltens der verschiedenen Schichten wurde vorab bereits veröffentlicht (Girmscheid 2007b). Da aber das gesamte Forschungspaket, in das dieses Forschungsprojekt eingebunden ist, auf die die Betrachtung des Strassenzustands in den Indizes I1 bis I5 aufbaut und zum unterschiedlichen zeitlichen Verhalten der verschiedenen Schichten keine Daten vorliegen, wird diese Problematik hier nicht weiter verfolgt. In diesem Bereich wäre für die Zukunft weiterer Forschungsbedarf vorhanden.

Betrachtung auf der Ebene des Zustands

Der Strassenzustand und damit auch Unterschiede im Strassenzustand stellen zunächst keine monetären Grössen dar. Daher können die Unterschiede im Strassenzustand nur dadurch ausgeglichen werden, dass im Endzustand (zumindest virtuell) derselbe Strassenzustand bei allen betrachteten Varianten hergestellt wird. Theoretisch könnte dieser Vergleichszustand jeder beliebige, für alle Varianten gleiche Zustand sein, praktikabel ist allerdings nur jeweils den Neuzustand als Vergleichszustand zu wählen, da dieser von jedem beliebigen Ausgangszustand aus durch eine entsprechende Erhaltungsmassnahme hergestellt werden kann.

Die Systemabgrenzung im Endzustand wird in diesem Fall also dadurch realisiert, dass für jede Erhaltungsvariante durch eine virtuelle (nicht in der Realität ausgeführte) Erhaltungsmassnahme im Endzeitpunkt der Neuzustand wiederhergestellt wird (Bild 18). Die Kosten dieser Massnahme (Wiederherstellungskosten) werden als zusätzlicher Kostenanteil im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell berücksichtigt.

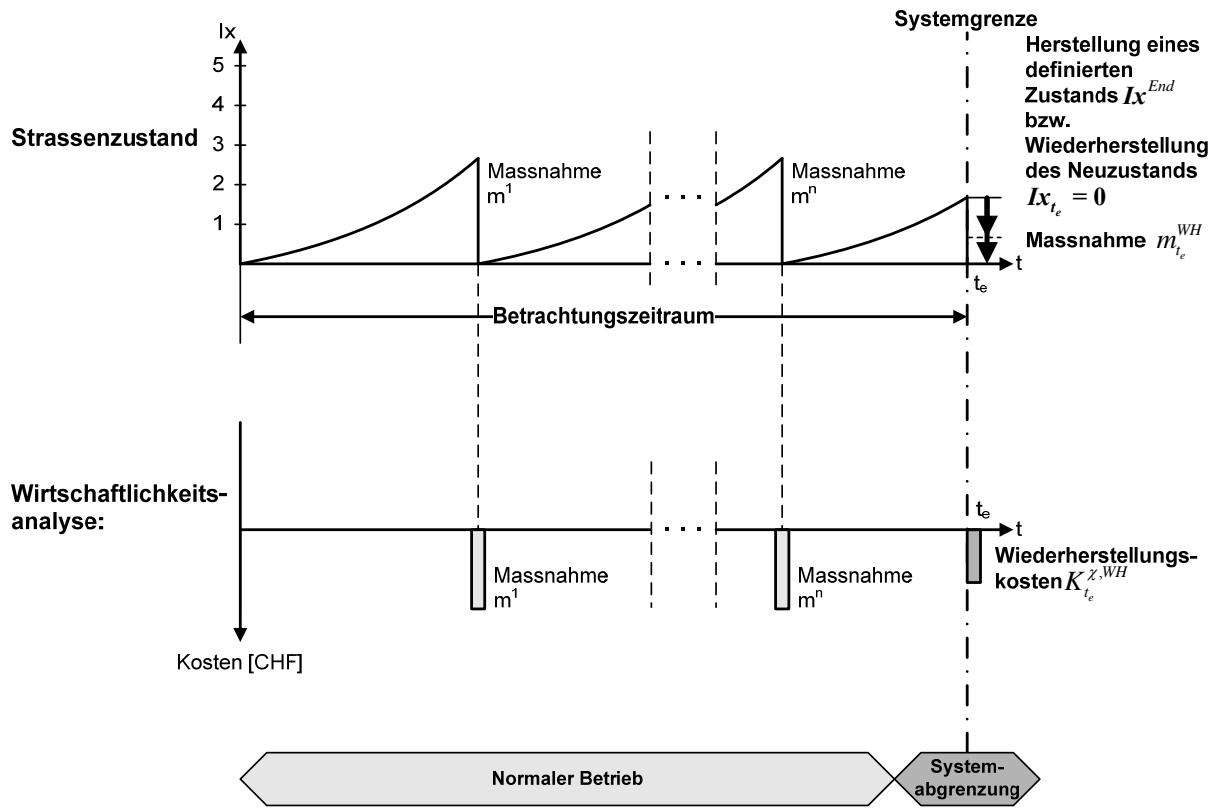


Bild 18: Systemabgrenzung über die Berücksichtigung der Wiederherstellungskosten

Vektor der Massnahmen $\mathbf{M}_{t_e}^{WH}$ zur Herstellung des Neuzustandes mit den verschiedenen zielführenden Massnahmen $m_i^{WH}(I_{x_{t_e}})$:

$$\mathbf{M}_{t_e}^{WH}(I_x) = \begin{pmatrix} m_1^{WH}(I_x^{End}) \\ m_2^{WH}(I_x^{End}) \\ \dots \\ m_n^{WH}(I_x^{End}) \end{pmatrix}$$

Für die Massnahme $m_{t_e}^{WH}$ am Ende des Betrachtungszeitraums gilt, dass durch die Massnahmen alle Einzelindizes der Strassenzustandsbewertung auf null gesetzt werden müssen bzw. ein definierter Endzustand erreicht werden muss:

$$I_x^{End}(\mathbf{M}_{t_e}^{WH+}) = \begin{pmatrix} I1(\mathbf{M}_{t_e}^{WH+}) \\ I2(\mathbf{M}_{t_e}^{WH+}) \\ I3(\mathbf{M}_{t_e}^{WH+}) \\ I4(\mathbf{M}_{t_e}^{WH+}) \\ I5(\mathbf{M}_{t_e}^{WH+}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} I1^{End} \\ I2^{End} \\ I3^{End} \\ I4^{End} \\ I5^{End} \end{pmatrix} \quad (1)$$

mit: $I_x^{End}(\mathbf{M}_{t_e}^{WH+}) =$ Vektor der Einzelindizes I1 bis I5 nach Durchführung einer Massnahme m_i^{WH} , die im Massnahmenvektor $\mathbf{M}_{t_e}^{WH}$ zusammengefasst werden.

$\mathbf{M}_{t_e}^{WH+} =$ Massnahmenvektor mit den Massnahmen $m_i^{WH}(\Delta I_x)$ zur Wiederherstellung des Neuzustands bzw. eines definierten Endzustands am Ende des Betrachtungszeitraums

Die entsprechende zielführende Massnahme wird in Abhängigkeit vom Strassenzustand im Endzeitpunkt aus dem Katalog der standardisierten Erhaltungsmassnahmen selektiert. Neben der Bedingung, dass der Neuzustand erreicht wird, muss der Anwendungsbereich der gewählten Massnahme den aktuellen Strassenzustand in allen Einzelindizes einschliessen.

Das heisst es muss gelten:

$$I_x^{min}(\mathbf{M}_{t_e}^{WH}) \leq I_x(t^-) \leq I_x^{max}(\mathbf{M}_{t_e}^{WH}) \quad (2)$$

mit: $I_x^{min/max}(\mathbf{M}_{t_e}^{WH}) =$ Untere / obere Grenze des Anwendungsbereichs der Massnahmen m_i^{WH} , die im Massnahmenvektor $\mathbf{M}_{t_e}^{WH}$ zusammengefasst werden

$I_x(t^-) =$ Vektor der Einzelindizes I1 bis I5 des Strassenzustands vor Durchführung der Massnahmen m_i^{WH} , die im Massnahmenvektor $\mathbf{M}_{t_e}^{WH}$ zusammengefasst werden

Die Wiederherstellungskosten am Ende des Betrachtungszeitraums entsprechen dann den Kosten der Massnahme m_{i,t_e}^{WH} :

$$K_{t_e}^{\chi, Abgr} = K_{t_e}^{\chi, WH} = K(m_{t_e}^{WH}) \quad (3)$$

mit: $K_{t_e}^{\chi, Abgr} =$ Kostenanteil aus der Systemabgrenzung der Erhaltungsvariante χ

$K_{t_e}^{\chi, WH} =$ Wiederherstellungskosten bei der Erhaltungsvariante χ

$K(m_{t_e}^{WH}) =$ Kosten der Massnahme $m_{t_e}^{WH}$ gemäss dem im Einzelprojekt 1 entwickelten Kostenkatalog der standardisierten Erhaltungsmassnahmen (Gnehm 2008)

Zu beachten ist, dass diese Möglichkeit der Systemabgrenzung immer zu einem korrekten relativen Vergleich der verschiedenen Erhaltungsvarianten führt. Die Absolutkosten einer Erhaltungsvariante werden aber bei dieser Methode nur dann korrekt berechnet, wenn am Ende des Betrachtungszeitraums der definierte Endzustand I_x^{End} hergestellt wird, der auch im Anfangszeitpunkt vorlag. Wird der Neuzustand $I_x^{End} = 0$ am Ende des Betrachtungszeitraums kostenmässig im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell bei allen betrachteten Erhaltungsvarianten berücksichtigt, so ist der Endzustand besser als der Anfangszustand (beliebiger schlechterer Zustand als Neuzustand) und somit werden die berechneten Kosten höher sein als die tatsächlichen Kosten des Strassenunterhalts, falls dieser Endzustand praktisch nicht beabsichtigt ist. Es wird also am Ende des Betrachtungszeitraums eine bessere Strasse übergeben als am Anfang übernommen wurde. Dieser Effekt wird mit zunehmender Länge des Betrachtungszeitraums immer kleiner, da der Einfluss der Systemabgrenzung dann insgesamt abnimmt und die Kosten während des Betrachtungszeitraums überwiegen. Bei der reinen Gegenüberstellung verschiedener Varianten im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell werden die optimalen Erhaltungsmassnahmenkombinationen über den Lebenszyklus gesucht, die zu minimalen Lebenszykluskosten führen, bei gleicher Werterhaltung am Ende des Betrachtungszeitraums. Daher ist es entscheidend, dass die Übergangsbedingungen jeweils am Anfang und am Ende des Betrachtungszeitraums für alle verglichenen Varianten gleich sind.

Wertmässige Betrachtung

In einer wertmässigen Betrachtung werden die Unterschiede im Strassenzustand monetär bewertet und in der Wirtschaftlichkeitsanalyse durch den Ansatz unterschiedlicher Wertverluste ausgeglichen. Das grundlegende Problem, das sich bei dieser Betrachtung stellt ist die Definition des Wertes und damit auch des Wertverlustes der Strasse. Prinzipiell ist zwischen dem Marktwert, dem Substanzwert und Gebrauchswert zu unterscheiden. Der Marktwert ist mit dem Preis gleichzusetzen und muss nicht mit dem Gebrauchswert übereinstimmen. Da Strassen im Normalfall nicht verkauft werden können existieren für sie auch keine (Markt-) Preise. Das Nichtvorhandensein eines Preises schliesst allerdings die Ermittlung eines Wertes bzw. Restwertes der Strasse nicht aus. Für die Systemabgrenzung ist letztlich entscheidend welchen substanziellen Zustand die Strasse im Endzeitpunkt hat. Es soll bewertet werden ob das Erhaltungsmanagement die Substanz der Strasse erhalten hat oder ob auf Kosten der Substanz gespart wurde. Daher bietet sich der monetarisierte Substanzwert (Rafi, Scazziga et al. 2006) als Kriterium zur Bestimmung des Wertverlusts im Endzustand an. Der Wertverlust wird dann als zusätzliche Ausgabe im Endzeitpunkt berücksichtigt (Bild 19).

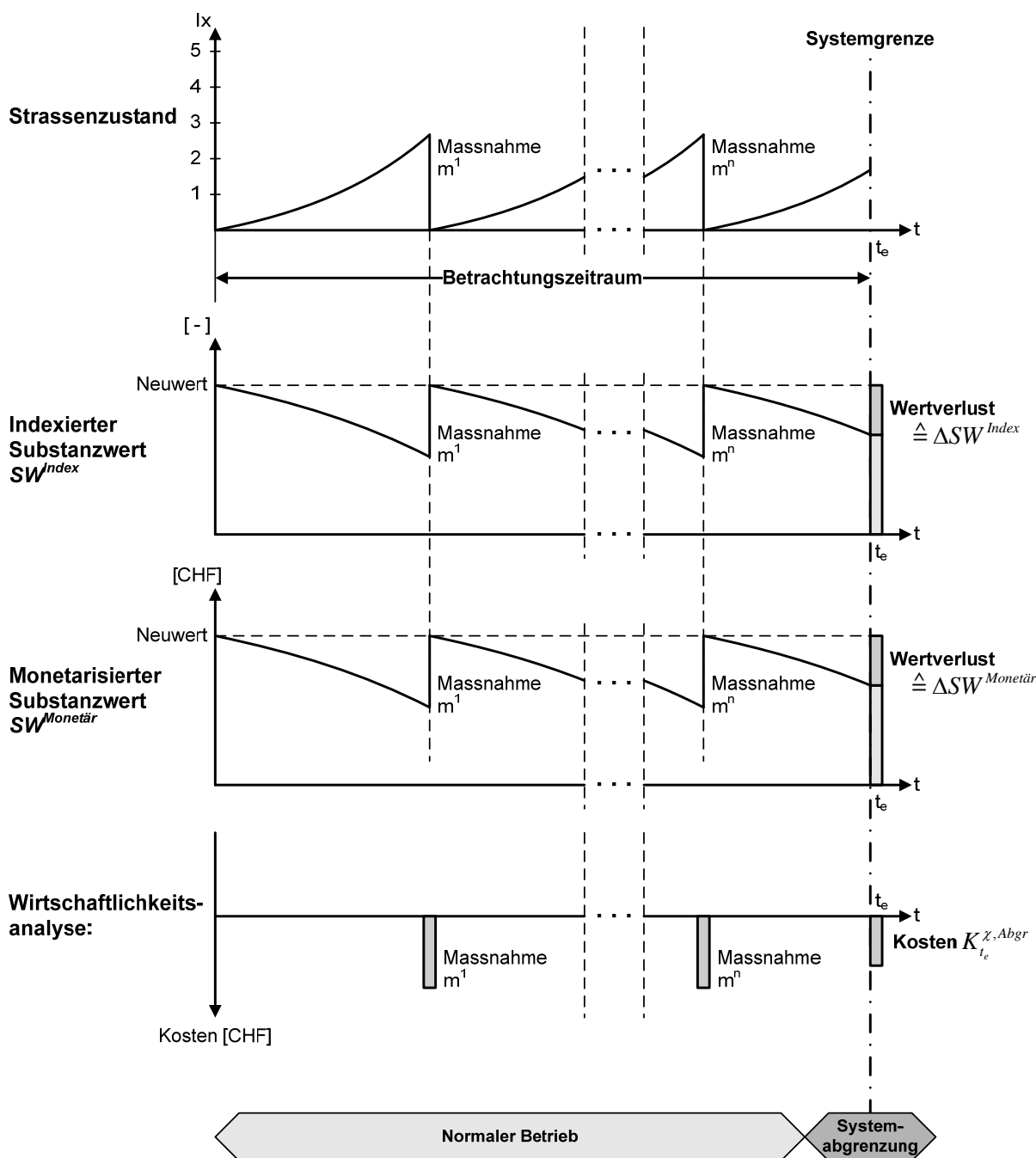


Bild 19: Systemabgrenzung über die Berücksichtigung des Wertverlusts

Der (noch nicht monetarisierte) Substanzwertverlust ergibt sich aus der Differenz des Substanzwertes im Anfangszustand und dem im Endzustand:

$$\Delta SW^{Index} = SW_{t_a}^{Index} - SW_{t_e}^{Index} \tag{4}$$

Daraus ergibt sich der Wertverlust (= monetarisierte Differenz des Substanzwertes) und damit auch die Abgrenzungskosten aus dem Produkt des Substanzwertverlusts und den kompletten Wiederherstellungskosten einer zu 100% geschädigten Strasse (Zustandsindizes $I_x = 5$):

$$K_{t_e}^{\chi, Abgr} = \Delta SW^{Monetär} = \Delta SW^{Index} \cdot K_{t_e}^{WH(100\%)} \quad (5)$$

mit: ΔSW^{Index} = Substanzwertverlust im Endzeitpunkt gegenüber dem Zustand im Anfangszeitpunkt [-]

$SW_{t_a}^{Index}$ = Substanzwert im Anfangszeitpunkt [-]

$SW_{t_e}^{Index}$ = Substanzwert im Endzeitpunkt [-]

$\Delta SW^{Monetär}$ = Wertverlust im Endzeitpunkt gegenüber dem Zustand im Anfangszeitpunkt [CHF]

$K_{t_e}^{WH(100\%)}$ = Wiederherstellungskosten einer zu 100% geschädigten Strasse
(Zustandsindizes vor der Massnahme $I_x = 5$, nach der Massnahme $I_x = 0$) [CHF]

Der Substanzwertverlust eignet sich für die Abgrenzung der Variantenbetrachtungen der Erhaltungsstrategien Γ bzw. der Erhaltungsvariantenanalyse χ gemäss der festgelegten Strategie. Allerdings hat der Substanzwertverlust keinen Bezug zu den realen Kosten für erforderliche Massnahmen m_i^{WH} , die für die jeweilige Erhaltungsvariante auf einen festgelegten einheitlichen Zustandsgrenzwert I_x^{End} abgestimmt sein müssen. Der Substanzwertverlust hat somit keinen Bezug zu den Absolutkosten einer Erhaltungsvariante. Daher kann der Absolutwert der Kosten von Erhaltungsvarianten realistischer mittels „Wiederherstellungskosten“ auf einen definierten Sollzustand für alle Varianten abgebildet werden (Bild 20).

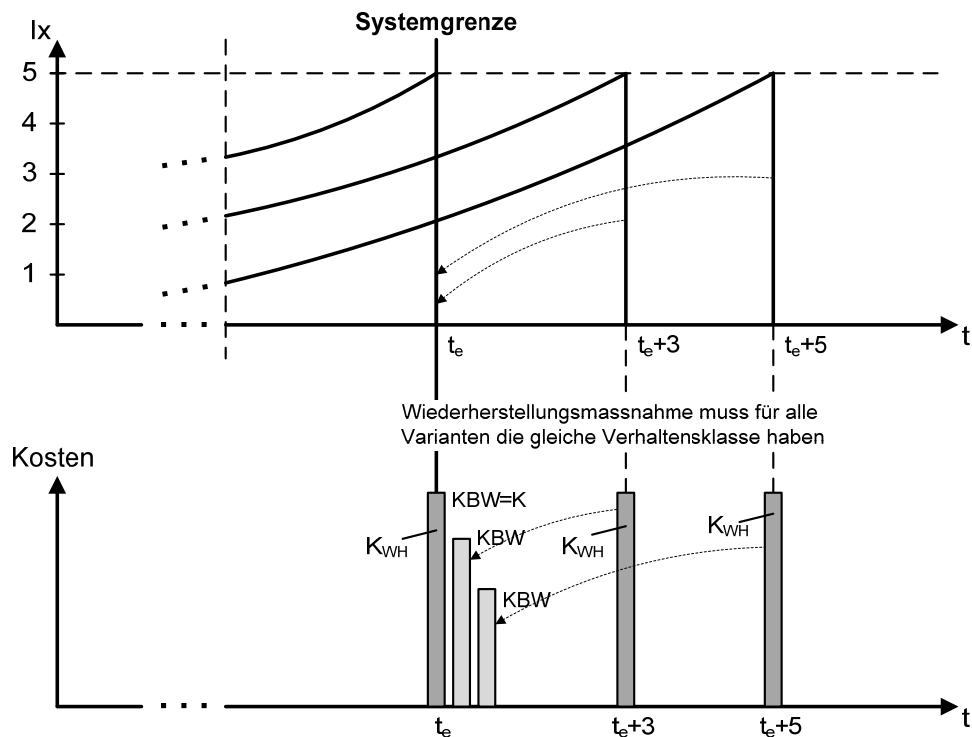


Bild 20: Systemabgrenzung mittels Wiederherstellungskosten am Ende des Betrachtungszeitraums

Systemabgrenzung im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell

Prinzipiell liefert sowohl die Abgrenzung auf der Ebene des Zustands, als auch die wertmässige Betrachtung eine sinnvolle Systemabgrenzung, die die Forderungen an die Vergleichbarkeit der verschiedenen Varianten erfüllt.

Da jedoch die Abgrenzung auf der Ebene des Zustands lediglich eine relativ grobe Abstufung zwischen den einzelnen standardisierten Erhaltungsmaßnahmen zulässt (Bild 33, Bild 34), führt dies zu einem sprunghaften Verlauf der Abgrenzungskosten bei einer Veränderung des Strassenzustands im Endzeitpunkt. Jede der möglichen Massnahmen hat einen gewissen Anwendungsbereich, in dem die Abgrenzungskosten konstant bleiben. Wird dieser Anwendungsbereich verlassen, so muss eine andere Massnahme gewählt werden und es erfolgt ein Sprung in den Abgrenzungskosten. Wenn also beispielsweise der Betrachtungszeitraum verlängert wird und damit ein schlechterer Strassenzustand im Endzeitpunkt vorliegt, so führt dies dazu, dass sich die Abgrenzungskosten entweder überhaupt nicht verändern (wenn die gleiche Massnahme immer noch möglich ist) oder sprunghaft verändern (wenn eine andere Massnahme gewählt werden muss). Derartige Effekte führen zu Ungenauigkeiten und Verzerrungen des Ergebnisses der Kosten-Barwert-Berechnung.

Für das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell wird daher auf die wertmässige Betrachtung, die eine stufenlose Änderung der Abgrenzungskosten in Abhängigkeit vom Strassenzustand gewährleistet, zurückgegriffen.

4. LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell – Definition der Erhaltungsvarianten

Das LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell basiert auf dem von Girmscheid (Girmscheid 2007a) entwickelten Modell „Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Strategiebildung und Erhaltungsvarianten für Strassennetze“.

Eine Kosten-Nutzen-Analyse im Strassenbau bzw. Strassenunterhalt wird nach SN 641820 (SN 641820 2006) auf dem Vergleich einer Basisvariante mit einer Alternativvariante aufgebaut. Dabei kann die Basisvariante entweder eine bereits verwirklichte Variante oder eine ursprüngliche Planung darstellen. In der Alternativvariante werden dann Abweichungen von der Basisvariante abgebildet. So kann z.B. eine Neubaustrecke einer bereits bestehenden Verbindung gegenübergestellt werden oder, wie im hier betrachteten Fall, eine ursprünglich geplante Erhaltungsvariante einer alternativen Erhaltungsvariante oder auch die Verschiebung einzelner Massnahmen einer geplanten Erhaltungsvariante der ursprünglichen Planung gegenübergestellt werden.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse der in dieser Arbeit untersuchten Fälle wird mithilfe des LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodells (siehe Kapitel 5) durchgeführt und ist analog zum Vorgehen gemäss SN 641820 aufgebaut. Als erster Schritt der Berechnung der Zusatzkosten der Verschiebung einer oder mehrerer Erhaltungsmassnahmen müssen die zu untersuchenden Fälle, d.h. eine Basis- und eine Alternativvariante, definiert werden. Dies bedeutet, dass über einen sinnvoll gewählten Betrachtungszeitraum für beide Varianten sämtliche Erhaltungsmassnahmen geplant werden müssen. Dabei müssen jeweils Zeitpunkt, Ort und Art der Massnahme festgelegt werden. Mithilfe der in Einzelprojekt 2 (Scazziga 2008) festgelegten Verlaufskurven des Strassenzustands kann dann der Strassenzustandsverlauf zwischen den einzelnen Massnahmen prognostiziert werden.

Als Grundlage der Definition einer oder mehrerer alternativer Erhaltungsvarianten χ sollte zunächst eine Erhaltungsstrategie Γ entwickelt werden. Diese beruht auf den normativen Vorgaben und definiert den Rahmen und die Grundsätze zur Auswahl der einzelnen Erhaltungsmassnahmen (siehe auch Kapitel 2.5.1). Aus der Erhaltungsstrategie lassen sich verschiedene Erhaltungsvarianten als konkrete Abfolgen von Erhaltungsmassnahmen entwickeln.

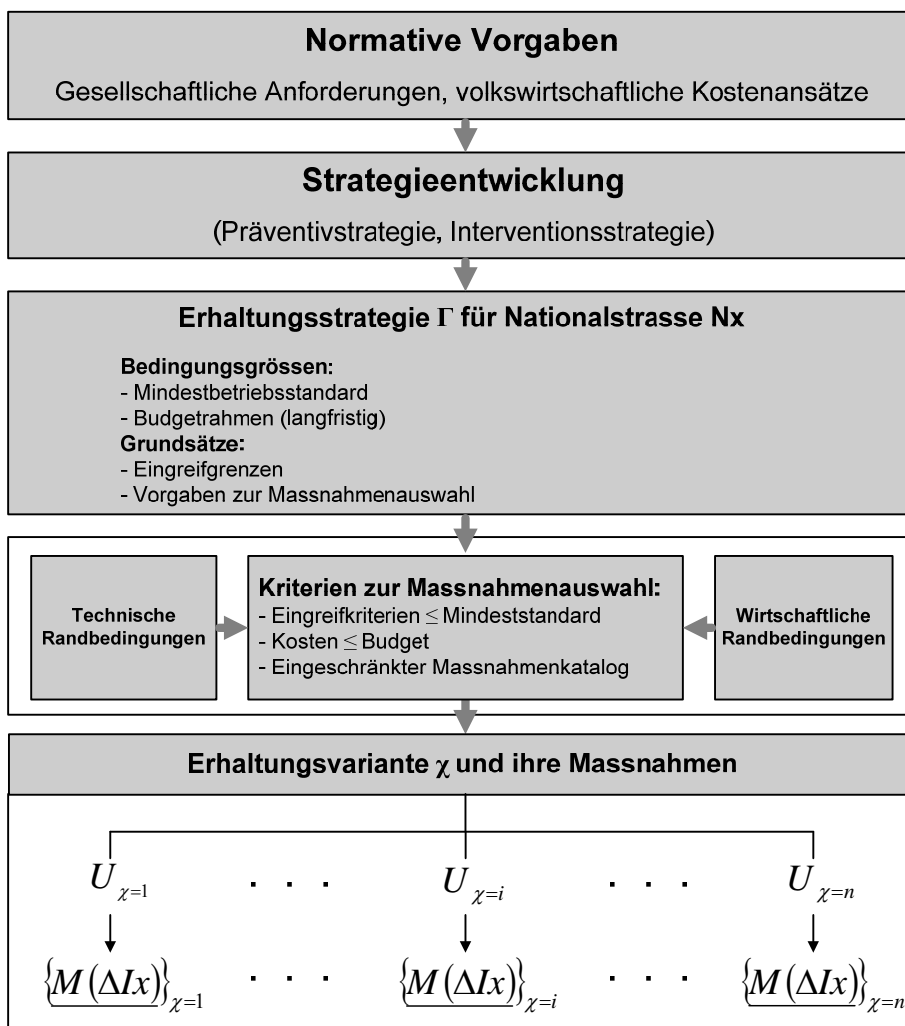


Bild 21: Übersicht über den Prozess der Erhaltungsplanung zur Entwicklung konkreter Erhaltungsvarianten unter Berücksichtigung der normativen und strategischen Vorgaben (Girmscheid 2007a)

In Bild 21 ist der Ablauf der Erhaltungsplanung von den normativen Vorgaben bis zur konkreten Erhaltungsvariante dargestellt. Im ersten Schritt wird auf Grundlage der normativen Vorgaben eine Erhaltungsstrategie Γ entwickelt. Analog zur Erhaltungsplanung in anderen Bereichen, wie z.B. der Erhaltung von Industrieanlagen, sind hier Präventivstrategien, Interventionsstrategien oder auch Mischformen dieser Strategien möglich. Des Weiteren werden Bedingungsgrößen einer gewählten Strategie wie der Mindestbetriebsstandard einer Strasse und der Budgetrahmen sowie Eingreifgrenzen und Vorgaben zur Massnahmenauswahl definiert. Zusammen mit - z.B. durch Normen - vorgegebenen technischen sowie eventuell zusätzlich vorhandenen wirtschaftlichen Randbedingungen ergeben sich daraus die Kriterien zur Massnahmenauswahl. Die konkrete Variantenentwicklung ergibt sich dann über eine Abfolge von Massnahmenentscheidungen zu den jeweiligen Eingreifzeitpunkten der gewählten Erhaltungsstrategie Γ . Dabei muss jeweils entschieden werden ob und wenn ja welche Massnahme erforderlich ist. Damit entsteht eine Entscheidungsbaumstruktur über die sich verschiedene mögliche Erhaltungsvarianten χ entwickeln lassen. Diese verschiedenen Vari-

anten können dann im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsanalyse untersucht und bewertet werden.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Bereiche des Erhaltungsmanagements detailliert eingegangen.

4.1. Erhaltungsstrategie I

Bei der Entwicklung von Erhaltungsstrategien im Strassenunterhalt kann allgemein auf bereits bestehende Konzepte aus anderen Bereichen des Erhaltungsmanagements zurückgegriffen werden. Insbesondere in der Erhaltung von Maschinen und Industrieanlagen wurden hier in den vergangenen Jahrzehnten umfangreiche Konzepte entwickelt. Dabei müssen allerdings auch die Besonderheiten des Strassenunterhalts berücksichtigt werden, die teilweise zu einer anderen Fokussierung im Erhaltungsmanagement führen müssen.

Allgemein könne im Erhaltungsmanagement bezüglich des Zustands und der Funktionalität der betrachteten Anlage zwei Fälle unterschieden werden (Gertsbakh 1977) (Bild 22):

- **Sensitives System:**
Es können nur zwei Stadien des Zustands und der Funktionalität unterschieden werden: Keine erkennbaren Schädigungen und volle Funktionalität oder ein Schadensfall mit dem kompletten oder zumindest weitgehenden Verlust der Funktionalität.
- **Stabiles System:**
Der Zustand und die Funktionalität können Zwischenzustände annehmen, bei denen die Funktionalität als Folge eines Schadens oder einer kontinuierlichen Schädigung eingeschränkt aber nicht gleich null ist. Ein Schaden muss in diesem Fall nicht zwangsläufig sofort zu einer messbaren Einschränkung der Funktionalität führen

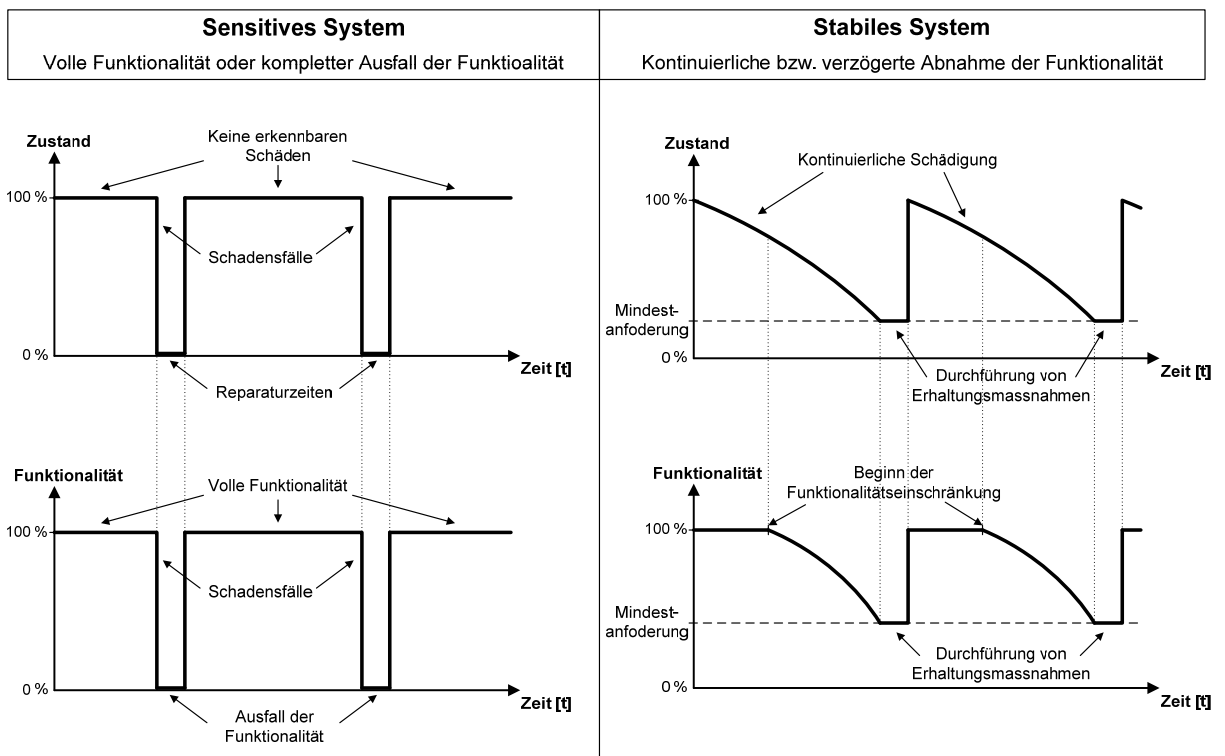


Bild 22: Differenzierung in sensitive und stabile Systeme in Abhängigkeit vom Zustands- und Funktionalitätsverlauf bei einer Schädigung

Für eine Maschine oder eine Industrieanlage trifft meist der erste Fall zu, d.h. es gibt zumeist nur zwei mögliche Zustände der Funktionalität: Entweder volle Funktionalität oder es liegt eine Störung mit komplettem Ausfall oder zumindest starker Einschränkung der Funktionalität vor. Dementsprechend sind die Konzepte zur Erhaltung derartiger Anlagen stark auf den Gesichtspunkt der Ausfallsicherheit bzw. des Ausfallrisikos fokussiert (Narayan 2004). Da der Strassenunterhalt dem zweiten Fall zuzuordnen ist, spielen derartige Überlegungen hier eine eher untergeordnete Rolle. Zumindest solange der Strassenzustand auf einem eher hohen Niveau gehalten wird, verlaufen die Schadensprozesse relativ langsam und führen daher nur zu einer schleichenden Einschränkung der Funktionalität. Das Risiko eines plötzlichen Totalausfalls, das bei Industrieanlage immer gegeben ist und zu fatalen Auswirkungen führen kann, ist für eine Strasse so quasi nicht vorhanden. Es stellt sich in diesem Fall also nicht die Frage, wie sich das Ausfallrisiko mit entsprechenden Erhaltungsmaßnahmen minimieren lässt, bzw. wie ein Optimum zwischen Ausgaben für Erhaltungsmaßnahmen und Risikokosten erzielt wird, sondern vielmehr muss die teilweise Einschränkung der Funktionalität einer Strasse bewertet werden und ein Optimum bezüglich

- der Kosten des Strassenbetreibers,
- der Kosten der Nutzer sowie
- der Kosten Dritter

bei gleichzeitigem Erhalt der Substanz gefunden werden.

Es müssen also spezifische, auf den Strassenunterhalt zugeschnittene, Strategien für das Erhaltungsmanagement entwickelt werden. Der Prozess der Entwicklung einer Erhaltungs-

strategie ist allerdings nicht Gegenstand dieser Forschungsarbeit. Dieser zentrale Bestandteil des Erhaltungsmanagements sollte in weiterführenden Forschungsarbeiten eingehender betrachtet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich eine Einteilung der möglichen Strategien in verschiedene Kategorien sowie ein Anforderungsprofil für die Erhaltungsstrategien definiert.

4.1.1. Kategorien von Erhaltungsstrategien

Die Europäische Norm EN 13306 (EN 13306 2001) definiert die allgemeinen Grundbegriffe der Erhaltungsplanung des Erhaltungsmanagements, unabhängig von der Art der zu erhaltenden Einheit. Die Erhaltungsstrategien werden darin in zwei grundlegende Strategiekategorien eingeteilt:

- Präventive Instandhaltung
- Korrektive Instandhaltung

Eine analoge Einteilung wird auch in der entsprechenden Fachliteratur vorgenommen (Gertsbakh 1977; Boussabaine und Kirkham 2004).

Bei der Präventiven Instandhaltung werden Massnahmen in regelmässigen Abständen oder nach vorgeschriebenen Kriterien durchgeführt, mit dem Ziel eine Schädigung zu vermeiden und damit die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls oder einer Einschränkung der Funktionalität zu verringern.

Bei der Korrektiven Instandhaltung werden Massnahmen erst nach der Erkennung eines Fehlers ausgeführt, mit dem Ziel die Funktionalität wieder herzustellen.

In dieser allgemeinen Definition wird das Auftreten eines erkennbaren Fehlers mit einer Einschränkung der Funktionalität bzw. einem Totalausfall des Systems gleichgesetzt.

Da die Strasse von Beginn an oder nach Durchführung einer Erhaltungsmassnahme meist einem langsamen und kontinuierlichen Verschleissprozess unterworfen ist, bestehen zwei Nutzungszustände:

- Phase 1 – Verschlechterungsprozess ohne Funktionseinschränkung für die Nutzer
- Phase 2 – Verschlechterung mit Funktionseinschränkung für die Nutzer

Werden die Erhaltungsmassnahmen in der Phase 1 ohne Funktionseinschränkungen durchgeführt, so spricht man von „Präventiver Instandhaltung“.

Werden die Erhaltungsmassnahmen in der Phase 2 mit Funktionseinschränkungen durchgeführt, so spricht man von „Korrektiver Instandhaltung“.

Im Erhaltungsmanagement von Strassen wird jedoch im Sinn der zwei Nutzungszustände meist nur die „Korrektive Instandhaltung“ nach Auftreten von „Schäden, die den Funktionszustand beeinträchtigen durchgeführt. Eine „Präventive Instandhaltung“ ist bei Systemen sinnvoll bzw. notwendig, die das Risiko eines plötzlichen Totalausfalls“ oder der Sicherheitsbeeinträchtigung in sich bergen (z.B. Brücken, Pfeiler, Böschungen).

Die beiden Kategorien der Erhaltungsstrategien werden daher hier zusammenfassend wie folgt definiert:

- **Präventive Instandhaltung:**
Bei Strategien der Präventiven Erhaltung werden Erhaltungsmassnahmen vorgenommen bevor es zu einer Einschränkung der Funktionalität kommt (Präventivgrenze). Bis dahin kann aber durchaus schon eine gewisse Schädigung der Strasse vorliegen, die aber noch keine Auswirkungen auf die Funktionalität hat.
- **Korrektive Instandhaltung**
Bei Strategien der Korrekativen Instandhaltung werden Erhaltungsmassnahmen erst vorgenommen, wenn bereits eine Einschränkung der Funktionalität vorliegt. Im spätesten Fall wird beim Erreichen eines Mindestbetriebsstandards (Interventionsgrenze) eingegriffen.

Bild 23 zeigt beispielhaft den Verlauf des Strassenzustands sowie der Funktionalität F einer Strasse bei einer Korrekativen bzw. Präventiven Instandhaltung. Bei der Korrekativen Instandhaltung kann sich der Strassenzustand I_x und die Funktionalität F bis zum Erreichen der Mindestanforderung $I_{x_{max}}$ bzw. F_{min} verschlechtern, dagegen ist bei einer Präventiven Instandhaltung stets die volle Funktionalität vorhanden ($F = 100\%$), d.h. der Zustand unterschreitet die Präventivgrenze $I_{x_{soll}}$ nicht. Einschränkungen der Funktionalität infolge der Durchführung von Erhaltungsmassnahmen sind hier vereinfachend nicht dargestellt.

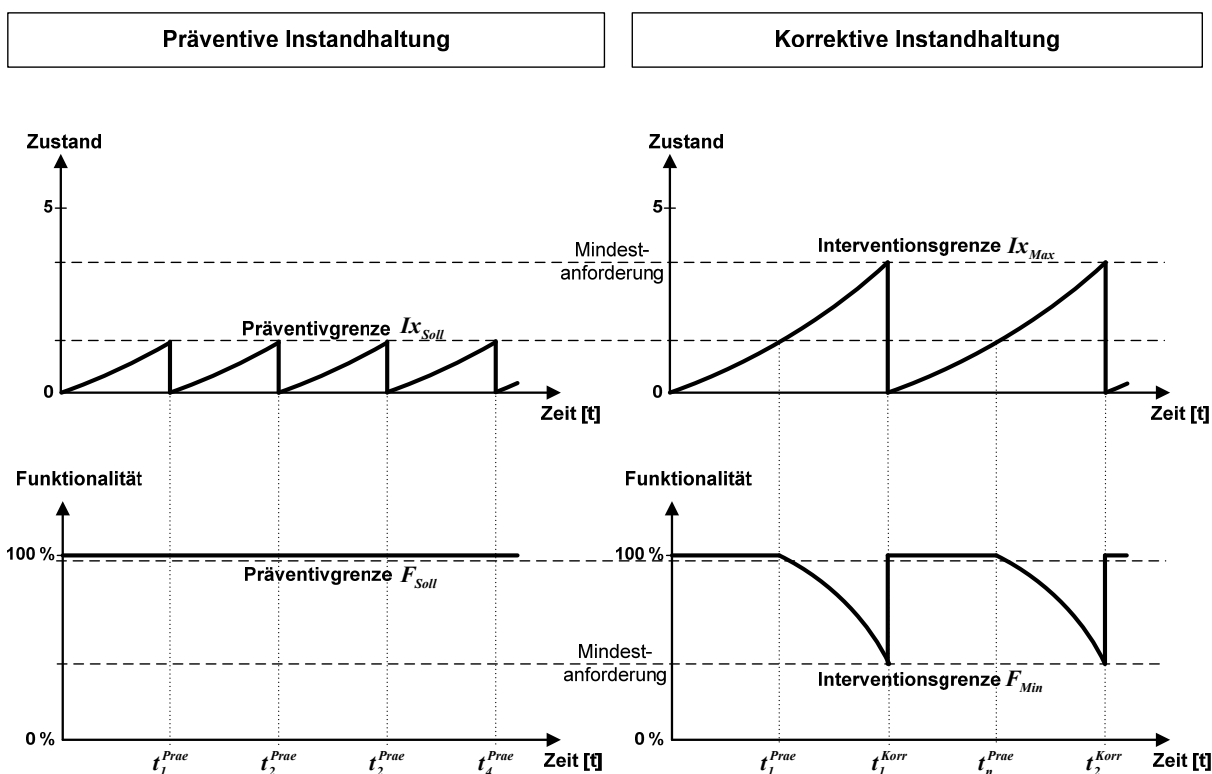


Bild 23: Verlauf von Strassenzustand und Funktionalität der Strasse bei einer Korrekativen bzw. Präventiven Instandhaltung

4.1.2. Anforderungen an eine Erhaltungsstrategie

Die Einteilung in Präventive oder Korrektive Instandhaltung stellt zunächst eine grobe Einteilung der Erhaltungsstrategien dar. Die Definition einer Erhaltungsstrategie erfordert darüber

hinaus eine genauere Formulierung der intendierten Wirkung der Strategie und der dafür erforderlichen und geeigneten Massnahmen. In der Strategie müssen detaillierte Vorgaben zu folgenden Punkten gemacht werden:

- Angestrebtes mittleres Zustandsniveau $I_{x_{\emptyset}}$ der Strasse bzw. des Strassennetzes
- Zeitpunkt zu dem spätestens eine Massnahme eingeplant werden sollte, dieser wird aus einer konkreten Vorgabe einer Präventivgrenze $I_{x_{soll}}$ bzw. Interventionsgrenze $I_{x_{max}}$ bzw. F_{min} abgeleitet.
- Einschränkungen bzgl. der bevorzugten Massnahmen (kleinere Reparaturen, umfangreichere Massnahmen oder Kompletterneuerungen), dies kann z.B. über die Festlegung von Mindestrücksetzwerten $\Delta I_{x_{min}}$ (Auswirkung der Massnahme auf die Zustandsindizes) der gewählten Massnahmen erreicht werden.
- Festlegung von Budgetgrenzen für einzelne Massnahmen (K_{max}^M) sowie pro Jahr (K_{max}^t) für eine Strasse oder das gesamte Netz

Mithilfe dieser Vorgaben können dann im operativen Erhaltungsmanagement aus der Erhaltungsstrategie Γ verschiedene Erhaltungsvarianten χ entwickelt werden. Die Erhaltungsstrategie liefert dabei die Vorgaben für die Entscheidungsfindung über Art und Zeitpunkt der einzuplanenden Massnahmen.

4.2. Entwicklung von Erhaltungsvarianten χ aus einer Erhaltungsstrategie Γ

Die Erhaltungsstrategie gibt den Rahmen für die operative Umsetzung der Erhaltungsplanung im Rahmen des Erhaltungsmanagements in konkrete Erhaltungsvarianten vor. In der Erhaltungsvariante wird ein konkreter Ablauf der Erhaltungsmassnahmen über den Betrachtungszeitraum vorgeplant. Hauptkriterium für die Erhaltungsplanung ist der Strassenzustand, der in den verschiedenen Zustandsindizes (siehe Kapitel 3.1.1.3) abgebildet wird. Der Strassenzustand ist über den Lebenszyklus einer Strasse ständigen Veränderung unterworfen. Die ständig vorhandenen schädigenden Einflüsse, d.h. die Belastung durch Fahrzeuge sowie Umwelteinflüsse, führen zu einer kontinuierlichen Verschlechterung des Strassenzustands. Dieser Entwicklung muss im Erhaltungsmanagement mit geeigneten Erhaltungsmassnahmen entgegengewirkt werden. Eine Erhaltungsmassnahme führt, je nach Art und Umfang der Massnahme, dann zu einer Verbesserung bzw. zur Herstellung des Neuzustands in einzelnen oder allen Zustandsindizes I_x (Bild 34).

Die Entscheidung wann ein Eingreifen notwendig ist und welche Massnahme dann gewählt wird muss jeweils unter Berücksichtigung der normativen und strategischen Vorgaben getroffen werden.

4.2.1. Bildung homogener Verhaltensabschnitte

Für die Entwicklung von Erhaltungsvarianten muss der Betrachtungsraum zunächst gemäss den Kriterien

- Verkehrsbelastung ($VBel^y$),
- Strassenaufbau ($StrAuf^y$) und
- Strassenzustand im Anfangszeitpunkt ($I_x^{Abschnitt\ y}(0)$)

in homogene Verhaltensabschnitte unterteilt werden (siehe Kapitel 3.1.2.2). Der Zustand dieser Verhaltensabschnitte wird in Abhängigkeit von der Zeit durch einen Datensatz der verschiedenen Zustandsindizes beschrieben.

$$I_x^{Abschnitt\ y}(t) = \begin{bmatrix} I_1^{Abschnitt\ y}(t) \\ I_2^{Abschnitt\ y}(t) \\ I_3^{Abschnitt\ y}(t) \\ I_4^{Abschnitt\ y}(t) \\ I_5^{Abschnitt\ y}(t) \end{bmatrix} \tag{6}$$

Aufgrund der stark unterschiedlichen Belastung sowie des oft unterschiedlichen Strassenaufbaus muss bei der Abschnittsbildung auf Autobahnen auch zwischen den verschiedenen Fahrstreifen differenziert werden (Bild 24).

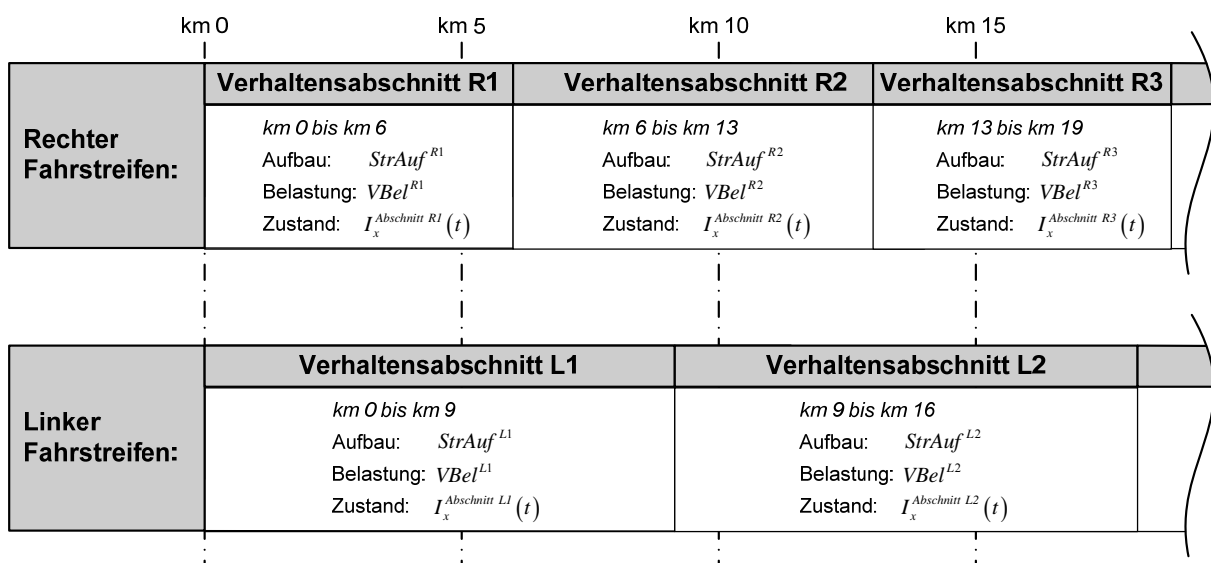


Bild 24: Beispiel für die Einteilung des Betrachtungsraums in homogene Verhaltensabschnitte y

Im Folgenden wird, um die Übersichtlichkeit der Formeln zu gewährleisten, auf die Differenzierung nach homogenen Verhaltensabschnitten verzichtet. Die allgemein angegebenen Formeln gelten jeweils für den betrachteten Verhaltensabschnitt (Abschnitt y).

4.2.2. Entscheidungsbaumverfahren

Die Entwicklung einer Erhaltungsvariante erfolgt über eine Abfolge von Entscheidungszeitpunkten, in denen jeweils entschieden werden muss, ob eine Erhaltungsmaßnahme notwendig ist oder nicht und wenn ja, welche Maßnahme gewählt wird.

Die Erhaltungsplanung im Rahmen einer Strategieentwicklung mit den möglichen Erhaltungsvarianten erfolgt prospektiv. Die Erhaltungsplanung erfolgt auf Grundlage des prognostizierten Verkehrsaufkommens $VBel^y$ (Bild 25). Dazu muss in den jeweiligen Erhaltungszeitabständen iterativ die Wirkung der Verkehrsbelastung auf die Erhaltungsmassnahme und deren Zustandsverhalten der Fahrbahn prognostiziert werden (Bild 26). Die jeweils gültige Zustandsverhaltenskurve in Abhängigkeit von Fahrbahntyp und Erhaltungsmassnahme (Bild 26) wird dann im Zeitabschnitt des jeweiligen Mittelwerts der Verkehrsbelastung $VBel^y$ bis zum Erreichen des nächsten Mittelwertintervalls der Verkehrsbelastung oder bis zum Erreichen des Zustandsgrenzwertes I_x^{Grenz} angewendet (Bild 27). Auf Basis dieser grundsätzlichen Vorgehensweise werden verschiedene Erhaltungsvarianten entwickelt, die aufgrund der Variantenvielfalt der Massnahmen für die Wiederherstellung des jeweiligen Sollzustands zu einer Vielzahl von Varianten innerhalb einer Erhaltungsstrategie führt. Die Vielzahl von Varianten je korrektivem Instandhaltungszeitpunkt führt zu einer Entscheidungsbaumstruktur mit einer Vielzahl von Erhaltungsvarianten χ einer gewählten Strategie Γ (Bild 28). Die geplanten Erhaltungsmassnahmen in regelmässigen Zeitabständen ΔT (z.B. jährlich) überprüft und eventuell angepasst werden.

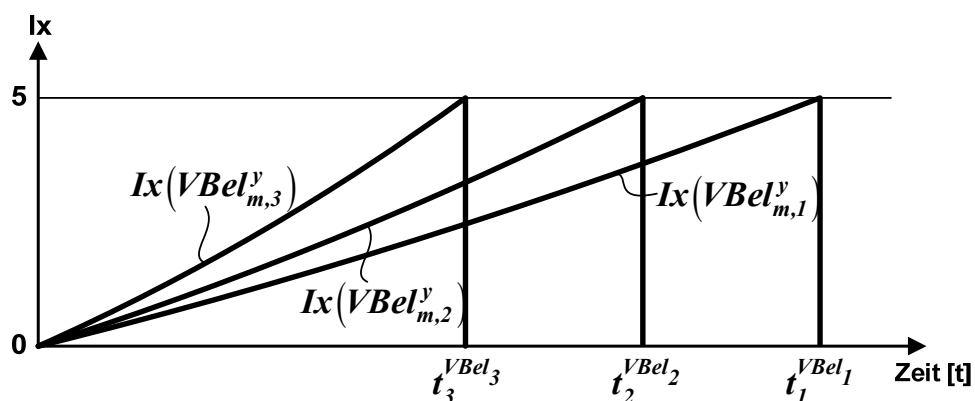


Bild 25: Zustandsverhalten einer Fahrbahn bzw. einer Erhaltungsmassnahme m_i^x in Abhängigkeit der mittleren Verkehrsbelastung über den Zeitabschnitt

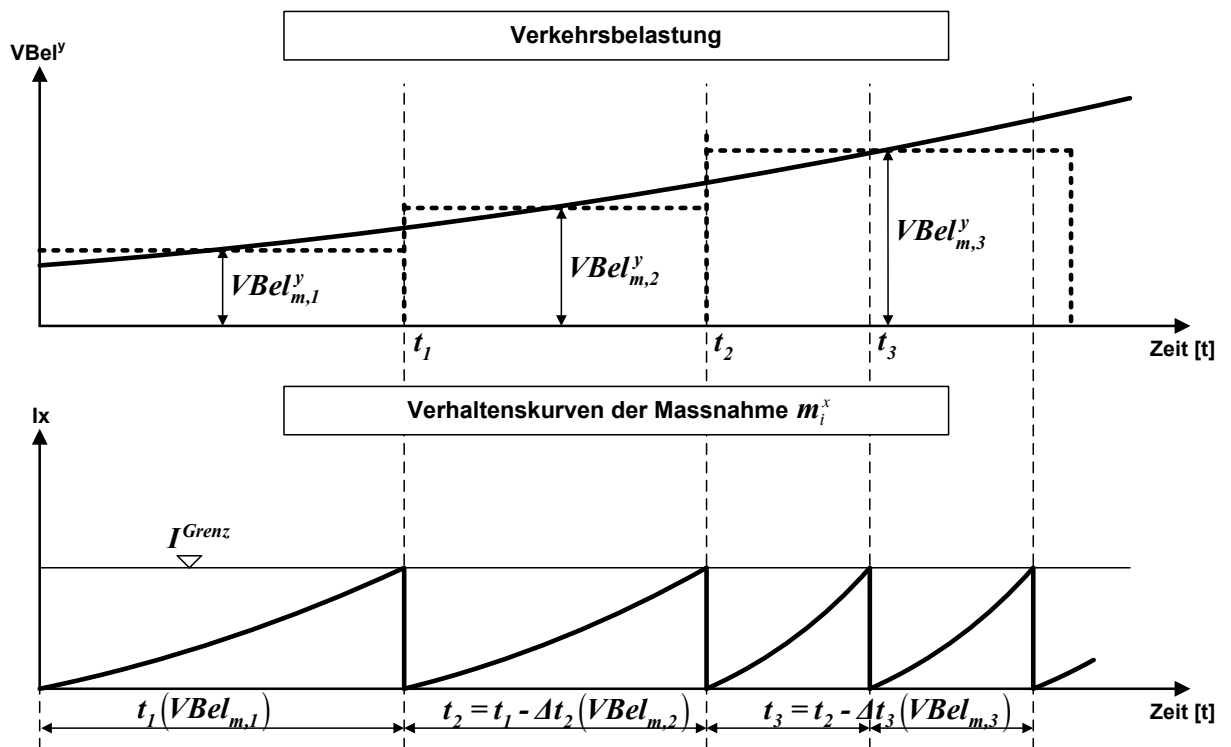


Bild 26: Zustandsverhalten $I_x(t)$ einer Erhaltungsmassnahme m_i^x in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung $VBel^y(t)$ bis zum Erreichen einer festgelegten Eingreifgrenze

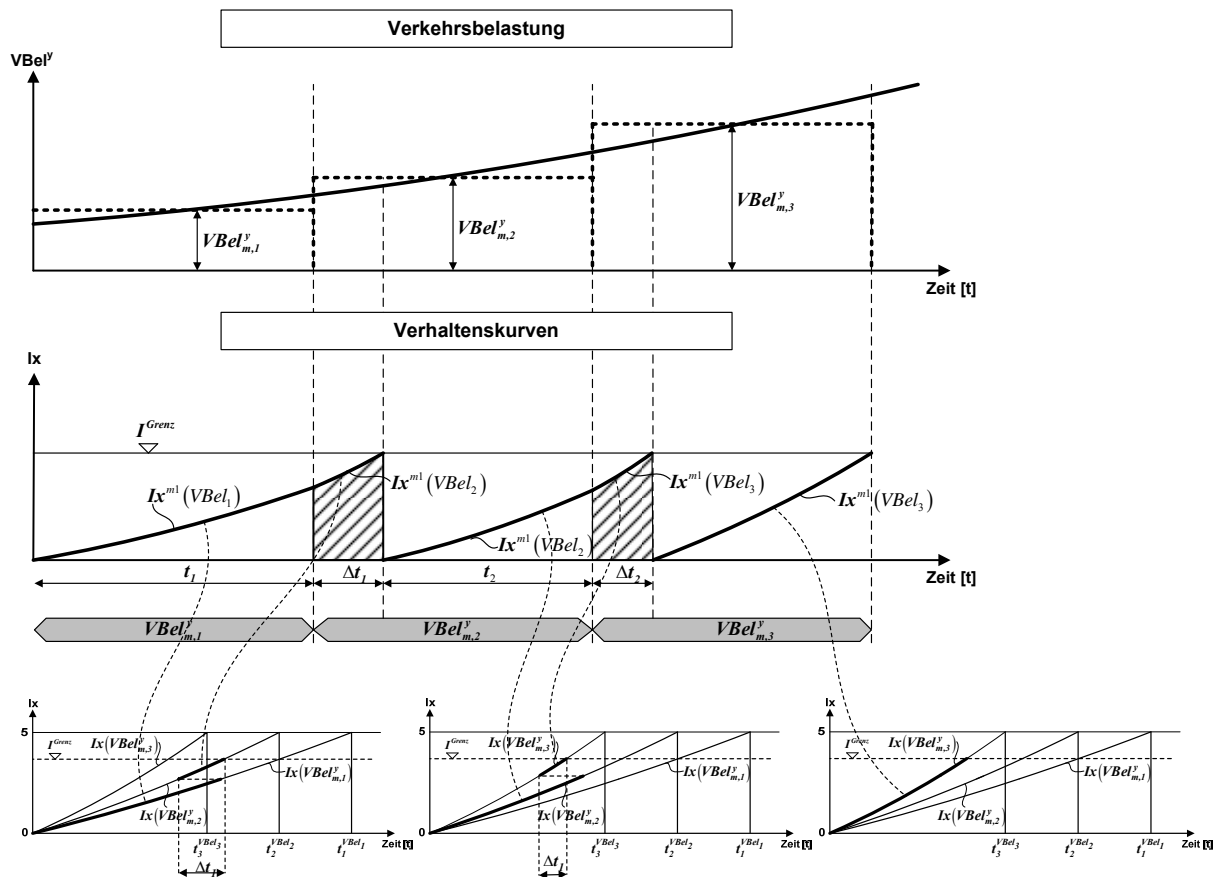


Bild 27: Prognose der Dauerhaftigkeit der Erhaltungsmaßnahmen durch sich verändernde Verkehrseinwirkungen

Bild 28 zeigt das Vorgehen zur Entwicklung einer Erhaltungsvariante beispielhaft über drei Entscheidungszeitpunkte für Erhaltungsmaßnahmen eines einzelnen homogenen Verhaltensabschnitts y . In jedem Entscheidungszeitpunkt stehen die Massnahmen $m_i(\Gamma, Ix^{Grenz}, VBel)_y$ zur Auswahl, deren Anwendungsbereich den aktuellen Strassenzustand abdeckt und deren Rücksetzwert $\Delta Ix(m_i)$ den Vorgaben aus der Strategie $\Delta Ix(\Gamma)$ entspricht. Ausserdem besteht die Möglichkeit keine Massnahme zu wählen. Die Entscheidungen über die Art der Erhaltungsmaßnahme in den einzelnen Entscheidungszeitpunkten t_n^{Ent} beeinflussen den weiteren Verlauf des Strassenzustands und damit auch die Entscheidungsmöglichkeiten im darauffolgenden Entscheidungszeitpunkt t_{n+1}^{Ent} .

Bei der Definition der Entscheidungszeitpunkte gilt:

Für den ersten Entscheidungszeitpunkt: $t_1^{Ent} = t_0 + \Delta T_1$

Für alle weiteren: $t_{n+1}^{Ent} = t_n^{Ent} + \Delta T_n$ (7)

Mit: $t_n^{Ent} =$ n-ter Entscheidungszeitpunkt

$t_0 =$ Anfangszeitpunkt der Betrachtung
 $\Delta T_i =$ Zeitintervall zwischen den Entscheidungszeitpunkten

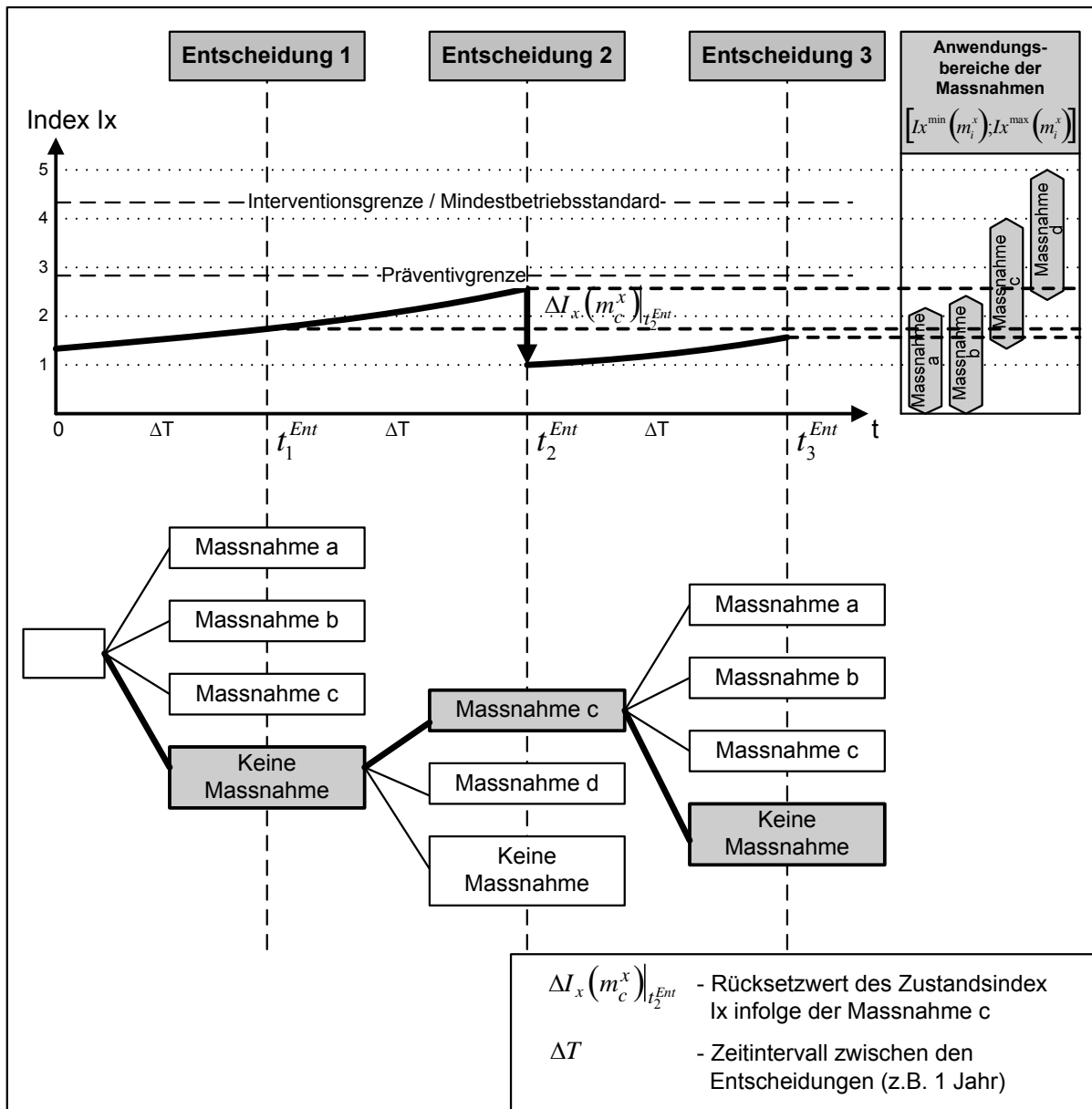


Bild 28: Entwicklung einer Erhaltungsvariante χ mit Hilfe des Entscheidungsbaumverfahrens (Beispielhaft über drei Entscheidungszeitpunkte)

Massnahmenauswahl

In Bild 29 wird einer dieser Entscheide (Entscheidung 2) herausgegriffen und der Prozess der Massnahmenauswahl aufgezeigt.

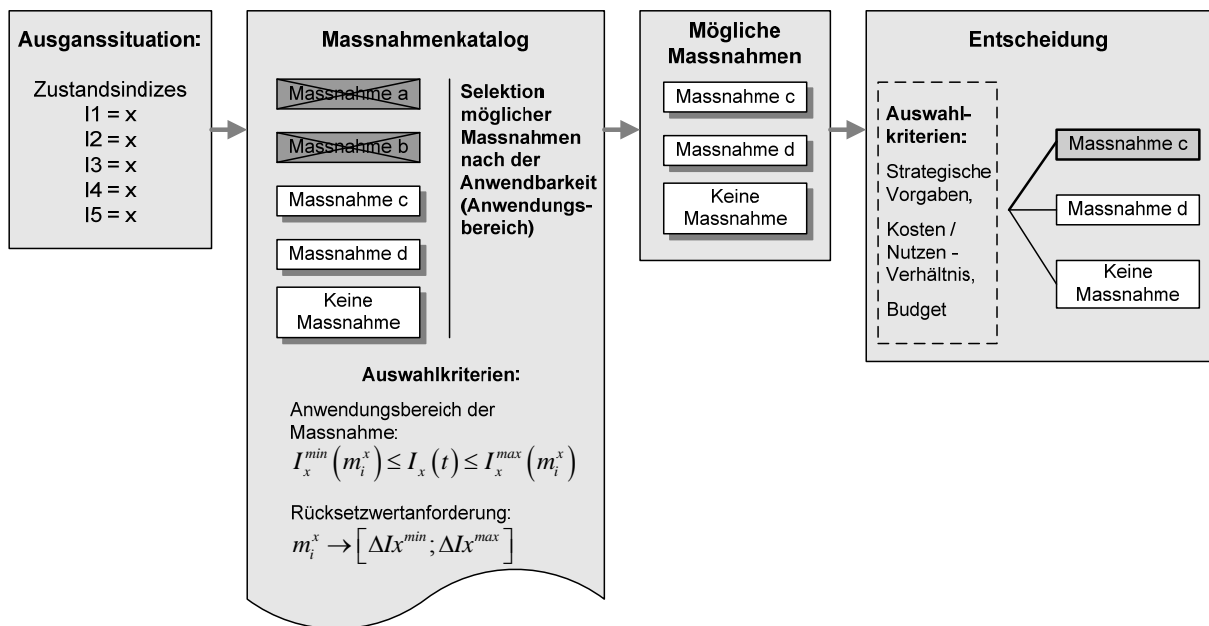


Bild 29: Prozessschritte der Massnahmenauswahl in einem Entscheidungszeitpunkt (am Beispiel der Entscheidung 2 aus Bild 28)

Die Entscheidungsfindung im Entscheidungszeitpunkt läuft in zwei Schritten ab:

- Zunächst werden abhängig vom Anwendungsbereich die technisch möglichen Massnahmen selektiert.
- Im zweiten Schritt wird aus dieser eingeschränkten Auswahl, unter Berücksichtigung strategischer Überlegungen, eine Massnahme ausgewählt.

In jedem Entscheidungszeitpunkt werden also zunächst in Abhängigkeit vom Strassenzustand, die Massnahmen aus dem gesamten Massnahmenkatalog (Bild 33) selektiert, deren Anwendungsbereich zum aktuellen Strassenzustand passt (Bild 29).

Der technische Anwendungsbereich einer Massnahme m_i^x wird definiert durch das Zustandsintervall $[I_x^{\min}(m_i^x); I_x^{\max}(m_i^x)]$ in dem sich die Strasse befinden darf, damit die Massnahme anwendbar ist.

Damit eine Massnahme beim aktuellen Strassenzustand I_x technisch anwendbar ist muss also gelten:

$$I_x^{\min}(m_i^x) \leq I_x(t) \leq I_x^{\max}(m_i^x) \quad (8)$$

mit: $I_x^{\min/\max}(m_i^x) =$ Untere / obere technische Zustandsgrenze des Anwendungsbereichs der Massnahme m_i^x

$I_x(t) =$ Vektor der Einzelindizes I1 bis I5 des aktuellen oder prospektiven Zustands der Strasse zum Entscheidungszeitpunkt t

Des Weiteren müssen auch die Vorgaben der Erhaltungsstrategie bezüglich des Mindestrücksetzwerts eingehalten werden. Dieser Wert gibt an, um wie viel der Strassenzustand in den einzelnen Zustandsindizes bei einer Massnahme mindestens verbessert werden soll, damit die Massnahme für die gewählte Strategie Γ in Frage kommt.

Es muss also gelten:

$$\Delta I_x(m_i^x) \geq \Delta I_x^{\min,\Gamma} \quad \text{bzw.} \quad m_i^x \rightarrow [\Delta I_x^{\min}; \Delta I_x^{\max}]^{\Gamma}$$

mit: $\Delta I_x(m_i^x) =$ Rücksetzwert der Massnahme m_i^x für den Zustandsindex I_x

$\Delta I_x^{\min,\Gamma} =$ Mindestrücksetzwert für den Zustandsindex I_x bei der Strategie Γ

$[\Delta I_x^{\min}; \Delta I_x^{\max}] =$ Intervallgrenzen für den Rücksetzbereich der gewählten Strategie Γ

Zusätzlich zu den möglichen Erhaltungsmassnahmen besteht auch die Möglichkeit keine Massnahme zu wählen. Dies ist möglich, solange der Strassenzustand unter dem Mindestbetriebsstandard, d.h. der Interventionsgrenze bleibt, solange also gilt:

$$I_x(t) \leq I_x^{\text{MinStandard}} \quad (9)$$

mit: $I_x^{\text{MinStandard}} =$ Mindestbetriebsstandard (Interventionsgrenze) für den Zustandsindex I_x

Prinzipiell ist zwischen den strategieunabhängigen, immer einzuhaltenden Grenzen des Mindestbetriebsstandards und den von der Strategie vorgegebenen Grenzen (Präventiv- bzw. Interventionsgrenze) zu unterscheiden. Für den Mindestbetriebsstandard existieren derzeit in der Schweiz keine verbindlichen gesetzlichen oder normativen Vorgaben. Es ist also Aufgabe des jeweiligen Strassenbetreibers für sein Strassennetz eine geeignete Grenze festzulegen, die ein Minimum an Betriebssicherheit gewährleistet und somit auch eventuellen Regressforderungen verunfallter Nutzer ausschliesst. Bei einer Korrektiv-Strategie kann der

Mindestbetriebsstandard (Interventionsgrenze I_x^{max}) als strategieunabhängige Grösse mit der Interventionsgrenze aus der Strategie zusammenfallen (Bild 23). Bei einer Präventiv-Strategie (Bild 23) existieren dagegen immer zwei Grenzen (Kriterien). Der Mindestbetriebsstandard gibt das absolute Minimum des Strassenzustands vor, das nicht unterschritten werden darf. Nach diesem Kriterium entscheidet sich bei der Selektion der möglichen Massnahmen, ob die Option besteht, keine Massnahme zu ergreifen oder ob eine Massnahme zwingend erforderlich ist. Die Präventivgrenze I_x^{Soll} stellt den Soll-Betriebsstandard dar, der möglichst jederzeit garantiert werden sollte. Dies stellt eine rein strategische Grenze dar und beeinflusst im zweiten Schritt die tatsächliche Massnahmenauswahl.

Wird keine Massnahme gewählt, so verschlechtert sich der Strassenzustand weiter, so dass im nächsten Entscheidungszeitpunkt dann entsprechend andere und möglicherweise aufwendigere Massnahmen möglich bzw. notwendig sind (Bild 28).

Veränderung des Strassenzustands infolge der gewählten Massnahme

Infolge der gewählten Massnahme m_i^x im Anwendungsbereich $[I_x^{min}; I_x^{max}]$ verbessert sich der Strassenzustand gemäss den in Bild 34 angegebenen Rücksetzwerten ΔI_x . Die Auswirkung einer Massnahme m_i^x auf den Strassenzustand wird unterschieden in:

- Relative Veränderungen des Strassenzustands (Werte mit Vorzeichen in Bild 34). In diesem Fall verbessert sich der Strassenzustand in den einzelnen Zustandsindizes I_x um den Rücksetzwert $\Delta I_x(m_i^x)$, d.h. der nach der Massnahme erreichte Zustand hängt von dem Zustand vor der Massnahme ab.
- Erreichen eines festgelegten neuen Indexwertes nach der Massnahme (Werte ohne Vorzeichen in Bild 34). In diesem Fall liegt nach der Massnahme in allen Zustandsindizes ein definierter Strassenzustand $I_x(m_i^x)$ vor (z.B. Neuzustand), unabhängig vom Strassenzustand vor der Massnahme.

Im Falle einer relativen Verbesserung des Strassenzustands gilt:

$$I_x(t^{m_i^+}) = I_x(t^{m_i^-}) - \Delta I_x(m_i^x) \quad (10)$$

Bei einem festgelegten Zustandswert nach der Massnahme gilt:

$$I_x(t^+) = I_x(m_i^x) \quad (11)$$

mit: $I_x(t^{m_i^+}) =$ Strassenzustand nach Durchführung der Massnahme m_i^x

$I_x(t^{m_i^-}) =$ Strassenzustand vor Durchführung der Massnahme m_i^x

$\Delta I_x(m_i^x) =$ Veränderung des Strassenzustands durch die Massnahme m_i^x

$I_x(m_i^x) =$ Festgelegter Indexwert nach Ausführung der Massnahme m_i^x

Zu beachten ist, dass eine Erhaltungsmassnahme meist nicht nur Einfluss auf einen einzelnen Zustandsindex hat. Vielmehr beeinflussen die einzelnen Massnahmen den Strassenzustand meist in umfassender Weise. Ausschlaggebend für die Wahl einer Massnahme ist zwar meist ein einziger, nicht mehr den Vorgaben entsprechender Zustandsindex, die Veränderung des Strassenzustands infolge der gewählten Massnahme betrifft aber auch die anderen Indizes. Die Massnahme hat dann also über den eigentlich intendierten Einfluss auch noch weitere Einflüsse auf den Strassenzustand. Diese Einflüsse werden allerdings bei der Bestimmung des Strassenzustands nach der Massnahme gemäss den Formeln (10) und (11) automatisch berücksichtigt.

Im Einzelnen lassen sich die Auswirkungen einer Massnahme $m_i^{x^*}$ getrennt nach intendierter Wirkung auf den Index Ix^* und nicht intendierter Wirkung auf die restlichen Indizes Iy wie folgt darstellen:

$$\Delta Ix(m_i^{x^*}) = \left\{ \Delta Ix^*(m_i^{x^*}) \wedge \Delta Iy(m_i^{x^*}) \right\} \text{ mit } y \in \mathbb{Z}^+ \mid 1 \leq y \leq 5 \text{ ohne } y = x^* \quad (12)$$

Daraus folgt für den Strassenzustand nach der Massnahme:

$$Ix(t^{m_i^{x^*+}}) = \left\{ Ix^*(t^{m_i^{x^*-}}) - \Delta Ix^*(m_i^{x^*}) \wedge Iy(t^{m_i^{x^*-}}) - \Delta Iy^*(m_i^{x^*}) \right\} \quad (13)$$

mit: $\Delta Ix^*(m_i^{x^*}) =$ Intendierte Wirkung der Massnahme $m_i^{x^*}$ auf den Zustandsindex Ix^*

(Hauptwirkung)

$\Delta Iy(m_i^{x^*}) =$ Nicht intendierte Wirkung der Massnahme $m_i^{x^*}$ auf die übrigen Zustandsindizes Iy

$Ix^* =$ Zustandsindex x^* der mit der Massnahme $m_i^{x^*}$ verbessert werden soll

$Iy =$ Zustandsindizes y die durch die Massnahme zusätzlich zu x^* verbessert werden

Entwicklung des Strassenzustands nach Ausführung der gewählten Massnahme

Der Zustandsverlauf nach einer Erhaltungsmassnahme kann grundlegend anders sein als der Verlauf vor der Massnahme und hängt von folgenden Parametern ab:

- Art der durchgeführten Massnahme
- Struktureller Aufbau der Strasse (Verhaltensklasse)
- Strassenzustand vor bzw. nach der Massnahme

Eine eher oberflächliche Massnahme, wie z.B. eine Oberflächenbehandlung führt zwar zu einer kurzfristigen Verbesserung des Strassenzustands, eine solche Massnahme weist allerdings auch eine relativ kurze Wirkungszeitspanne ab. Die Verschlechterung des Strassenzustands verläuft nach einer solchen Massnahme schneller als zuvor. Eine umfangreiche

Massnahme, mit struktureller Verbesserung des Strassenaufbaus, führt dagegen zu einer langsameren Verschlechterung des Strassenzustands. Im Einzelprojekt 1 *Standardisierte Erhaltungsmassnahmen* (Gnehm 2008) wurde daher die Verhaltensklasse einer Strasse als zusätzlicher Index eingeführt. Die Auswirkungen der einzelnen standardisierten Erhaltungsmassnahmen werden nicht nur für die Strassenzustandsindizes I_x , sondern auch für die Verhaltensklasse angegeben. Massnahmen, die zu einer strukturellen Verbesserung des Strassenaufbaus führen, führen dann auch zu einer Verbesserung der Verhaltensklasse (siehe Bild 34). In Abhängigkeit von der Verhaltensklasse laufen gewisse Schadensprozesse unterschiedlich schnell ab, was zu unterschiedlichen Verlaufskurven des Strassenzustands führt (Bild 30).

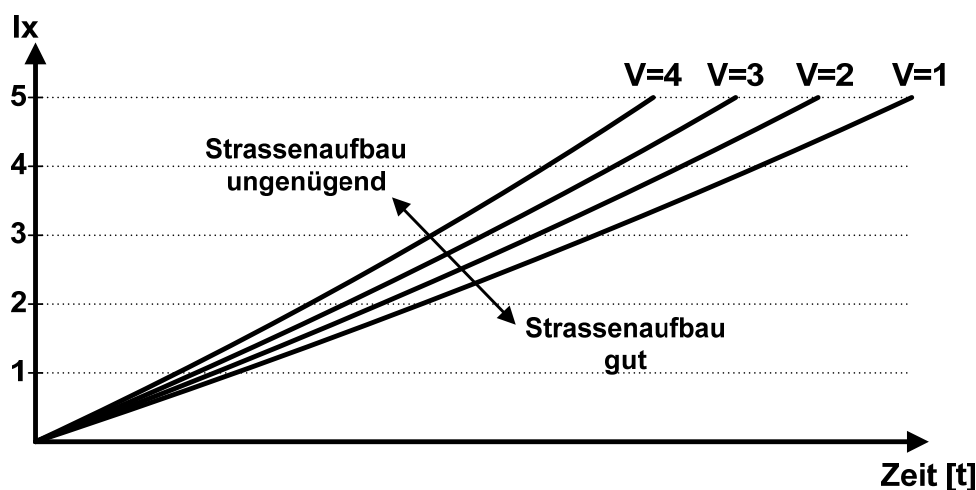
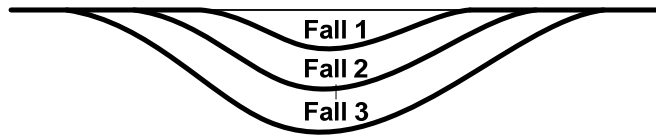


Bild 30: Entwicklung des Strassenzustands in Abhängigkeit von der Verhaltensklasse V

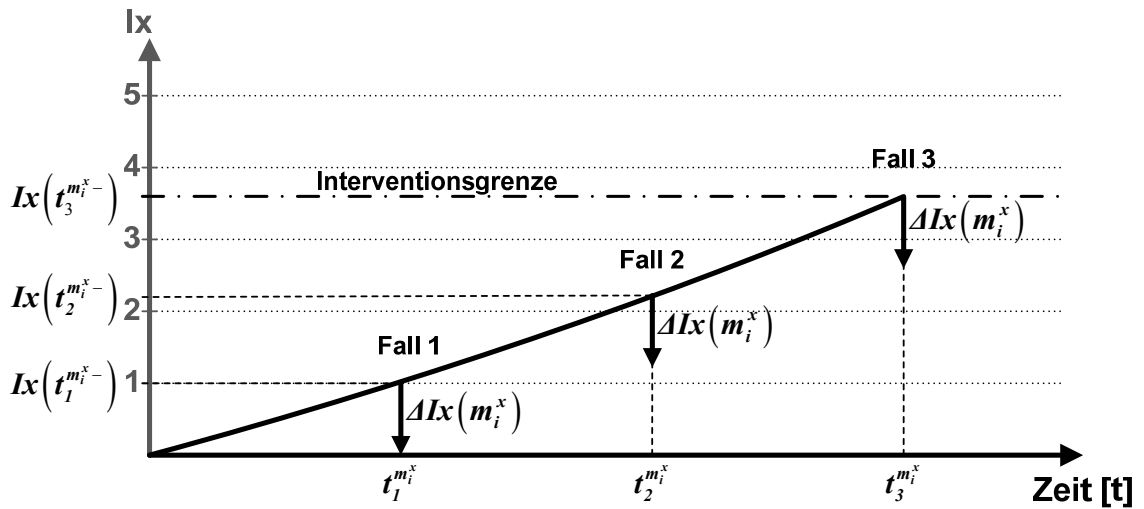
Ein weiterer Einflussfaktor auf den Verlauf des Strassenzustands nach einer Erhaltungsmassnahme ist das Zustandsniveau vor und damit - bei einer relativen Veränderung - auch nach der der Massnahme. Bild 31 zeigt den Zustandsverlauf nach einer Erhaltungsmassnahme m_i^x in Abhängigkeit von dem Strassenzustand vor der Massnahme am Beispiel der Längsebenheit. Liegt eine so grosse Schädigung vor, dass auch nach der Massnahme noch eine gewisse Schädigung vorliegt, so führt diese Anfangsschädigung zu einem beschleunigten Schädigungsprozess nach der Massnahme. Entsprechend verkürzt sich die Wirkungszeitspanne der Massnahme, so dass nach einer kürzeren Zeitspanne eine Folgemassnahme notwendig wird.

Der Zustandsverlauf nach einer Massnahme ist also nicht nur von der Art der Massnahme, sondern auch vom Zeitpunkt der Anwendung, d.h. dem Strassenzustand vor Ausführung der Massnahme abhängig.

Schadensbild – Beispiel Längsebenheit



Verhaltens- / Zustandsentwicklung vor der Massnahme m_i^x



Verhaltens- / Zustandsentwicklung nach der Massnahme m_i^x

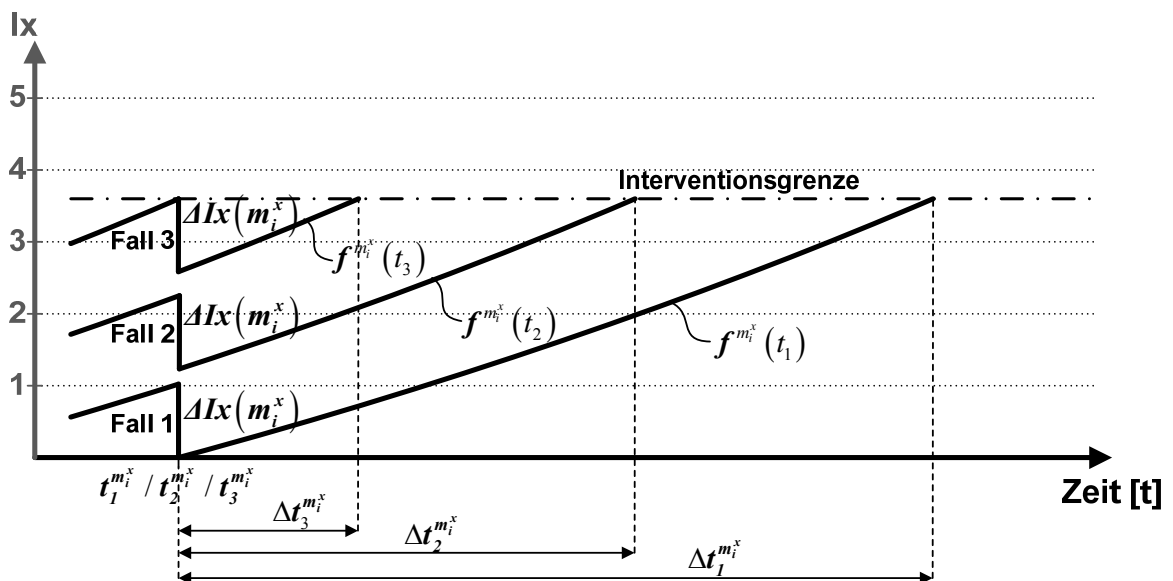


Bild 31: Wirkung der Massnahme m_i^x bei unterschiedlichem Vorzustand $I_x(t_j^{m_i^x-})$

Vereinfachte Abbildung des Zustandsverlaufs mit einer von der Verhaltensklasse und durchgeführten Massnahmen unabhängigen allgemeinen Verlaufskurve

Die Problematik bei einer möglichst realitätsnahen Abbildung des Strassenzustandsverlaufs nach einer Erhaltungsmassnahme liegt in der hierfür notwendigen Datengrundlage. Eine möglichst exakte Prognose des Strassenzustands müsste, wie oben dargestellt, zum einen den strukturellen Aufbau der Strasse in Form der Verhaltensklasse, zum anderen auch die individuellen Auswirkungen der einzelnen Massnahmen auf die zukünftige Entwicklung des Strassenzustands sowie der Strassenzustand vor und nach Durchführung der Massnahme berücksichtigt werden. Hierzu wäre eine weitreichende Differenzierung der Verlaufskurven in Abhängigkeit wichtiger Einflussfaktoren notwendig. Für eine solche Differenzierung fehlt allerdings in der praktischen Umsetzung zurzeit die Datengrundlage.

Die im Einzelprojekt 2 *Schadensprozesse und Zustandsverläufe* entwickelten Verlaufskurven des Strassenzustands berücksichtigen keine Einflüsse der Erhaltungsmassnahmen auf den Zustandsverlauf. Daher wird in diesem Forschungsprojekt aus praktischen Gründen auch vereinfachend von einer konstanten allgemeinen affinen Verlaufskurve für jeden Zustandparameter I_x ausgegangen. Bei dieser Vereinfachung (aufgrund fehlender Datengrundlage) muss nach Ausführung einer Erhaltungsmassnahme davon ausgegangen werden, dass die weitere Entwicklung des Strassenzustands wiederum gemäss der allgemeinen affinen Verlaufskurve I_x in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung verläuft. Dadurch wird aus praktischen Gründen eine Annahme getroffen die fehlerbehaftet ist, da alle Massnahmen affin zum Verhaltensverlauf des Originalfahrbahnbelags beurteilt werden.

Der Verlauf des Strassenzustands nach einer Erhaltungsmassnahme wird bei dieser affinen Zustandsverhaltensweise aller Massnahmen durch eine horizontale Verschiebung der allgemeinen Verlaufskurve bis zum Punkt des Zustands nach der Massnahme ermittelt. Der Zustandsverlauf beginnt also an dem Punkt der allgemeinen Verlaufskurve, der dem aktuellen Strassenzustand nach der Massnahme m_i^x entspricht (Bild 32). Dadurch wird auch eine eventuell noch nach der Massnahme vorhandene Vorschädigung berücksichtigt, da die Steigung des Zustandsverlaufs nach der Massnahme dem dann aktuellen Schädigungsgrad entspricht. In dem in Bild 32 dargestellten Fall verläuft die Zustandsverschlechterung bei schlechterem Anfangszustand nach der Massnahme m_i^x schneller als im Bereich eines guten Zustandsniveaus (Bild 32 links). Liegt nach einer Massnahme also immer noch eine Schädigung vor, so verläuft auch die weitere Zustandsverschlechterung nach der Massnahme schneller als bei einer neuwertigen Strasse.

Diese vereinfachte Vorgehensweise ermöglicht eine bestmögliche Abbildung des Zustandsverlaufs vor und nach einer Massnahme im Rahmen der „vorhandenen“ Datengrundlage.

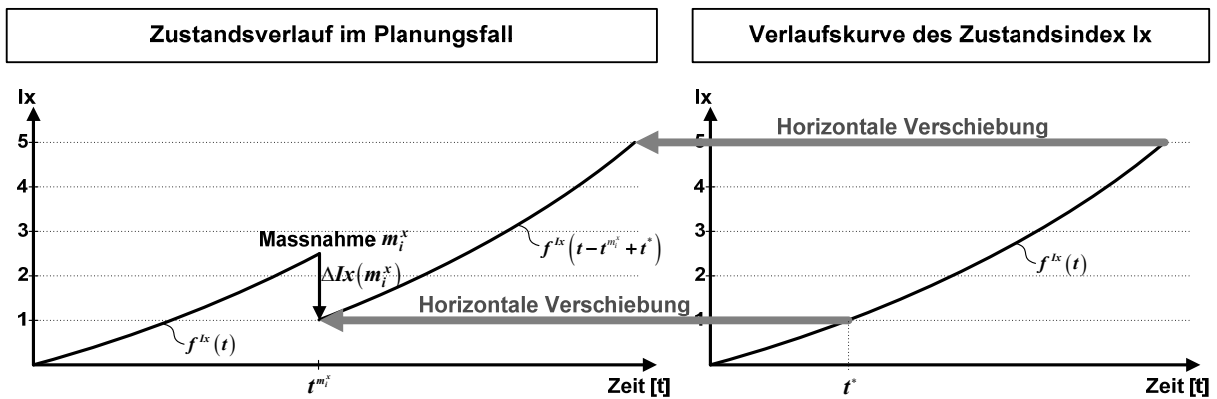


Bild 32: Ableitung des Zustandsverlaufs nach einer Massnahme m_i^x aus der allgemeinen Verlaufskurve durch horizontale Verschiebung (Näherungsverfahren)

Für den Strassenzustand vor Ausführung einer Massnahme gilt:

$$Ix(t) = f^{Ix}(t)$$

Für den weiteren Verlauf des Strassenzustands gilt:

$$Ix(t) = f^{Ix}(t - t^{m_i^x} + t^*) \quad \text{mit:} \quad t^* = \left\{ t \mid f^{Ix}(t) = Ix(t^{m_i^x} + t) \right\}$$

Mit: $f^{Ix}(t) =$ Funktion der Verlaufskurve für den Zustandsindex Ix

$t^* =$ Zeitpunkt an dem der Strassenzustand bei der allgemeinen Verlaufskurve dem Strassenzustand nach Durchführung der Massnahme m_i^x entspricht

Definition der Erhaltungsvariante

Verhaltensabschnitt

Die Erhaltungsvariante χ , die sich aus der Summe der Massnahmenentscheidungen über den Betrachtungszeitraum für einen homogenen Verhaltensabschnitt ergibt, lässt sich mathematisch als Vektor der einzelnen Massnahmen darstellen, wobei sich jede Komponente des Vektors aus der gewählten Massnahme und dem Zeitpunkt der Umsetzung zusammensetzt:

$$\mathbf{U}_{\chi}^{\text{Abschnitt } y}(\Gamma) = \left\{ \mathbf{M}_i^x \Big|_t^{m_i^x} \right\}_{\chi}^{\text{Abschnitt } y} = \left\{ m_{i_1}^x \Big|_t^{m_{i_1}^x}; m_{i_2}^x \Big|_t^{m_{i_2}^x}; \dots; m_{i_n}^x \Big|_t^{m_{i_n}^x} \right\}_{\chi}^{\text{Abschnitt } y} \quad (14)$$

mit: $\mathbf{U}_{\chi}^{\text{Abschnitt } y}(\Gamma) =$ Erhaltungsvariante χ im Rahmen der Erhaltungsstrategie Γ für den Verhaltensabschnitt y

$\mathbf{M}_i^x \Big _{t_{m_i^x}}$	=	Vektor der Massnahmen i zu den Zeitpunkten $t_{m_{i,2,\dots,n}^x}$
$m_{i,2,\dots,n}^x$	=	Massnahmen i aus dem Katalog der standardisierten Erhaltungsmassnahmen (Gnehm 2008) - eingeplant in der Reihenfolge 1 bis n in der Erhaltungsvariante χ
$t_{m_{i,2,\dots,n}^x}$	=	Zeitpunkte zu denen Massnahmen $m_{i,2,\dots,n}^x$ eingeplant werden
<i>Abschnitt y</i>	=	Homogener Teilabschnitt y in dem die entsprechende Massnahme eingeplant wird

Verbindungsabschnitt

Fasst man die einzelnen Verhaltensabschnitte $y=1$ bis n eines Verbindungsabschnitts A-B zusammen, so ergibt sich für den gesamten Betrachtungsraum einen Vektor, dessen Komponenten als zusätzliche Information noch den jeweiligen Verhaltensabschnitt y, in dem die Massnahme ausgeführt werden soll, enthalten:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U}_\chi(\Gamma)^{AB} &= \bigcup_{\text{Abschnitt } y=1}^n \left\{ \mathbf{U}_\chi(\Gamma)^{\text{Abschnitt } y} \right\}^{AB} = \left\{ \mathbf{U}_\chi(\Gamma)^{\text{Abschnitt } y} \right\}_{y=1}^n \Big|_{y=1}^{AB} \\
 &= \left\{ \mathbf{M}_i^x \Big|_{t_{m_i^x}} \right\}_{\chi} \Big|_{y=1}^{AB} = \left\{ m_{i_1}^x \Big|_{t_{m_{i_1}^x}} ; m_{i_2}^x \Big|_{t_{m_{i_2}^x}} ; \dots ; m_{i_n}^x \Big|_{t_{m_{i_n}^x}} \right\}_{\chi} \Big|_{y=1}^{AB} \quad (15)
 \end{aligned}$$

Anmerkung:

\cup = Vereinigungsmenge von Verhaltensabschnitten bzw. Erhaltungsmassnahmen der Verbindungsabschnitte (Vereinigungsmenge von Vereinigungsklassen)

Massnahmen	Spezifikationen	Anwendungsbereich [$I_x^{min}; I_x^{max}$]									
		I1	IA1	IA2	IA3	IA4	IA5	I2	I3	I4	I5
1. Reparatur SN 640 731b											
1.1 Riss - Instandsetzung		0.4 - 1.2		1.1 - 2.2		1.1 - 2.2					
1.2 Flächenflick, kleine Einzelflächen		0.4 - 1.2		1.1 - 2.2		1.1 - 2.2					
1.3 Flächenflick, grosse Einzelflächen		0.6 - 1.4		1.1 - 2.2		1.1 - 2.2					
1.4 Grabenflicke Instand stellen		0.6 - 0.9					3.3 - 5.0				
1.5 Fugen RA ausgiessen											
2. Instandsetzung und Verstärkung SN 640 732a, 640 733b											
2.1 Oberflächenverbesserungen											
2.1.1 OB fein (Gehweg)		0.8 - 1.8		2.2 - 5.0		1.1 - 2.2				3.0 - 4.0	
2.1.2 OB grob		0.8 - 1.8		2.2 - 5.0		1.1 - 2.2				3.0 - 4.0	
2.1.3 OB doppelt		1.2 - 2.4		2.2 - 5.0	1.7 - 2.2	1.1 - 2.2				3.0 - 4.0	
2.1.4 OB Kunststoff		0.8 - 1.2		2.2 - 3.3						3.0 - 4.0	
2.2 Dünnschichtbelag											
2.2.1 Kaltmicro (DASK), 15 mm, ohne Vorfräsen		0.8 - 1.8		2.2 - 5.0							
2.2.2 Kaltmicro (DASK), 15 mm, mit Vorfräsen		1.2 - 2.4		2.2 - 5.0	1.7 - 2.2			2.0 - 3.0			
2.2.3 Heissmicro (ACVTL), 20 mm, ohne Vorfräsen		0.8 - 1.8		2.2 - 5.0							
2.2.4 Heissmicro (ACVTL), 20 mm, mit Vorfräsen		1.2 - 2.4		2.2 - 5.0	1.7 - 2.2			2.0 - 3.0			
2.3 Hocheinbau (Deckschicht)											
2.3.1 40 mm, ohne Vorfräsen		2.5 - 3.5	1.7 - 2.2	2.2 - 5.0	1.7 - 2.2	1.7 - 2.2	1.7 - 3.3	2.0 - 3.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	3.0 - 4.0
2.3.2 40 mm, mit Vorfräsen		2.5 - 3.5	1.7 - 2.2	2.2 - 5.0	1.7 - 5.0	1.7 - 2.2	1.7 - 3.3	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	3.0 - 4.0	3.0 - 4.0
2.3.3 40 mm, mit Vorfräsen und Asphaltbewehrung		2.5 - 3.5	1.7 - 2.2	2.2 - 5.0	1.7 - 5.0	1.7 - 3.3	2.2 - 5.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	3.0 - 4.0	3.0 - 4.0
2.4 Hocheinbau (Deck- und Binderschicht)											
2.4.1 100 mm, ohne Vorfräsen		3.0 - 4.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	1.7 - 3.3	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	2.5 - 3.5	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5
2.4.2 100 mm, mit Vorfräsen		3.0 - 4.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	1.7 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5
2.4.3 100 mm, mit Vorfräsen und Asphaltbewehrung		3.0 - 4.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	1.7 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5
2.5 Tiefeinbau (Deckschicht)											
2.5.1 20 mm (Gehweg)		3.0 - 4.0	1.7 - 2.2	2.2 - 5.0	0.6 - 1.7	1.7 - 3.3	1.1 - 3.3				
2.5.2 40 mm		3.0 - 4.0	1.7 - 5.0	2.2 - 5.0	2.2 - 5.0	1.7 - 3.3	1.1 - 3.3	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	3.0 - 4.0	
2.5.3 40 mm mit Asphaltbewehrung		3.0 - 4.0	1.7 - 5.0	2.2 - 5.0	2.2 - 5.0	1.7 - 5.0	1.7 - 5.0	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	3.0 - 4.0	2.0 - 3.0
2.6 Tiefeinbau (Deck- und Binderschicht)											
2.6.1 100 mm		3.5 - 4.5	2.2 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	2.2 - 5.0	2.2 - 5.0	3.0 - 4.0	3.5 - 4.5	3.0 - 4.0	2.0 - 3.0
2.6.2 100 mm mit Asphaltbewehrung		3.5 - 4.5	2.2 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.0 - 4.0	3.5 - 4.5	3.0 - 4.0	2.5 - 3.5
2.7 Spurrinnen - Instandsetzung (Fräsen, Belag)											
2.7.1 2 Radspuren (1 Fahrspur)		0.8 - 1.8			2.2 - 3.3					3.0 - 4.0	
2.7.2 4 Radspuren (2 Fahrspuren)		1.2 - 2.4			3.3 - 5.0					3.0 - 4.0	
3. Erneuerung SN 640 324a											
3.1 Gesamt - Erneuerungen											
3.1.1 200 mm (Deck-, Binder- und Tragschicht)		4.0 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5		
3.1.2 250 mm (Foundation AC F, Deck- und Tragschicht)		4.0 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5		4.0 - 5.0
3.1.3 400 mm (300 mm Foundation Kiessand)		4.0 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5		4.0 - 5.0
3.1.4 600 mm (400 mm Foundation Kiessand)		4.0 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5		4.0 - 5.0
3.2 Bankett - Erneuerungen											
3.2.1 Einseitig, ohne Belagerneuerung		0.8 - 1.8				1.7 - 3.3				2.0 - 3.0	3.0 - 4.0
3.2.2 Einseitig, mit Belagerneuerung (Hocheinbau)		2.0 - 3.0	1.1 - 3.3	1.1 - 3.3	1.1 - 3.3	1.7 - 3.3			2.5 - 3.5		3.0 - 4.0
3.2.3 Beidseitig, ohne Belagerneuerung		1.2 - 2.4				2.2 - 5.0			2.5 - 3.5		3.0 - 4.0
3.2.4 Beidseitig, mit Belagerneuerung (Hocheinbau)		3.0 - 4.0	1.7 - 5.0	1.7 - 5.0	1.7 - 5.0	2.2 - 5.0			3.0 - 4.0		3.0 - 4.0
3.3 Recyclingverfahren											
3.3.1 200 mm KMF, 15 mm Kaltmicrobelag		4.0 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5		4.0 - 5.0
3.3.2 250 mm KMF, 40 mm Deckschicht		4.0 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5		4.0 - 5.0
3.3.3 300 mm KMF, 100 mm Deck- und Tragschicht		4.0 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.3 - 5.0	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5		4.0 - 5.0

= Hauptauslösende(s) Merkmal(e) Ix

kursiv = Der I1 als alleinige Grundlage für eine Massnahmenplanung ist ungenügend!
Es sind mindestens noch die Gruppenwerte, bzw. die Teilindizes, oder weitere Angaben / Indizes notwendig

1) = Oberflächenbehandlungen und Dünnschichtbeläge sind bei starkem Schwitzen ungeeignet (Massnahme mit Fräsen und Walzassphalt wählen)

Feld leer = Massnahme ungeeignet für Schadensmerkmal in der jeweiligen Spalte

Bild 33: Anwendungsbereiche $[I_x^{min}(m_i^x); I_x^{max}(m_i^x)]$ der Massnahmen m_i^x des Katalogs der Standardisierten Erhaltungsmassnahmen (Gnehm 2008)

Massnahmen	Spezifikationen	Rücksetzwert (In Bezug auf Indizes) $\Delta I_x(m_i^x)$										Wirkung				
		I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	Verhaltensklasse	relativ	absolut		
		IA1	IA2	IA3	IA4	IA5	IA6	IA7	IA8	IA9	IA10					
1. Reparatur SN 640 731b																
1.1	Riss - Instandsetzung	-0.4		-0.5		-0.5										+/- 0
1.2	Flächenflick, kleine Einzelflächen	-0.4	0.0			-0.5	0.6									+/- 0
1.3	Flächenflick, grosse Einzelflächen	-0.4		0.0		-0.5	1.7									+/- 0
1.4	Grabenflicke Instand stellen	-0.4					-2.2	-0.5	-0.5				-0.5			+/- 0
1.5	Fugen RA ausgiessen															+/- 0
2. Instandsetzung und Verstärkung SN 640 732a, 640 733b																
2.1 Oberflächenverbesserungen																
2.1.1	OB fein (Gehweg)	-0.4	0.0	0.0		-0.5	-0.5					0.0				+/- 0
2.1.2	OB grob	-0.6	0.0	0.0		-0.5	-0.5					0.0				+/- 0
2.1.3	OB doppelt	-0.6	0.0	0.0	-1.6	-0.5	0.0			-1.0	0.0					+/- 0
2.1.4	OB Kunststoff	-0.4	0.0	0.0		-0.5	-0.5					0.0				+/- 0
2.2 Dünnschichtbelag																
2.2.1	Kaltmicro (DASK), 15 mm, ohne Vorfräsen	-0.6	0.0	0.0		-1.1	-0.5									+/- 0
2.2.2	Kaltmicro (DASK), 15 mm, mit Vorfräsen	-1.2	0.0	0.0	0.0	-1.1	0.0	1.5	1.0							+/- 0
2.2.3	Heissmicro (ACVTL), 20 mm, ohne Vorfräsen	-1.2	0.0	0.0	-0.6	-1.1	-1.1	-1.0	-1.0							+/- 0
2.2.4	Heissmicro (ACVTL), 20 mm, mit Vorfräsen	-1.8	0.0	0.0	0.0	-1.1	0.0	1.0	0.5							+/- 0
2.3 Hocheinbau (Deckschicht)																
2.3.1	40 mm, ohne Vorfräsen	0.2	0.0	0.0	0.0	-1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0					- 1
2.3.2	40 mm, mit Vorfräsen	0.2	0.0	0.0	0.0	-1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0					- 1
2.3.3	40 mm, mit Vorfräsen und Asphaltbewehrung	0.2	0.0	0.0	0.0	-1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0					- 1
2.4 Hocheinbau (Deck- und Binderschicht)																
2.4.1	100 mm, ohne Vorfräsen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0					- 2
2.4.2	100 mm, mit Vorfräsen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0					- 2
2.4.3	100 mm, mit Vorfräsen und Asphaltbewehrung	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0					- 2
2.5 Tiefeinbau (Deckschicht)																
2.5.1	20 mm (Gehweg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					+/- 0
2.5.2	40 mm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					+/- 0
2.5.3	40 mm mit Asphaltbewehrung	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					+/- 0
2.6 Tiefeinbau (Deck- und Binderschicht)																
2.6.1	100 mm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					- 1
2.6.2	100 mm mit Asphaltbewehrung	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					- 1
2.7 Spurrinnen - Instandsetzung (Fräsen, Belag)																
2.7.1	2 Radspuren (1 Fahrspur)	-1.2	-0.5	-0.5	-3.3					1.0						+/- 0
2.7.2	4 Radspuren (2 Fahrspuren)	-1.8	-1.1	-1.1	0.0					1.0						+/- 0
3. Erneuerung SN 640 324a																
3.1 Gesamt - Erneuerungen																
3.1.1	200 mm (Deck-, Binder- und Tragschicht)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					1
3.1.2	250 mm (Fundation AC F, Deck- und Tragschicht)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					1
3.1.3	400 mm (300 mm Fundation Kiessand)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					1
3.1.4	600 mm (400 mm Fundation Kiessand)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					1
3.2 Bankett - Erneuerungen																
3.2.1	Einseitig, ohne Belagerneuerung	-1.2				0.0		-0.5	-1.0		-1.0					+/- 0
3.2.2	Einseitig, mit Belagerneuerung (Hocheinbau)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					- 1
3.2.3	Beidseitig, ohne Belagerneuerung	-1.8				0.0		-0.5	-1.0		-1.0					+/- 0
3.2.4	Beidseitig, mit Belagerneuerung (Hocheinbau)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					- 1
3.3 Recyclingverfahren																
3.3.1	200 mm KMF, 15 mm Kaltmicrobelag	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					1
3.3.2	250 mm KMF, 40 mm Deckschicht	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					1
3.3.3	300 mm KMF, 100 mm Deck- und Tragschicht	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					1

Wert mit Vorzeichen:
Veränderung des Zustandes gegenüber dem Ausgangswert (relativ)

Wert ohne Vorzeichen:
Zustandswert nach Ausführung der Massnahme (absolut)

Kein Wert:
Keinen oder nur sehr geringen Einfluss

Bild 34: Rücksetzwerte $\Delta I_x(m_i^x)$ der Massnahmen m_i^x des Katalogs der Standardisierten Erhaltungsmassnahmen (Gnehm 2008)

4.3. Definition der Optimal- und Alternativvariante

Als Grundlage für den Wirtschaftlichkeitsvergleich müssen zunächst die zu vergleichenden Varianten, d.h. die Optimal- und Alternativvariante definiert werden. Bezüglich des Inhalts der Untersuchung können zwei Fälle unterschieden werden:

- Optimalvariante - Vergleich verschiedener Erhaltungsstrategien bzw. Erhaltungsvarianten, die z.B. mittels Entscheidungsbaumverfahren (Bild 28) entwickelt wurden zur Entwicklung der Optimalvariante $\chi^{opt} = \chi^{Basis}$ einer Strategie Γ
- Alternativvariante - Zusatzkostenberechnung für eine Verschiebungsalternative (Alternativvariante) $\tilde{\chi}$ gegenüber einer gewählten Basisvariante χ^{Basis} .

Beide Fälle lassen sich mit den entwickelten Modellen betrachten, wobei allerdings der Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit auf der Zusatzkostenberechnung liegt.

Soll für eine festgelegte Erhaltungsstrategie Γ die optimale lebenszyklusorientierte Erhaltungsvariante χ ermittelt werden, so hat man zwei grundsätzlich identische Möglichkeiten:

- Fall 1 – bestehende Basisvariante
Die Erhaltungsvarianten χ_i , die mittels Entscheidungsbaumverfahren entwickelt wurden, werden nach dem Kriterium des „Ökonomischen Minimalprinzips“ mittels Simulationen mit der bestehenden Basisvariante verglichen.
- Fall 2 – keine Basisvariante vorhanden
Die Erhaltungsvarianten χ_i werden wie im Fall 1 gebildet. Die Optimalvariante χ^{opt} , die dann als Basisvariante χ^{Basis} bezeichnet werden kann, wird mittels Simulationsmethoden nach den Kriterien des „Ökonomischen Minimalprinzips“ ermittelt.

Das „Ökonomische Minimalprinzip“ wird hier angewendet, da der Nutzen definiert ist.

Im Fall der Zusatzkostenberechnung entspricht die Basisvariante der ursprünglich ermittelten (optimalen) Erhaltungsvariante χ^{opt} des Strassenbetreibers. Der Basisvariante wird dann die Alternativvariante $\tilde{\chi}$, die Verschiebungen einzelner oder mehrerer Massnahmen enthält, gegenübergestellt.

Unabhängig vom Ziel der Untersuchung gilt für alle zu vergleichenden Varianten, dass ein einheitlicher Betrachtungszeitraum gewählt werden muss, der eine sinnvolle Systemabgrenzung ermöglicht. Auch bei der Definition des Betrachtungszeitraums müssen die beiden oben beschriebenen Fälle unterschieden werden. Eine Zusatzkostenberechnung auf Grund der Verschiebung einer Massnahme kann bei entsprechender Systemabgrenzung auch über lediglich den durch die Verschiebung beeinflussten Betrachtungszeitraum erfolgen um die Auswirkungen der Zusatzkosten zu ermitteln, während eine Untersuchung verschiedener Erhaltungsvarianten χ_i einer Erhaltungsstrategie Γ stets eine langfristige, lebenszyklusorientierte Betrachtung erfordert.

4.3.1. Grundsätze für die Definition der Optimal- und Alternativvariante für die Zusatzkostenberechnung

Bei der Berechnung der Zusatzkosten aus der Verschiebung einer oder mehrerer Massnahmen spielen die Definition des Betrachtungszeitraums und die Systemabgrenzung eine entscheidende Rolle. Insbesondere dann, wenn die Untersuchung relativ kurze Betrachtungszeiträume umfasst, spielen Abgrenzungseffekte eine entsprechend grosse Rolle bei der Bewertung der einzelnen Varianten. Theoretisch sollten derartige Verfälschungen von der Systemabgrenzung komplett verhindert werden, da diese jedoch immer gewisse Annahmen und Näherungen enthält, ist dies in der praktischen Anwendung jedoch nicht zu 100% gegeben.

Für die Definition der Optimal- und Alternativvariante sowie die Wahl des Betrachtungszeitraums sollten daher die folgenden Grundsätze beachtet werden:

- Der Anfangszeitpunkt der Betrachtung muss bei allen Varianten gleich sein, da nur dann für ein bestehendes System identische Bedingungen vorliegen.
- Der Endzeitpunkt muss für alle Varianten gleich gewählt werden.
- Im Endzeitpunkt sind jedoch die Bedingungen infolge unterschiedlicher Erhaltungsmassnahmen meist nicht identisch. Diese Unterschiede im Endzeitpunkt müssen in der Systemabgrenzung entweder durch variantenspezifische Massnahmen ausgeglichen werden, so dass das selbe Qualitätsniveau vorliegt oder die Unterschiede müssen monetär bewertet und auf diese Weise ausgeglichen werden.

Der Betrachtungszeitraum beginnt mit dem Zeitpunkt an dem die geplante Massnahme m_i^x erfolgen sollte.

- Verschieben:
Bei einer Verschiebung auf einen späteren Zeitpunkt muss das Betrachtungsintervall so gewählt werden, dass
 - a) die Verschiebung sowie die Wirkungszeitspanne der Verschiebungsmassnahme enthalten ist, die dann die gleiche Nachfolgemassnahme erfordert, die in der Basisvariante vorgesehen war (nur jetzt zeitlich verschoben)
 - b) die Verschiebung sowie die Wirkungszeitspanne der Verschiebungsmassnahme eingeschlossen werden – falls diese von der Basisvariante abweichen – bis die ursprünglich gewählten Massnahmen der Basisvariante fortgesetzt werden können.
- Vorziehen:
Bei einer Verschiebung auf einen früheren Zeitpunkt muss der Betrachtungsbeginn auf den Beginn der Massnahme gelegt werden, deren Nutzungsende nicht aufgebraucht wird und frühzeitig instandgesetzt wird, obwohl der Massnahmengrenzindex der gewählten Strategie nicht erreicht wurde. Das Ende des jeweiligen Betrachtungszeitraums ist analog zur Verschiebung auf einen späteren Zeitpunkt in zwei Gruppen a) und b) zu untergliedern.

Definition des Einflussbereichs einer Massnahme

Der Einflussbereich bzw. die Wirkungszeitspanne einer Massnahme m_i^x entspricht dem Zeitraum, in dem die Massnahme zu einer Verbesserung des Strassenzustands im Vergleich zum Zeitpunkt vor der Massnahme führt. Das heisst er erstreckt sich vom Zeitpunkt der Ausführung der Massnahme bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Strassenzustand wieder den Zustandsgrenzwert $I_x^{Grenz,\Gamma}$ bzw. $GW^{Grenz,\Gamma}$ erreicht hat, der in der gewählten Erhaltungsstrategie Γ festgelegt wurde. Da eine Erhaltungsmassnahme m_i^x auf die verschiedenen Zustandsindizes I_x unterschiedliche Einflüsse haben kann und ausserdem die Entwicklung des Strassenzustands in den einzelnen Indizes unterschiedlich verläuft, wird auch der Strassenzustand nicht in allen Indizes gleichzeitig in der folgenden Wirkungszeitspanne vom Massnahmenzeitpunkt bis zum Erreichen eines erneuten Grenzzustands das Niveau vor der Massnahme erreichen. Eine Alternative zur singulären Zustandsentwicklung mittels Zustandsindizes I_x stellt der in Kapitel 3.2.1.2 vorgestellte Gebrauchswert $GW_{A2/B2}(t)$ dar, der sich aus der holistischen Bewertung der Einzelzustandsindizes zusammensetzt. Daher kann der Gebrauchswert ($GW_{A2/B2}(t)$) als Kriterium für die Definition des Einflussbereichs - der Wirkungszeitspanne einer Massnahme - herangezogen werden. Das Ende des Einflussbereichs einer Massnahme ist demnach dann erreicht, wenn der Gebrauchswert ($GW_{A2/B2}(t)$) wieder das Niveau des Gebrauchswerts ($GW_{A2/B2}^{Grenz,\Gamma}(t)$), das in der Erhaltungsstrategie festgelegt wurde, erreicht hat. (Bild 35).

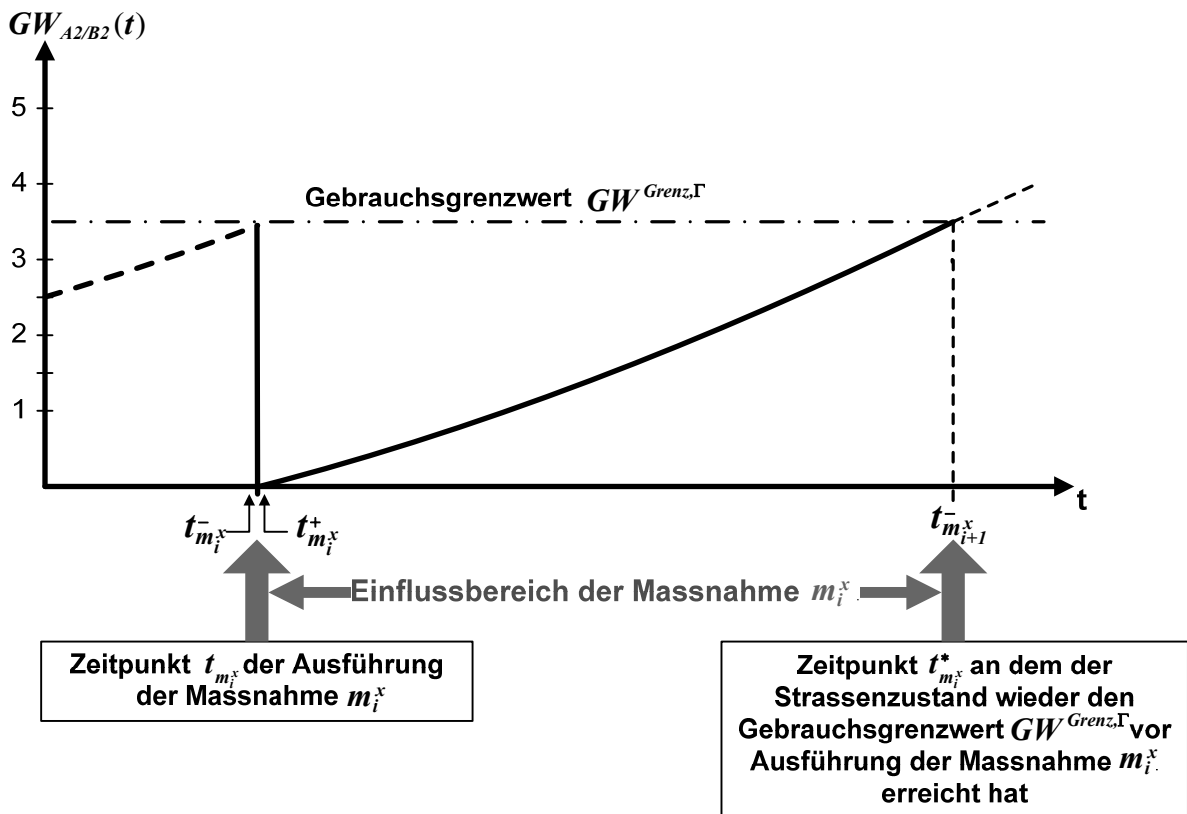


Bild 35: Definition des Einflussbereichs einer Massnahme m_i^x

4.3.2. Definition des Betrachtungszeitraums für eine Zusatzkostenberechnung

Eine Berechnung der Zusatzkosten aus der Verschiebung einer oder mehrerer Massnahmen kann auf zwei Arten erfolgen:

- **Genauere Methode:**

Lebenszyklusorientiert, über einen langen Betrachtungszeitraum (ca. 30-50 Jahre).

In diesem Fall werden die langfristigen Auswirkungen einer Verschiebung ab dem Verschiebungszeitpunkt im Betrachtungszeitraum abgebildet und in die Berechnung einbezogen. Die genaue Methode sollte dann angewendet werden, wenn die Folgemassnahmen nach der Verschiebung kosten- und zeitmässig stark von der Basiserhaltungsvariante χ abweichen und eine Alternativvariante $\tilde{\chi}$ für die weitere Zukunft erstellt werden muss.

- **Vereinfachte Methode**

Kurzfristig über einen Betrachtungszeitraum von ca. zwei Wirkungsbereichen von Massnahmen (Bild 36) unter Einbezug der direkten Auswirkungen der Verschiebung. Die langfristigen Konsequenzen werden nicht berücksichtigt. Die Näherungsmethode ist dann ungenau bzw. nur begrenzt anwendbar, wenn in der Folge die Massnahmen kostenmässig und zeitmässig stark von der Basisvariante χ abweichen.

Eine umfassende realistische Betrachtung erhält man mit der lebenszyklusorientierten Betrachtung unter Einbezug einer grossen Anzahl von Massnahmen sowie deren kompletter Wirkungszeitspanne. Daher ist diese Variante der Betrachtung der vereinfachten Betrachtung eines kurzen Zeitraums klar vorzuziehen. Die vereinfachte Betrachtung kann in der praktischen Anwendung Sinn machen, wenn eine Abschätzung der Kosten einer Verschiebung vorgenommen werden soll, ohne dass dabei eine lebenszyklusorientierte Strategie- und Variantenplanung erfolgen soll. Die langfristigen Konsequenzen einer Verschiebung lassen sich hier aber nicht erkennen.

Bei der **genauen Methode** für die lebenszyklusorientierte Betrachtung (Bild 18) gelten dieselben Grundsätze zur Definition des Betrachtungszeitraums wie beim Vergleich verschiedener Erhaltungsstrategien bzw. Erhaltungsvarianten (siehe Kapitel 4.3.3).

Bei der **Näherungsmethode** wird eine vereinfachte Betrachtung durchgeführt. Dabei müssen jedoch zusätzliche Anforderungen an die Wahl des Anfangs- und Endzeitpunkts beachtet werden um sicherzustellen, dass trotz der Einschränkung des Betrachtungszeitraums ein in sich geschlossener sinnvoller zeitlicher Abschnitt aus der Lebenszyklus der Strasse betrachtet wird, in dem die direkten Auswirkungen der Verschiebung abgebildet werden können.

Für den Anfangszeitpunkt und Endzeitpunkt der Näherungsmethode bedeutet dies (Bild 36):

Fall 1 - Verschiebung auf einen früheren Zeitpunkt:

- Bei einer Verschiebung auf einen früheren Zeitpunkt, muss der Betrachtungsbeginn auf den Beginn der vorgezogenen Massnahme gelegt werden, d.h. die Verschiebungsalternative wird für den Anfangszeitpunkt massgebend. Bei der vorausgegangenen Massnahme wird in diesem Fall das Ende des Einflussbereichs nicht erreicht, da frühzeitig in standgesetzt wird, obwohl die Eingreifgrenze der gewählten Strategie nicht erreicht wurde (Bild 36).

- Für den Endzeitpunkt wird die Basisvariante massgebend. Der Betrachtungszeitraum endet nach der Ausführung der ersten Folgemassnahme, die auf die betrachtete Massnahme m_i^x in der Basisvariante folgt (Bild 36).

Fall 2 - Verschiebung auf einen späteren Zeitpunkt:

- Bei einer Verschiebung der geplanten Massnahme auf einen späteren Zeitpunkt beginnt der Betrachtungszeitraum mit dem Zeitpunkt an dem die geplante Massnahme m_i^x erfolgen sollte. D.h. es ist die Basisvariante ausschlaggebend für den Anfangszeitpunkt, der unmittelbar vor Ausführung der betrachteten Massnahme m_i^x gewählt wird (Bild 36).
- Das Ende des Betrachtungsintervalls muss so gewählt werden, dass die Verschiebung sowie der Einflussbereich der verschobenen Massnahme enthalten ist. In diesem Fall wird also die Verschiebungsalternative für den Endzeitpunkt massgebend. Nach Ende des Einflussbereichs der verschobenen Massnahme ist eine gleiche Nachfolgemassnahme wie sie in der Basisvariante eingeplant war einzuplanen, nur jetzt zeitlich verschoben. Der Betrachtungszeitraum endet also nach der ersten Folgemassnahme in der Verschiebungsalternative (Bild 36).

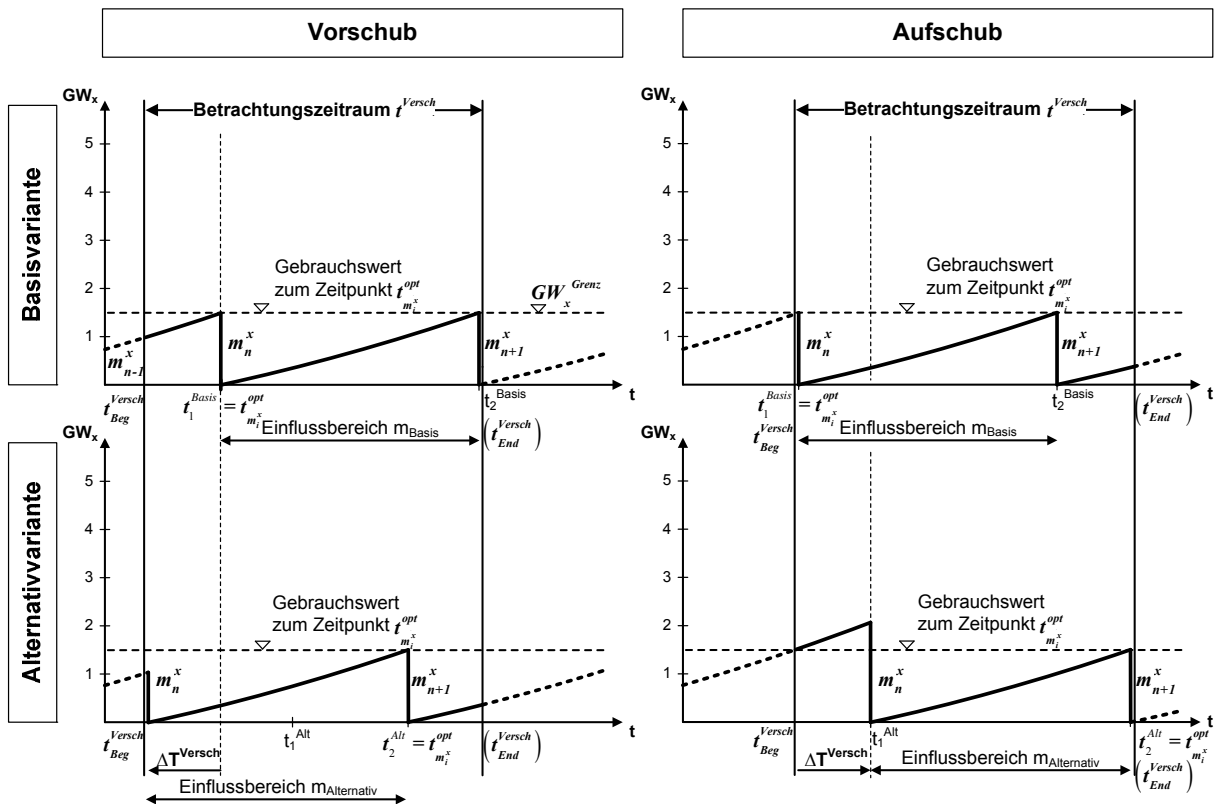


Bild 36: Näherungsmethode - Prinzipielle Definition des Betrachtungszeitraums der Basisvariante und Verschiebungsalternative bei einem Vor- oder Aufschub einer Massnahme

Bei der Zusatzkostenberechnung werden in der Basisvariante χ die betrachteten Massnahmen immer zum optimalen Zeitpunkt eingeplant, die Alternativvariante $\tilde{\chi}$ bildet die Verschiebung einer oder mehrerer Massnahme ab. Der optimale Zeitpunkt einer Massnahme ist

abhängig vom Strassenzustand und dessen Entwicklung. Er ist dann gegeben, wenn die Massnahme ein maximales Nutzen/Kosten-Verhältnis aufweist, d.h. wenn das Verhältnis von Massnahmekosten zu dem durch die Verbesserung des Strassenzustands erzielten Nutzen optimal wird.

Im Teilprojekt 4 (VSS 2004/714) werden die Kostenansätze bei einer Verschlechterung des Strassenzustands für folgende Stakeholder

- Betreiber,
- Nutzer und
- Dritte

in Abhängigkeit vom Strassenzustand in den Zustandsindizes I_x ermittelt. (Lücking, Herrmann et al. 2008)

4.3.3. Definition des LC-Betrachtungszeitraums für einen Vergleich verschiedener Erhaltungsstrategien bzw. Erhaltungsvarianten

Der Vergleich verschiedener Erhaltungsstrategien Γ bzw. aus einer Erhaltungsstrategie abgeleiteter Erhaltungsvarianten χ erfolgt stets lebenszyklusorientiert über lange Betrachtungszeiträume. Wie in Kapitel 3.2.3 ausgeführt, ist eine komplette Lebenszyklusbetrachtung einer bestehenden Strasse zumeist nicht möglich. In dieser Forschungsarbeit werden fokussiert Strassen betrachtet, die bereits bestehen. Damit ist der Neubau und die Neubaukosten nicht Teil der Untersuchung. Auch das Ende des Lebenszyklus einer Strasse, d.h. deren Rückbau ist meist nicht absehbar, da Strassen üblicherweise durch Erhaltungsmassnahmen oder Teilerneuerungen über sehr lange Zeiträume erhalten werden. Die Erstellungskosten sowie der Rückbau können aber in dem entwickelten Entscheidungsmodell zur Gesamtoptimierung einfach ergänzt werden (siehe hierzu analog (Girmscheid 2006b)).

Ziel der Untersuchung ist also lebenszyklusorientiert einen möglichst langen Ausschnitt aus dem gesamten Lebenszyklus einer bestehenden Strasse zu betrachten und damit sämtliche auch langfristige Einflüsse des Erhaltungsmanagements und der zu vergleichenden Strategien abzubilden. Theoretisch kann der Betrachtungszeitraum für einen Vergleich verschiedener Erhaltungsstrategien beliebig lang ausgedehnt werden. In der praktischen Umsetzung wird für dynamische Wirtschaftlichkeitsvergleiche jedoch meist eine maximale Länge des Betrachtungszeitraums von 30 bis 60 Jahren empfohlen. Darüber hinausgehende Planungen enthalten zumeist sehr grosse Unsicherheiten hinsichtlich der Verkehrsentwicklung und der anfallenden Kosten, sowie der Kostenentwicklung. Ausserdem reduziert sich der Einfluss der Kosten, die am Ende des Betrachtungszeitraums anfallen, aufgrund der Diskontierung mit zunehmender Länge des Betrachtungszeitraums, so dass deren Einfluss bei langen Betrachtungszeiträumen sehr gering wird. Eine weitere Verlängerung des Betrachtungszeitraums bringt dann kaum noch relevanten Input in die Kosten-Barwert-Berechnung.

5. LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell – Finanzielle Bewertung der Erhaltungsvarianten

Das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell basiert auf dem von Girmscheid (Girmscheid 2007b) entwickelten „Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Erhaltungsstrategien für Strassennetze“. Das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungsmodell dient als Grundlage für die finanzielle Bewertung zuvor definierter Erhaltungsvarianten innerhalb einer gewählten Erhaltungsstrategie und bildet daher die Grundlage für die Berechnung der Zusatzkosten, die sich durch Veränderungen an der Massnahmenplanung ergeben. Die Bewertung erfolgt auf der Grundlage einer Kostenbetrachtung, d.h. es wird der Werteverzehr bei den einzelnen Stakeholdergruppen bewertet (siehe Kapitel 3.2.1.4). Entscheidungskriterium zwischen den verschiedenen Erhaltungsvarianten ist der Kosten-Barwert der Erhaltungsvarianten, d.h. die diskontierte Summe der einzelnen Kostenanteile über den Betrachtungszeitraum.

Gemäss der Modelldefinition (siehe Kapitel 3.2.1.5) werden beim LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell nicht die Gesamtkosten einer Erhaltungsvariante berechnet, sondern nur die vom Strassenzustand beeinflussten bzw. durch Erhaltungsmassnahmen hervorgerufenen Kostenanteile betrachtet. Die konstanten Grundkosten des Strassenunterhalts, die immer in gleicher Höhe anfallen, können beim Vergleich verschiedener Erhaltungsvarianten vernachlässigt werden (siehe Bild 37). Es werden also nur

- die direkten Kosten der Erhaltungsmassnahmen K_t^{Massn, m_i^x} sowie
- die erhöhten Kosten infolge schlechten Strassenzustands ΔK_t oberhalb der Grundkosten

berücksichtigt. Als Referenz für die nicht betrachteten Grundkosten dienen die Kosten, die beim Betrieb einer Strasse im „quasi“ Neuzustand für die Stakeholdergruppen anfallen. Die Bandbreite dieses Neuzustandes liegt zwischen $I_x = 0$ und $I_x = I_x^{Grenz\ N/B/D}$ und ist dadurch gekennzeichnet, dass trotz der messbaren Veränderung der Strassenoberfläche, weder für den Betreiber, noch für die Nutzer oder Dritte messbare zusätzliche Kosten anfallen. Erst wenn der Zustand $I_x > I_x^{Grenz\ N/B/D}$ erreicht ist, erhöhen sich die Kosten für den Betreiber, die Nutzer oder Dritte (Bild 37).

Im Folgenden wird in den Formeln zur Kostenberechnung der verschiedenen Stakeholder die allgemein gültige Bezeichnung $K_t^{i, B/N/D}$ verwendet. Wie oben erläutert kann dies in den meisten Anwendungen jedoch durch Einsetzen nur der erhöhten Kosten $\Delta K_t^{i, B/N/D} = K_t^{i, B/N/D} - K_{const}^{i, B/N/D}$ vereinfacht werden.

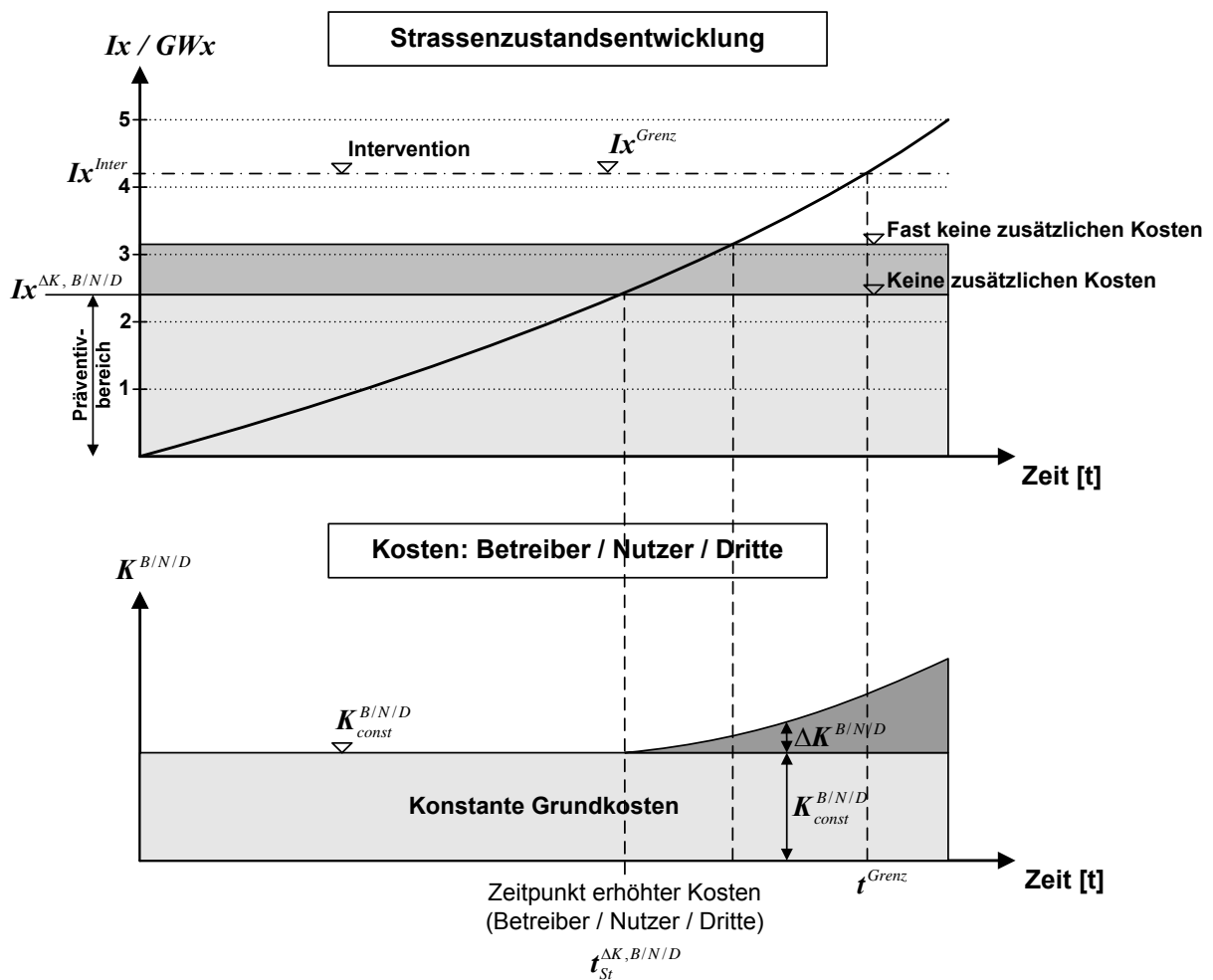


Bild 37: Strassenzustandsentwicklung und Kosteninteraktionen des Betreibers / der Nutzer / Dritter

5.1. Berechnung der Kostenanteile in Abhängigkeit vom Strassenzustand

Mit Ausnahme der direkten Massnahmekosten hängen sämtliche Kostenanteile der verschiedenen Stakeholdergruppen in ihrer Höhe vom Strassenzustand ab. Eine Veränderung des Strassenzustands über einem Indexwert $I_x = I_x^{\Delta K, B/N/D}$, führt daher auch zu einer Veränderung dieser Kostenanteile. Da sich der Strassenzustand zwar ständig verändert, die Veränderungen über ein Jahr gesehen aber relativ gering sind, kann für die einzelnen Jahre vereinfachend der Mittelwert des Strassenzustands I_x^{\varnothing} z.B. pro Jahr für die Berechnung der Höhe der vom Strassenzustand abhängigen Kostenanteile verwendet werden.

Zu beachten ist allerdings, dass in den Jahren, in denen eine Erhaltungsmassnahme durchgeführt wird, zwischen dem Zeitraum vor der Massnahme und dem nach der Massnahme differenziert werden sollte, da sich der Strassenzustand dann sprunghaft verändert und somit eine Mittelwertbildung zu ungenauen Ergebnissen liefern würde (Bild 38).

Die erhöhten Kosten der jeweiligen Stakeholdergruppe (Betreiber / Nutzer / Dritte) der Kostengruppe j im Jahr t werden dann wie folgt berechnet:

$$\Delta K_t^{B/N/D, \text{Betrieb}, j}(I x_t) = \frac{K_{t^-}^{B/N/D, \text{Betrieb}, j}(I x_{t^-}^\emptyset) \cdot T^- + K_{t^+}^{B/N/D, \text{Betrieb}, j}(I x_{t^+}^\emptyset) \cdot T^+}{365 - \Delta T^{\text{Massn}}} - K_t^{B/N/D, \text{Betrieb}, j, \text{const}} \quad (16)$$

mit:	$K_{t^-/+}^{B/N/D, \text{Betrieb}, j}(I x_{t^-/+}^\emptyset) =$	Kosten der Stakeholdergruppe Betreiber / Nutzer / Dritte der Kostengruppe j vor (-) bzw. nach (+) der Erhaltungsmassnahme im Jahr t
	$K_t^{B/N/D, \text{Betrieb}, j, \text{const}} =$	Konstanter Anteil der Kosten der Stakeholdergruppe Betreiber / Nutzer / Dritte der Kostengruppe j im Jahr t
	$I x_{t^-}^\emptyset$ bzw. $I x_{t^+}^\emptyset =$	Durchschnittlicher Strassenzustand im Zeitraum T^- vor der Massnahme bzw. T^+ nach der Massnahme im Jahr t
	T^- bzw. $T^+ =$	Zeitraum im Jahr t vor (-) bzw. nach (+) der Massnahme in Tagen es gilt: $T^- + T^+ = 365 - T$
	$\Delta T^{\text{Massn}} =$	Zeitraum der Massnahmendurchführung
	$j =$	{ j j = Erhöhter Unterhalt v Reisezeitverlängerung v Erhöhte Fahrzeugsbetriebskosten v Erhöhte Unfallkosten v Erhöhte Umweltkosten }

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, wird im Folgenden bei der Kosten-Barwert-Berechnung die allgemeine Bezeichnung $K_t^{i, B/N/D}$ für die Kosten der einzelnen Stakeholder verwendet. Für $K_t^{i, B/N/D}$ können entweder die gesamten Stakeholderkosten oder vereinfachend lediglich die erhöhten Kosten $\Delta K_t^{i, B/N/D}$ eingesetzt werden.

Bei Massnahmen, die nur einen kurzen Zeitraum umfassen, kann vereinfachend der Zeitraum ΔT^{Massn} , in dem die Massnahme durchgeführt wird, zum Zeitraum T^- vor der Massnahme gezählt werden. Bei längerfristigen Massnahmen müssen die Kosten während der Massnahme gesondert betrachtet werden. In diesem Fall werden für den Zeitraum ΔT^{Massn} , in dem die Massnahme durchgeführt wird, die Kosten separat berechnet, da in diesem Fall nicht nur der Strassenzustand, sondern auch baustellenbedingte Einschränkungen des Verkehrs oder Emissionen zu zusätzlichen Kosten führen.

Kosten und erhöhten Kosten der Massnahmen und während der Massnahmen (besonders bei langwierigen Massnahmen über mehrere Monate):

Betreiber-Massnahmenkosten:

$$K_{t^-/+}^{B, \text{Massn}} = \text{Planungs- Bau- und Verkehrsführungskosten des Betreibers}$$

Erhöhte Kosten der Betreiber, Nutzer und Dritten während der Massnahme:

$K_{t^{-/+}}^{B,Betrieb}$ = Zusätzliche Polizeieinsätze / zusätzliche Kosten des Betreibers während der Massnahme

$K_{t^{-/+}}^{N/D,Betrieb}$ = Staukosten / Unfallkosten etc. während der Massnahme

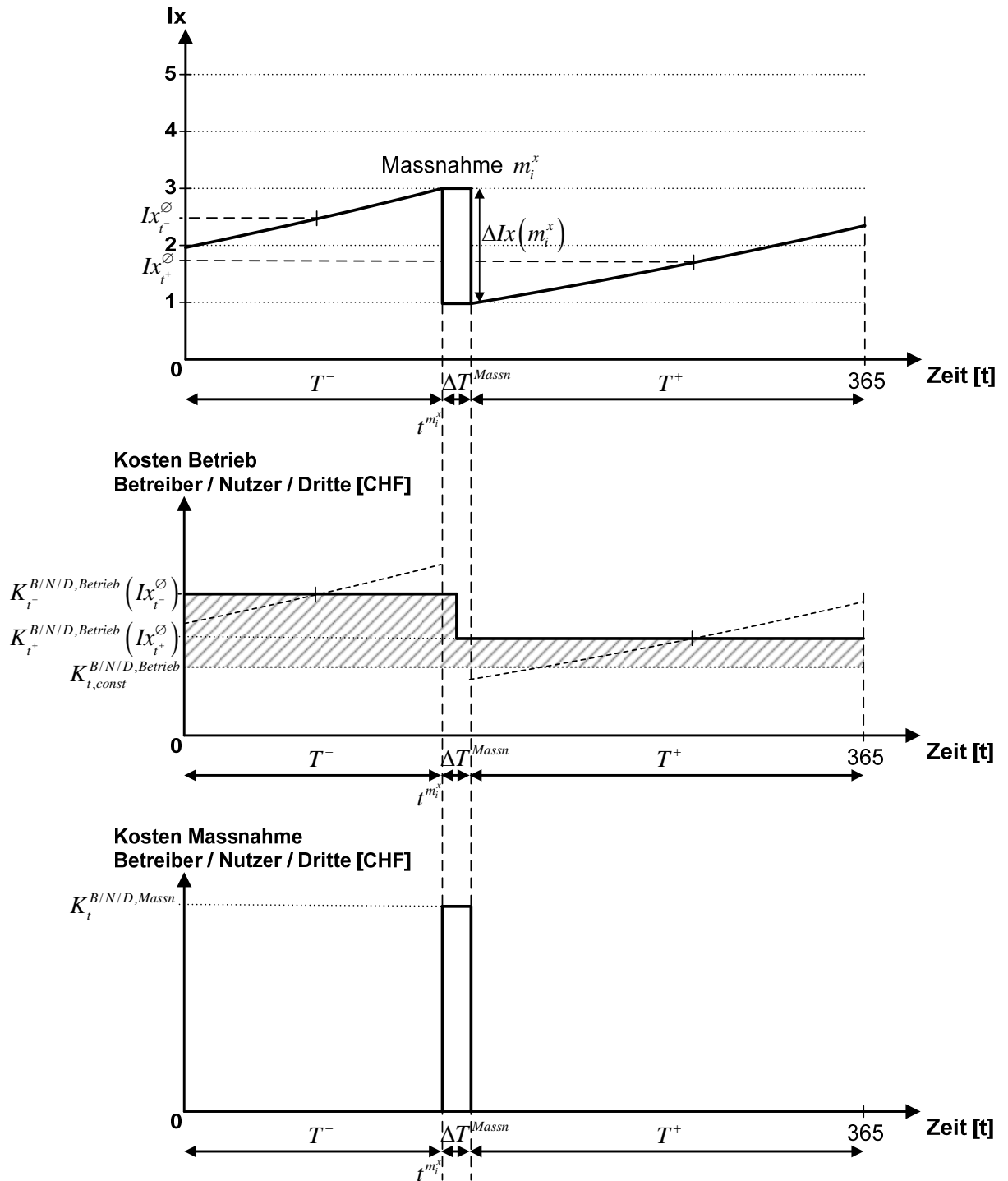


Bild 38: Kosten vor und während der Massnahme - Einteilung des mittleren Strassenzustands eines Jahres sowie die daraus resultierenden Kosten in die Abschnitte vor, während und nach einer Erhaltungsmaßnahme (Girmscheid 2007b)

Werden in einem Jahr zwei oder mehr Massnahmen durchgeführt, so erfolgt die Berechnung der vom Strassenzustand abhängigen Kosten analog zum hier vorgestellten Vorgehen bei einer Massnahme. Es werden dann drei oder mehr mittlere Strassenzustände entsprechend dem zugeordneten Zeitraum gewichtet.

5.2. Kostenanteile der Stakeholdergruppen

In die Berechnung des Kosten-Barwerts einer Erhaltungsvariante werden die Kosten aller für den Strassenunterhalt relevanter Stakeholdergruppen einbezogen. Das heisst, es werden die Kosten der folgenden Kostenträger berücksichtigt:

- Strassenbetreiber
- Nutzer
- Dritte

Bei allen drei Stakeholdergruppen muss unterschieden werden in (Bild 39):

- Kosten im laufenden Betrieb (keine Massnahme)
- Kosten während einer Massnahme

Vor oder nach der Massnahme werden die Kostenanteile ausschliesslich durch den Fahrbahnzustand und die sich daraus ergebenden Einschränkungen bzw. zusätzlichen Belastungen beeinflusst. Während der Massnahme fallen für den Betreiber die direkten Kosten der Massnahme an, für die anderen Stakeholder entstehen Kosten durch die Verkehrseinschränkungen und zusätzliche Umweltbelastungen während der Bauzeit.

Daraus ergibt sich die folgende Struktur der zu berücksichtigenden Kostengruppen der drei Stakeholdergruppen (Kostenträger):

- Kostenträger Strassenbetreiber
 - Kostengruppe – Erhaltungsmassnahmen
 - Kostengruppe – Erhöhter Erhaltungsaufwand
- Kostenträger Strassenutzer
 - Kostengruppe – Reisezeitverlängerung
 - Kostengruppe – Erhöhte Fahrzeugbetriebskosten
 - Kostengruppe – Erhöhte Unfallkosten
- Kostenträger Dritte
 - Kostengruppe – Erhöhte Umweltkosten
 - Kostengruppe – Erhöhte Unfallkosten

Die Ansätze für die einzelnen Kostenanteile wurden in den Verbundforschungsprojekten

- Einzelprojekt 1 – VSS2004/710: Standardisierte Erhaltungsmassnahmen sowie im

- Einzelprojekt 4 – VSS2004/714: Gesamtnutzen – Kosten-Nutzen-Verhältnisse der Betreiber, Nutzer und Dritten
erarbeitet.

Im Folgenden wird lediglich eine Zusammenfassung der Ergebnisse diese Forschungsarbeiten gegeben, für die Grundlagen und Herleitung der Ansätze wird auf die entsprechenden Forschungsberichte verwiesen (Gnehm 2008; Lücking, Herrmann et al. 2008).

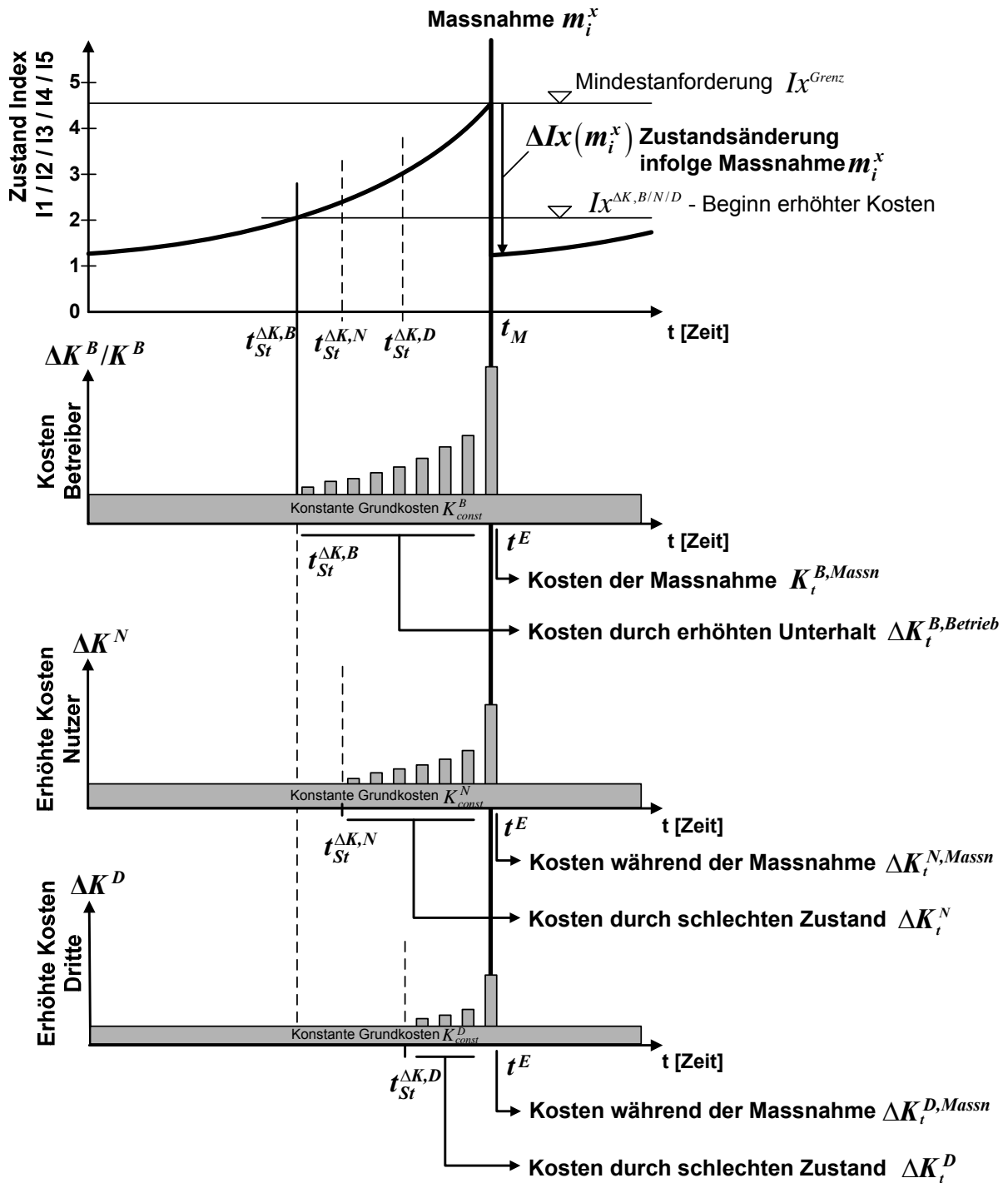


Bild 39: Kosten der unterschiedlichen Stakeholdergruppen während des Betriebs (Grundkosten und erhöhte Kosten infolge signifikanter Zustandsänderung) bzw. während einer Erhaltungsmassnahme (Girmscheid 2007b)

Im Normalfall werden die Kosten der Stakeholdergruppen 1:1 in die Berechnung der Gesamtkosten einer Erhaltungsvariante integriert. Durch Gewichtungsfaktoren können die einzelnen Kostenanteile aber auch unterschiedlich bewertet werden. Kosten, die reale Geldflüsse darstellen (Kosten gleich Ausgaben), sollten aber in jedem Fall in der tatsächlich angefallenen Höhe berücksichtigt werden. Die Bewertung der nicht direkt quantifizierbaren Kostenanteile (wie z.B. Zeitkosten, Umweltkosten, etc.) sollte zunächst möglichst objektiv, entsprechend spezifischer Fachliteratur (Normen, etc.) erfolgen. Über die Gewichtungsfaktoren wird den Entscheidungsträgern die Möglichkeit gegeben gewisse Kostenanteile geringer oder gar nicht zu bewerten. Dies kann z.B. für die Budgetplanung des Strassenbetreibers sinnvoll sein.

Für alle im Folgenden beschriebenen laufenden Betriebskosten des Betreibers, der Nutzer und der Dritten gilt, dass wie in Bild 39 dargestellt, nur die im Vergleich zum optimalen Strassenzustand erhöhten Kostenanteile berücksichtigt werden müssen. Bei den Formeln zur Kosten-Barwert-Berechnung wird jedoch verallgemeinernd der Ausdruck $K_t^{i,B/N/D}$ für die gesamten Kosten der Stakeholder verwendet. In den meisten Fällen kann in der Anwendung $K_t^{i,B/N/D}$ vereinfachend durch $\Delta K_t^{i,B/N/D}$ ersetzt werden, da die konstanten Grundkosten in allen Varianten gleich sind und sich damit im Kostenvergleich aufheben.

5.2.1. Betreiberkosten

Die Betreiberkosten beinhalten sämtliche Kosten zur Erhaltung der betrachteten Strassenanlage, wobei gemäss der Systemabgrenzung (siehe Kapitel 3.1.1) im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell lediglich die Kosten zur Erhaltung der Fahrbahnen betrachtet werden. Kunstbauten, Werkleitungen und Nebenanlagen werden nicht betrachtet. Die Erhaltung der Fahrbahnen lässt sich gemäss SN 640900a (SN 640900a 2004) unterteilen in (Bild 40):

- Überwachung und Kontrolle
- Betrieblicher Unterhalt
- Baulicher Unterhalt
- Veränderung

Wie bei allen Stakeholdergruppen, werden auch bei den Betreiberkosten nur die Kostenanteile berücksichtigt, die vom Strassenzustand oder den durchgeführten Erhaltungsmassnahmen abhängen. Alle Kostenanteile, die unabhängig von der Erhaltungsvariante immer in gleicher Höhe anfallen, können beim Vergleich verschiedener Erhaltungsvarianten vernachlässigt werden. Dies trifft insbesondere auf den Bereich der Überwachung und Kontrolle sowie für einen Teil des betrieblichen Unterhalts zu. Veränderungen an der Strasse, d.h. Erweiterungen oder Ersatzbauten werden nicht betrachtet, da sich hierdurch das betrachtete System verändert und eine neue Ausgangssituation für das Erhaltungsmanagement geschaffen wird. In die Betreiberkosten gehen also lediglich

- die vom Strassenzustand abhängigen Anteile des betrieblichen Unterhalts sowie
- die gesamten Kosten des baulichen Unterhalts (Erhaltungsmassnahmen)

ein (Bild 40).

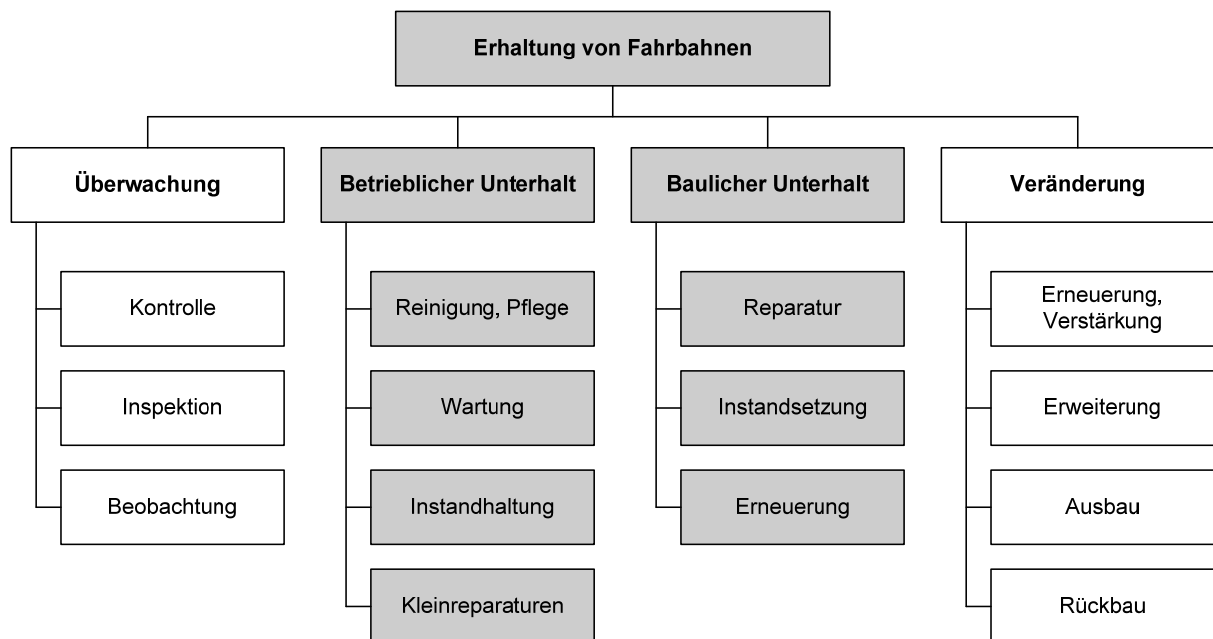


Bild 40: Gliederung der Kosten in Unterkostengruppen zur Erhaltung von Fahrbahnen und Wegen nach SN 640900a (SN 640900a 2004)

Zeitlich gesehen werden die Betreiberkosten zusätzlich unterteilt in

- Kosten während des Betriebs (Input aus Einzelprojekt 4) und
- Kosten während einer Erhaltungsmassnahme (Input aus Einzelprojekt 1 und 4).

Kosten des betrieblichen Unterhalts (während des Betriebs bzw. während einer Erhaltungsmassnahme)

Während des Betriebs der Strasse fallen verschiedene laufende Kosten des betrieblichen Unterhalts an. Diese entstehen auch während einer Massnahme, dann allerdings in veränderter Höhe.

Im Einzelnen entstehen Kosten durch folgende Prozesse:

- Winterdienst
- Reinigung
- Grünpflege
- Technischer Dienst
- Unfalldienst
- Kleiner baulicher Unterhalt

Ein grosser Teil dieser Kosten ist unabhängig vom Strassenzustand und kann daher vernachlässigt werden. Für die Bewertung unterschiedlicher Erhaltungsvarianten sind nur die Anteile der Kosten des Betriebs und Unterhalts relevant, die durch Änderungen des Strassenzustands hervorgerufen werden.

Die Betriebskosten setzen sich also zusammen aus einem konstanten Anteil, der unabhängig vom Strassenzustand anfällt und einem variablen Anteil der erhöhten Kosten infolge schlechten Strassenzustands (Bild 39):

$$K_t^{B,Betrieb} (t) = K_{t,const}^{B,Betrieb} + \Delta K_t^{B,Betrieb} (t)$$

Damit ergeben sich die erhöhten Betriebskosten wenn der Zustand $I_x^{\Delta K,B}$ erreicht ist zu:

$$\Delta K_t^{B,Betrieb} (t) = \left\{ \begin{array}{l} \Delta K_t^{B,Betrieb} \mid \Delta K_t^{B,Betrieb} = K_t^{B,Betrieb} (t) - K_{const}^{B,Betrieb} \quad \text{im Zeitintervall } \left[t_{St}^{\Delta K,B,Betrieb}, t_i^{m_i^x} \right] \\ \vee \Delta K_t^{B,Betrieb} = 0 \quad \text{im Zeitintervall } \left[t_i^{m_i^x}, t_{St}^{\Delta K,B,Betrieb} \right] \end{array} \right\} \quad (17)$$

$$\Delta K_t^{B,Betrieb} (t) \Big|_{t_{St}^{\Delta K,B,Betrieb}}^{t_i^{m_i^x}} = \left(K_t^{B,Betrieb} (t) - K_{t,const}^{B,Betrieb} \right) \Big|_{t_{St}^{\Delta K,B,Betrieb}}^{t_i^{m_i^x}} \quad (18)$$

mit: $K_t^{B,Betrieb} (t) =$ Gesamte Betriebskosten im Jahr t [CHF/a]

$K_{t,const}^{B,Betrieb} =$ Konstanter, vom Strassenzustand unabhängiger Anteil der Betriebskosten im Jahr t [CHF/a], bzw. bis zum Erreichen des Zustandes $I_x^{\Delta K,B,Betrieb} / GW^{\Delta K,B,Betrieb}$

$\Delta K_t^{B,Betrieb} (t) \Big|_{t_{St}^{\Delta K,B,Betrieb}}^{t_i^{m_i^x}} =$ Erhöhte Betriebskosten in Abhängigkeit vom Strassenzustand im Jahr t [CHF/a] im Zeitintervall $\left[t_{St}^{\Delta K,B,Betrieb}, t_i^{m_i^x} \right]$ zwischen dem Strassenzustand $I_x^{\Delta K,B,Betrieb}$ und I_x^{Grenz}

Kosten einer Erhaltungsmassnahme (aperiodische Kosten)

Durch eine Erhaltungsmassnahme fallen für den Strassenbetreiber die direkten Kosten dieser Massnahme an. Diese Kosten können durch Eigenleistung oder durch Vergabe von Arbeiten an Dritte entstehen. Sie gliedern sich in die Kostenarten:

- Planungskosten
- Installationskosten (Baustelleneinrichtung, Verkehrsumleitung)
- Materialkosten
- Arbeitskosten

Diese Kostenarten lassen sich in fixe und variable Kosten einteilen. Die fixen Kosten fallen unabhängig vom zeitlichen und weitgehend unabhängig vom räumlichen Umfang der Erhaltungsmassnahme in konstanter Höhe an. Hierzu gehören ein Teil der Planungskosten sowie die Installationskosten. Die variablen Kosten sind linear abhängig von der Fläche, die bearbeitet wird, sowie von der Massnahme. Material- und Arbeitskosten stellen zu 100% variable Kosten dar.

Die Kosten einer Erhaltungsmassnahme ergeben sich damit zu:

$$K_t^{B,Massn,m_i^x} = K_t^{Massn,m_i^x,fix} + A^{Massn,m_i^x} \cdot k_t^{Massn,m_i^x,var} \quad (19)$$

mit: $K_t^{B,Massn,m_i^x}$ = Betreiberkosten der Massnahme m_i^x im Jahr t [CHF/a]

$K_t^{Massn,m_i^x,fix}$ = Fixe Kosten der Massnahme m_i^x im Jahr t [CHF/a]

A^{Massn,m_i^x} = Fläche der Massnahme m_i^x [m²]

$k_t^{Massn,m_i^x,var}$ = Einheitskosten der Massnahme m_i^x [CHF/m²]

Die Summe der zusätzlichen Betreiberkosten während der Massnahmen m_i^x im Jahr t ergibt sich zu:

$$K_t^{B,Massn} = \sum_{m_i(t)} K_t^{B,Massn,m_i^x} \quad (20)$$

mit: $K_t^{B,Massn}$ = Zusätzliche Betreiberkosten durch Erhaltungsmassnahmen im Jahr t

$m_i^x(t)$ = i-te Massnahme im Jahr t

Die Massnahmen-Nebenkosten des Betreibers für zusätzliche Polizeikontrollen und Einsätze sowie Informationsdienste sollten bei grossen Massnahmen berücksichtigt werden:

$$K_{t-/+}^{B,M-Neben} = \sum_{m_i^x} K_t^{B,M-Neben,m_i^x}$$

Je nachdem, ob im betrachteten Jahr eine, mehrere oder gar keine Erhaltungsmassnahmen durchgeführt werden, ergibt sich für diese Kosten ein Wert grösser oder gleich Null.

Bei Massnahmen, deren Ausführungszeitraum in zwei oder mehrere Jahre betrifft, müssen die Kosten anteilig auf die verschiedenen Jahre der Durchführung aufgeteilt werden. Dies kann z.B. bei umfangreichen Erhaltungs- bzw. Erneuerungsmassnahme, die länger als ein Jahr dauern oder bei Massnahmen, die kurz vor Jahresende beginnen, notwendig sein.

Summe Betreiberkosten

Die Summe der totalen Betreiberkosten im Jahr t ergibt sich aus den Kosten des laufenden Betriebs und Unterhalts sowie den aperiodisch auftretenden Kosten der Erhaltungsmassnahmen.

$$K_{t,total}^B = K_t^{B,Betrieb}(t) + K_t^{B,Massn} + K_t^{B,M-Neben} \quad (21)$$

Die Summe der im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zu berücksichtigenden Kosten setzen sich allerdings aus den erhöhten Betreiberkosten $\Delta K^{B,Betrieb}$ nach Errei-

chen eines definierten Grenzzustands $I_x^{\Delta K,i} / GW^{\Delta K,i}$ und den zusätzlichen Betreiberkosten $\Delta K^{B,M-Neben}$ wie folgt zusammen:

$$K_t^B = \Delta K_t^{B,Betrieb} \left(t \right) \Big|_{t_{St}^{\Delta K,B,Betrieb}}^{t_i^{m_i^x}} + K_{t^{-/+}}^{B,Massn} + K_{t^{-/+}}^{B,M-Neben} \quad \text{im Zeitintervall} \left[t_{St}^{\Delta K,B,Betrieb}, t_i^{m_i^x} \right]$$

Die Betreiberkosten hängen also von zwei hauptsächlich Einflussfaktoren ab:

- Strassenzustand im Jahr t in den Einzelindizes $I_x = \{I1, I2, I3, I4, I5\}$
- Art und Umfang der im Jahr t durchgeführten Erhaltungsmassnahmen

5.2.2. Nutzerkosten

Die Nutzerkosten stellen in fast allen Fällen keine direkten Geldflüsse, sondern einen Werteverzehr z.B. in Form von Zeitverlusten oder erhöhten Wertverlusten der Fahrzeuge durch schlechte Strassen dar. Analog zu den Betreiberkosten wird unterschieden in Kosten während des Betriebs und Kosten während einer Erhaltungsmassnahme. Bei den Kosten während des Betriebs kann weiter differenziert werden zwischen Zeitabschnitten in denen nur die konstanten Grundkosten anfallen (guter Strassenzustand, $I_x(t) \leq I_x^{\Delta K,N}$) und Zeitabschnitte in denen erhöhte Kosten anfallen (verschlechterter Strassenzustand, $I_x(t) > I_x^{\Delta K,N}$). Die Kosten unterscheiden sich in allen Fällen nur in ihrer Höhe, die auftretenden Kostenarten bleiben dieselben. Wie bei allen Kostengruppen, werden im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell jeweils nur die Anteile ΔK^N der Gesamtkosten K^N berücksichtigt, die mit einem verschlechterten Strassenzustand in Zusammenhang stehen. Die konstanten Grundkosten K_{const}^N bei optimalem Strassenzustand bleiben unberücksichtigt. Damit fallen in den Zeitbereichen in denen $I_x(t) \leq I_x^{\Delta K,N}$ gilt, keine zu berücksichtigenden Kosten an.

Die im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell berücksichtigten erhöhten Nutzerkosten setzen sich zusammen aus:

- Erhöhten Zeitkosten
- Erhöhten Fahrzeugbetriebskosten
- Erhöhten Unfallkosten

Daraus ergeben sich die erhöhten Nutzerkosten aufgrund des verschlechterten Strassenzustands $I_x > I_x^{\Delta K,N}$ zu:

$$\Delta K_t^N \Big|_{t_{St}^{\Delta K,N}}^{t_i^{m_i^x}} = \Delta K_t^{N,Zeit} + \Delta K_t^{N,FB} + \Delta K_t^{N,Unfall} \quad \text{im Zeitintervall} \left[t_{St}^{\Delta K,N}, t_i^{m_i^x} \right]$$

Mit: $\Delta K_t^{N,Zeit} =$ Erhöhte Zeitkosten der Nutzer im Jahr t

$\Delta K_t^{N,FB} =$ Erhöhte Fahrzeugbetriebskosten der Nutzer im Jahr t

$\Delta K_t^{N,Unfall} =$ Erhöhte Unfallkosten der Nutzer im Jahr t

Bei der Berechnung muss jeweils unterschieden werden zwischen den aufgrund des verschlechterten Strassenzustands erhöhten Kosten während des laufenden Betriebs und den zusätzlichen Kosten während einer Erhaltungsmassnahme $K_{I^{+}}^{N,Massn}$, bei denen zusätzliche Effekte wie z.B. erhöhte Staubbildung eine Rolle spielen.

Erhöhte Zeitkosten – Verschlechterter Betriebszustand $I_x > I_x^{\Delta K, N}$:

Erhöhte Zeitkosten entstehen während des laufenden Betriebs infolge geringerer Maximal- und damit auch Durchschnittsgeschwindigkeit aufgrund unzureichenden Strassenzustands. Dies kann entweder durch Geschwindigkeitsbeschränkungen seitens des Strassenbetreibers (z.B. bei unzureichender Griffigkeit I4), oder durch die selbstständige Anpassung der Geschwindigkeit durch die einzelnen Fahrzeuglenker, z.B. bei stark unebener Fahrbahn (Längsebenheit I2) geschehen.

Während einer Erhaltungsmassnahme kann es ausserdem infolge vermehrten Staus zu einer Erhöhung der Zeitkosten kommen.

Erhöhte Fahrzeugbetriebskosten:

Der vom Strassenzustand abhängige Anteil der Fahrzeugbetriebskosten setzt sich bei Verschlechterung des Strassenzustands zusammen aus:

- Verringerten Treibstoffkosten bei fliessendem Verkehr / erhöhter Treibstoffverbrauch mit zunehmender Stauhäufigkeit
- Erhöhten Verschleisskosten
- Erhöhten zeitabhängigen Fahrzeugbetriebskosten

Aufgrund der bei schlechterem Strassenzustand geringeren Geschwindigkeit der Fahrzeuge, verringern sich die Treibstoffkosten bei schlechter werdendem Strassenzustand solange der Verkehr im normalen Leistungsbereich der Fahrzeuge fliesst. Entstehen jedoch durch die Verschlechterung des Strassenzustands Geschwindigkeitsreduzierungen, so werden je nach Leistungsauslastung der Strasse Staus auftreten, die dann auch zu erhöhtem Treibstoffverbrauch pro Kilometer führen.

Die erhöhten Verschleisskosten hängen vor allem von der Längsebenheit (Index I2) der Strasse ab, da bei Überschreiten von $I2^{\Delta K, N}$ zusätzliche Stoss- und Vibrationsbelastungen auf das Fahrzeug wirken.

Die zeitabhängigen Fahrzeugbetriebskosten sind abhängig von der reduzierten durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit durch betriebliche Einschränkungen oder Stau bei Leistungsgrenzen infolge schlechten Zustands der Strasse, z.B. infolge Schlaglöcher, Unebenheit, Glätte, etc.

Erhöhte Unfallkosten:

Unfallkosten entstehen aus Sachschäden sowie durch Behandlungs- und Pflegekosten verunfallter Personen und durch auf den Unfall folgende Produktionsausfälle oder Renten. Ein Teil dieser Kosten muss direkt von den Unfallbeteiligten (direkte Kosten), also den Strassenutzern, getragen werden, ein zweiter Teil belastet die gesamte Gesellschaft (indirekte Kosten). Dieser zweite Teil wird in den Kosten Dritter (Kapitel 5.2.3) behandelt.

Infolge schlechten Strassenzustands kann es im laufenden Betrieb zu einer Erhöhung der Unfallraten und damit zu einer Erhöhung der Unfallkosten kommen. Ausschlaggebende Parameter sind meist die Griffigkeit I4 sowie die Längsunebenheit I2 der Strasse. In Abhängigkeit dieser Parameter des Strassenzustands verändern sich die Unfallkosten bei einer Veränderung des Strassenzustands.

Verschlechterter Betriebszustand während der Massnahme m_i^x

Aufgrund von Erhaltungsmassnahmen unter Betrieb wird der Verkehr meist durch Einschränkungen von Fahrbahnen und/oder Fahrgeschwindigkeiten behindert mit zusätzlicher Staubildung. Somit entstehen massnahmenbedingte zusätzliche Nutzerkosten die wesentlich höher sind als die erhöhten Nutzerkosten. Diese sind jedoch auf die Massnahmendurchführungszeit beschränkt.

Die zusätzlichen Nutzerkosten während einer Massnahme m_i^x über den Zeitabschnitt ΔT^{Massn} sind:

$$K_{t-t+}^{N,Massn} = \Delta K_{t-t+}^{N,Massn,Zeit} + \Delta K_{t-t+}^{N,Massn,FB} + \Delta K_{t-t+}^{N,Massn,Unfall} \quad (22)$$

Mit: $\Delta K_{t-t+}^{N,Massn,Zeit}$ = Zeitkosten der Nutzer während der Durchführung einer Massnahme

$\Delta K_{t-t+}^{N,Massn,FB}$ = Fahrzeugbetriebskosten der Nutzer während der Durchführung einer Massnahme

$\Delta K_{t-t+}^{N,Massn,Unfall}$ = Unfallkosten der Nutzer während der Durchführung einer Massnahme

Wenn die Massnahme mehrere Jahre dauert, wird ΔT^{Massn} über die Massnahmenjahre anteilig aufgeteilt.

5.2.3. Kosten Dritter

Die Kosten Dritter setzen sich zusammen aus

- den Umweltkosten, d.h. die Bewertung der Belastung der Umwelt sowie
- dem von der Gesellschaft zu tragenden Anteil der Unfallkosten.

Die Belastung der Umwelt setzt sich wiederum vor allem aus den Punkten zusammen:

- Lärmbelastung
- Luftverschmutzung
- Klimaeffekte

Die Lärmbelastung hängt in den gewählten Modellen von der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Fahrbahnbelag ab. Da davon ausgegangen wird, dass bei den betrachteten Massnahmen jeweils dieselbe Belagsart eingebaut wird, die schon vorher vorhanden war, hängt die Lärmbelastung in diesem Fall nur von der Fahrzeuggeschwindigkeit ab. Die Ansätze zur Bestimmung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Strassenzustand können von der Berechnung der Zeitkosten der Nutzer übernommen werden. Die Luftverschmutzung und die Klimaeffekte hängen vom Treibstoffverbrauch ab. Hier können die Ansätze aus der Berechnung der Fahrzeugbetriebskosten übernommen werden.

Die von der Gesellschaft zu tragenden Unfallkosten (indirekte Kosten) setzen sich vor allem aus den Teilen der Kosten zusammen, die von Versicherungen (z.B. Krankenversicherung, AHV, etc.) getragen werden. Ausserdem werden die Arbeitgeber der vom Unfall betroffenen und damit die gesamte Wirtschaft belastet.

Die erhöhten Kosten Dritter nach Überschreiten von $I_x^{\Delta K, D} / GW^{\Delta K, D}$ setzen sich wie folgt zusammen:

$$\Delta K_t^D \Big|_{t_{St}^{\Delta K, D}}^{t_i^{m_i^x}} = \Delta K_t^{D, Umwelt} \Big|_{t_{St}^{\Delta K, D}}^{t_i^{m_i^x}} + \Delta K_t^{D, Unfall} \Big|_{t_{St}^{\Delta K, D}}^{t_i^{m_i^x}} \quad \text{im Zeitintervall } \left[t_{St}^{\Delta K, D}; t_i^{m_i^x} \right] \quad (23)$$

Mit: $\Delta K_t^{D, Umwelt} \Big|_{t_{St}^{\Delta K, D}}^{t_i^{m_i^x}} =$ Erhöhte Umweltkosten für Dritte nach Überschreiten von $I_x^{\Delta K, D}$

$\Delta K_t^{D, Unfall} \Big|_{t_{St}^{\Delta K, D}}^{t_i^{m_i^x}} =$ Erhöhte Unfallkosten für Dritte nach Überschreiten von $I_x^{\Delta K, D}$

Die zusätzlichen Kosten Dritter während der Erhaltungsmassnahme in der Zeitspanne setzen sich wie folgt zusammen:

$$K_{t^{-/+}}^{D, Massn} = \Delta K_{t^{-/+}}^{D, Massn, Umwelt} + \Delta K_{t^{-/+}}^{D, Massn, Unfall} \quad \text{im Zeitintervall } \Delta t^M \quad (24)$$

Mit: $\Delta K_{t^{-/+}}^{D, Massn, Umwelt} =$ Zusätzliche Umweltkosten für Dritte während einer Massnahme

$\Delta K_{t^{-/+}}^{D, Massn, Unfall} =$ Zusätzliche Unfallkosten für Dritte während einer Massnahme

5.2.4. Kostenansätze (Betreiber / Nutzer / Dritte)

Die Kostenansätze für die einzelnen Kostengruppen der drei Stakeholdergruppen wurden in den Einzelprojekten 1 und 4 erarbeitet. Im Einzelprojekt 1 (*Standardisierte Erhaltungsmass-*

nahmen) wurden die Massnahmenkosten der einzelnen standardisierten Erhaltungsmassnahmen differenziert nach fixen und variablen Kosten definiert (Gnehm 2008). Die Kostenansätze für die Betriebskosten, die Nutzerkosten und die Kosten Dritter wurden im Einzelprojekt 4 (*Gesamtnutzen und Kosten- Nutzenverhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen*) zusammengestellt (Lücking, Herrmann et al. 2008). Auf die genaue Berechnung der einzelnen Kostenanteile wird hier nicht detailliert eingegangen. In diesem Zusammenhang wird auf die jeweiligen Forschungsbereiche der anderen Teilprojekte verwiesen.

5.3. LC-Kosten-Barwert Berechnung für die LC-Erhaltungsvarianten

Die Bewertung verschiedener LC-Erhaltungsvarianten χ in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse beinhaltet Kosten, die über eine grosse Zeitspanne (Betrachtungszeitraum) anfallen. Für derartige langfristige strategische Betrachtungen ist es erforderlich, sowohl die Kostensteigerung, als auch die Verzinsung des Kapitals zu berücksichtigen. Daher wird die Bewertung der verschiedenen Verfahren mit Hilfe der Kosten-Barwert Methode vorgenommen (Girmscheid 2007b). Als dynamische Wirtschaftlichkeitsanalysemethode erfüllt diese die Anforderungen an eine langfristige Wirtschaftlichkeitsanalyse. Aus den Kosten der einzelnen Jahre des Betrachtungszeitraums wird durch Diskontierung der Kosten-Barwert der jeweiligen Erhaltungsvariante berechnet.

Da beim LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell von einer **bestehenden Strasse** bzw. einem **bestehenden Strassennetz** ausgegangen wird, werden die Investitionsausgaben zur Erstellung der Anlage bzw. die Abschreibung und die Verzinsung des jährlichen Restkapitalwerts der Anlage nicht berücksichtigt (Girmscheid 2007b). Wird das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell auf eine neue Strasse angewandt, z.B. zum Zeitpunkt der Planung, können diese Ausgaben bzw. die Abschreibung und Verzinsung berücksichtigt werden (Girmscheid 2006a; Girmscheid 2006b; Girmscheid 2007b).

Beim LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell werden die Kosten wie folgt berücksichtigt:

- Kosten einer Massnahme
- Erhöhte Kosten aller Stakeholder beim Überschreiten eines Grenzzustandswertes
- Zusätzliche Kosten aller Stakeholder während der Durchführung einer Massnahme

Die Grundkosten $K^{B/N/D,const}$, die bei jeder Erhaltungsvariante χ quasi konstant sind und somit bei einer Vergleichsbetrachtung bei allen Varianten vorhanden wären, müssen nicht weiter berücksichtigt werden.

Zur Sicherstellung der Allgemeingültigkeit wird im Folgenden bei der Kosten-Barwert-Berechnung jedoch allgemein der Ausdruck $K_t^{i,B/N/D}$ für die gesamten Kosten der Stakeholder verwendet. In den meisten Anwendungsfällen kann aber $K_t^{i,B/N/D}$ vereinfachend durch

$$\Delta K_t^{i,B/N/D} = K_t^{i,B/N/D} - K^{i,B/N/D,const} \text{ ersetzt werden.}$$

5.3.1. Kostensteigerung und Diskontierung

Bei der Planung der über den Betrachtungszeitraum anfallenden Kosten stellt sich zunächst das Problem, dass die Höhe der Kosten von Erhaltungsmaßnahmen sowie der durch den Strassenzustand beeinflussten Nutzerkosten und Kosten Dritter nur zum aktuellen Zeitpunkt $t=0$ bekannt sind. Daher müssen die heute ($t=0$) bekannten Kosten ($K_{t,0}^\chi$) auf den jeweiligen Zeitpunkt t , an dem sie anfallen mit der prognostizierten Kostensteigerung hochgerechnet werden. Ausserdem müssen die Kosten der einzelnen Jahre in der Barwertberechnung auf einen Bezugszeitpunkt bezogen werden, um die Verzinsung (Kapitalzinsentwicklung) des Kapitals zu Berücksichtigen.

Der prinzipielle Berechnungsablauf gestaltet sich also folgendermassen (Bild 41):

- 1) Die zu erbringenden Leistungen bzw. die Einschränkungen durch den Strassenzustand werden für das jeweils betrachtete Jahr t ermittelt.
- 2) Die daraus resultierenden Kosten werden mit den aktuellen Kostenansätzen (Jahr $t=0$) berechnet $\rightarrow K_{t,0}^\chi$.
- 3) Mit Hilfe von Kostensteigerungsfaktoren werden die im Jahr t zu erwartenden Kosten K_t^χ aus den Kosten $K_{t,0}^\chi$ abgeleitet.
- 4) Die im Jahr t anfallenden Kosten K_t^χ werden durch Diskontierung auf einen Bezugszeitpunkt t_B bezogen $\rightarrow K_{t,t_B}^\chi$.

Für den Bezugszeitpunkt wird üblicherweise $t_B = 0$ gewählt, es kann aber auch ein beliebiger anderer Zeitpunkt gewählt werden.

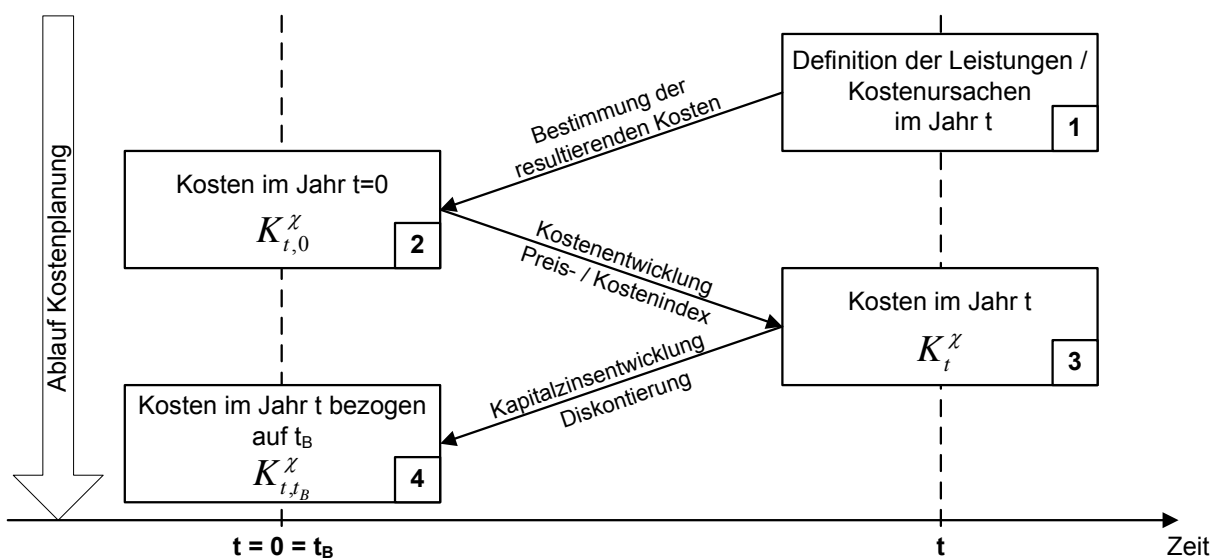


Bild 41: Prinzipieller Ablauf der Kostenplanung: Ableitung der Kosten im Jahr t aus den Kosten des Jahres $t=0$ sowie Diskontierung auf den Bezugszeitpunkt t_B

Theoretisch sind drei Fälle für das Verhältnis von Diskontierungszinssatz zu Kostensteigerung möglich (Bild 42):

- Kostenentwicklungsindex grösser als der Diskontierungszinssatz
- Kostenentwicklungsindex gleich dem Diskontierungszinssatz
- Kostenentwicklungsindex kleiner als der Diskontierungszinssatz

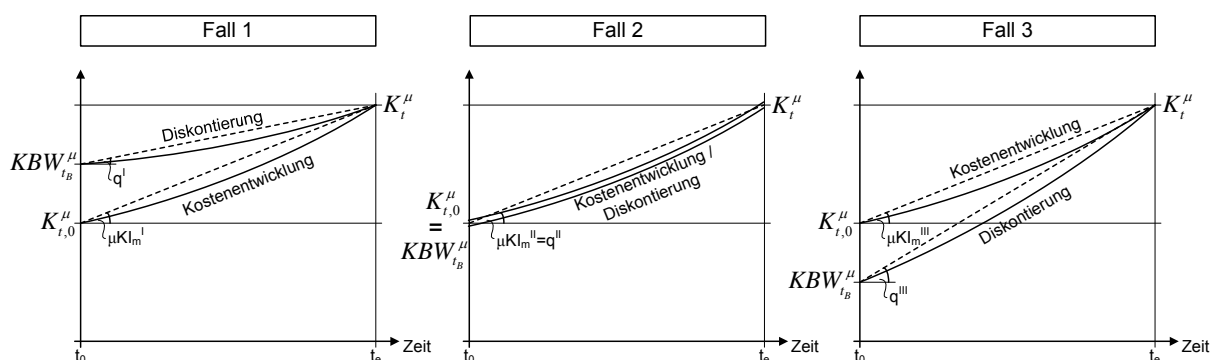


Bild 42: Mögliche Szenarien im Vergleich Kostenentwicklung zu Kapitalzinsentwicklung (Diskontierung)

Im Fall 1 übersteigt die Inflation den Diskontierungszins, was einem negativen Realzins entspricht. Eine derartige Konstellation tritt meist nur in wirtschaftlichen Krisen auf und war in der Schweiz in den letzten 25 Jahren beim Vergleich von Inflation und 10-jährigen Staatsanleihen nicht zu beobachten (Eidgenössisches Finanzdepartement 2008). Dies hat zur Folge, dass die mittels Kostenindex aus den zum Zeitpunkt $t=0$ bekannten Basiskosten ermittelten Kosten zum Zeitpunkt t nach Diskontierung auf den Zeitpunkt $t=0$ einen höheren Barwert ergeben als die Basiskosten zum Zeitpunkt $t=0$.

Im Fall 2 ist die prozentuale Kostenentwicklung und Diskontierung identisch, d.h. beide Indizes heben sich auf. Daher könnte auf die dynamische Barwertberechnung verzichtet und eine einfache statische Kostenbetrachtung durchgeführt werden. Dies hat zur Folge, dass die mittels Kostenindex aus den zum Zeitpunkt $t=0$ bekannten Basiskosten ermittelten Kosten zum Zeitpunkt t nach Diskontierung auf den Zeitpunkt $t=0$ den gleichen Barwert ergeben wie die Basiskosten zum Zeitpunkt $t=0$.

Im Fall 3 übersteigt der Diskontierungszinssatz den Kostenentwicklungsindex. In der Praxis ist dieser Normalfall in wirtschaftlich stabilen Zeiten fast immer anzutreffen. Dies hat zur Folge, dass die mittels Kostenindex aus den zum Zeitpunkt $t=0$ bekannten Basiskosten ermittelten Kosten zum Zeitpunkt t nach Diskontierung auf den Zeitpunkt $t=0$ einen niedrigeren Barwert ergeben als die Basiskosten zum Zeitpunkt $t=0$.

Kostenentwicklung

Die Berücksichtigung der Kostenentwicklung kann global für alle Kosten oder bei einer genaueren Betrachtung differenziert für einzelne Kostenarten oder Kostengruppen erfolgen.

Ein generelles Problem ist die Prognose der zukünftigen Kostenentwicklung. Hierzu kann auf die derzeitigen Kostenentwicklungsfaktoren sowie deren vergangene Entwicklung und die Einschätzung von Experten bezüglich der zukünftigen Entwicklung zurückgegriffen werden.

Für die allgemeine Inflation können die Daten des Schweizerischen Bundesamts für Statistik herangezogen werden (Bundesamt für Statistik 2006a). Von diesem wird auch eine Prognose der Preisentwicklung herausgegeben (Bundesamt für Statistik 2007). Spezifischere Informationen zu der Preisentwicklung im Baugewerbe liefert der Schweizer Baupreisindex (Bundesamt für Statistik 2006b), der unter anderem auch die Preisentwicklung für den Neubau von Strassen gesondert ausweist.

Der Schweizerische Baumeisterverband veröffentlicht jährlich den Produktionskosten-Index für elf Bausparten (Schweizerischer Baumeisterverband 2006). Im speziellen wird die Preisentwicklung in der Strassenerneuerung und im Belagsbau erhoben.

Globaler Kostenentwicklungsindex

Im einfachsten Fall wird nur ein globaler Kostenentwicklungsindex *GlobalKI* für alle berücksichtigten Kosten verwendet. In diesem Fall ergeben sich die Kosten im Jahr t wie folgt aus den bekannten Kosten des Jahres $t = 0$:

$$K_t^{B/N/D} = K_{t,0}^{B/N/D} \cdot (1 + \text{GlobalKI})^t \quad (25)$$

mit:	$K_t^{B/N/D}$	=	Kosten der Betreiber, Nutzer oder Dritter im Jahr t
	$K_{t,0}^{B/N/D}$	=	Kosten der Betreiber, Nutzer oder Dritter im Jahr t mit den Kostenansätzen des Jahres $t = 0$
	<i>GlobalKI</i>	=	Globaler Kostenentwicklungsindex

In diesem Fall sollte die allgemeine Preisentwicklung (Inflation / Deflation) als Grundlage für die Ermittlung des globalen Kostensteigerungsindex herangezogen werden. Das Vorgehen hat den Vorteil der Einfachheit, beinhaltet aber eventuell Ungenauigkeiten bezüglich der tatsächlichen Preisentwicklung in den einzelnen Kostenarten und Kostengruppen.

Nach Kostengruppen und Kostenarten differenzierte Kostenentwicklungsindizes

Eine genauere Prognose der zukünftigen Kostenentwicklung erhält man mit differenzierten Kostenentwicklungsindizes. Bei den zu untersuchenden Fällen im Erhaltungsmanagement von Strassen bietet sich die Einteilung in folgende Kostengruppen, analog der Kostenanteile der drei Stakeholdergruppen, an:

- Baukosten
- Strassen-Betriebskosten
- Zeitkosten
- Fahrzeugkosten

- Unfallkosten

Die Kostenentwicklung der einzelnen Kostengruppen kann einerseits nach branchenspezifischen Kostenentwicklungsindizes bewertet werden, wie z.B. die Baukostensteigerung, die Löhne, Material, etc. in einem Mix enthält oder andererseits kann die Kostenentwicklung einer Kostengruppe mit einem spezifischen Kostenartenentwicklungsindex gekoppelt werden. Beispielsweise kann der betriebliche Unterhalt, der stark von den Lohnkosten abhängig, ist von dem spezifischen Lohnentwicklungsindex oder die Fahrtkosten der Autofahrer vom Energiekostenindex bzw. Zeitkosten von der allgemeinen Lohnkostenentwicklung abgeleitet werden.

Für die Kostengruppen kann man beispielsweise folgende Kostenentwicklungsindizes ansetzen:

- *BauKI* - Baukostenindex

Für die Preissteigerung der Baukosten (Kosten der Erhaltungsmassnahmen) können die entsprechenden bauspezifischen Indizes des Bundesamts für Statistik oder des Bau-
meisterverbands als Grundlage herangezogen werden.

- *BetrKI* - Strassen-Betriebskostenindex (Lohnkosten dominieren)

Die Preisentwicklung der Strassenbetriebskosten wird ähnlich der Baukosten erfolgen, da ähnliche Arbeiten nur in kleineren Massnahmen durchzuführen sind. Da die Arbeiten zu-
meist weniger material- als arbeitsintensiv sind, kann bei einer differenzierten Betrachtung die Lohnentwicklung stärker gewichtet werden.

- *ZKI* - Zeitkostenindex

Die Zeitkosten werden vor allem von den Lohnkosten beeinflusst. Daher sollte sich der
Zeitkostenindex an der allgemeinen Lohnentwicklung orientieren.

- *FKI* - Fahrzeugkostenindex (Energiekosten dominieren)

Bei den Fahrzeugkosten kann, wenn keine spezifischen Daten zur Preisentwicklung in
diesem Sektor vorliegen, die Kostenentwicklung der Energiekosten oder die allgemeine
Inflation als Grundlage für die Preisentwicklung herangezogen werden.

- *UKI* - Unfallkostenindex

Bei den Unfallkosten wird empfohlen, von der allgemeinen Inflation als Grundlage für die
Kostenentwicklung auszugehen.

Die Kosten im Jahr t berechnen sich dann aus den Kosten des Jahres $t = 0$ für die ver-
schiedenen Kostengruppen wie folgt:

$$K_t^\mu = K_{t,0}^\mu \cdot (1 + \mu I)^t \quad (26)$$

mit: $K_t^\mu =$ Kosten der Kostengruppe μ im Jahr t

$K_{t,0}^\mu =$ Kosten der Kostengruppe μ im Jahr t mit den Kostenansätzen aus
dem Jahr $t = 0$

$$\mu I = \text{Kostenentwicklungsindex der Kostengruppe } \mu$$

$$\mu = \text{Baukosten / Strassenbetriebskosten / Zeitkosten / Fahrzeugkosten / Unfallkosten}$$

Die vorgeschlagenen Kostengruppen liessen sich auch noch weiter unterteilen, beispielsweise in Kostenarten, wie Lohnkosten, Materialkosten, Energiekosten etc., falls dies für die jeweilige Kostengruppe eine verbesserte Aussage ergibt (siehe hierzu (Girmscheid 2006a)), z.B. die Kostensteigerung bei den Fahrzeugkosten in Abhängigkeit von der Energiekostensteigerung oder die Kostensteigerung des betrieblichen Unterhalts in Abhängigkeit von der Lohnkostensteigerung. Da die Prognosen aber immer mit grossen Unsicherheiten behaftet sind, würde eine zu feine Unterteilung der Kosten lediglich eine nicht vorhandene Genauigkeit der Ergebnisse vortäuschen. Ausserdem liegen die Grundlagen für die Kostenermittlung zumeist nicht in derartig unterteilter Form vor, sodass auch bei der Aufteilung der Kosten in weitere Kostenarten zunächst Schätzungen nötig wären.

Prinzipiell ist auch die Einteilung in die oben genannten Kostenarten nur dann sinnvoll, wenn aufgrund verlässlicher Vorhersagen differenzierte Werte für die Kostensteigerungsindizes festgelegt werden können, anderenfalls sollte vereinfacht mit einem globalen Kostensteigerungsindex gerechnet werden.

Diskontierungszinssatz

Mit Hilfe des Diskontierungszinssatzes wird der zeitliche Anfall der Zahlungsströme in einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsanalyse bewertet. Dabei werden die sozialen oder wirtschaftlichen Effekte eines früheren oder späteren Anfalls der Zahlungsströme berücksichtigt.

Die Wahl des Diskontierungszinssatzes zur Berechnung der Barwerte der Kosten ist von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis der Untersuchungen. Eine Erhaltungsvariante kann allein durch die Wahl des Diskontierungszinssatzes besser oder schlechter bewertet werden als andere. Je höher der Diskontierungszinssatz gewählt wird, desto geringer wird die Gewichtung von zukünftigen Kosten im Vergleich zu aktuellen Kosten und umgekehrt. Da bei verschiedenen Erhaltungsvarianten die Kosten zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen können, führt eine Veränderung der Verzinsung zu Verschiebungen in der Bewertung der Erhaltungsvarianten. Daher muss die Bestimmung eines sinnvollen und wirtschaftlich gerechtfertigten Diskontierungszinssatzes mit grosser Sorgfalt erfolgen.

Die Definition des Diskontierungszinssatzes kann auf der Grundlage zweier unterschiedlicher Konzepte erfolgen:

- Bestimmung der sozialen Zeitpräferenzrate
- Bestimmung der sozialen Opportunitätskostenrate

Während die soziale Opportunitätskostenrate aus der Rendite privater Investitionen abgeleitet wird, bewertet die soziale Zeitpräferenzrate die gesellschaftlich akzeptable Substitution von „Konsum heute“ gegen „Konsum morgen“.

Im Folgenden wird auf beide Varianten der Bestimmung des Diskontierungszinssatzes eingegangen und für beide Fälle ein konkreter Zinssatz vorgeschlagen. Aufgrund der unter-

schiedlichen Ansätze zur Bestimmung des Zinssatzes ergeben sich hierbei zwei unterschiedliche Werte. Im nachfolgenden Kapitel wird dann die Frage diskutiert, wann welcher Ansatz sinnvoll anzuwenden ist.

Soziale Zeitpräferenzrate

Die Soziale Zeitpräferenzrate setzt sich aus zwei Anteilen zusammen (HM Treasury 2004; Rapp Trans AG (Schweiz) 2006):

- Zeitpräferenzrate δ [%]
- Effekt des zukünftigen Wachstums des Konsums $\mu \cdot g$ [%]

Aus diesen beiden Elementen ergibt sich die Soziale Zeitpräferenzrate zu:

$$q^{\text{Zeitpräf}} = \delta + \mu \cdot g \quad [\%]$$

Die Zeitpräferenzrate δ drückt aus, in welchem Mass die einzelnen Individuen einer Volkswirtschaft eine Einheit Konsum heute gegenüber derselben Einheit in der Zukunft präferenzieren.

Bei der konkreten Berechnung der sozialen Zeitpräferenzrate für die Schweiz kommt Abay (Rapp Trans AG (Schweiz) 2006) auf ein Intervall $2\% \leq q^{\text{Zeitpräf}} \leq 3.1\%$. Er schlägt aufgrund einer eher vorsichtigen Schätzung des zu erwartenden Wirtschaftswachstums einen Wert von 2%, also einen Wert am unteren Ende des Intervalls, zur Beurteilung von Infrastrukturbauten vor. Da dieser Wert unter Berücksichtigung der volkswirtschaftlichen Gegebenheiten in der Schweiz speziell für die Anwendung im Infrastrukturbereich ermittelt wurde, wird er im Rahmen dieser Forschungsarbeit in den Fällen, in denen die Soziale Zeitpräferenzrate zugrundegelegt wird, als Diskontierungssatz übernommen.

Soziale Opportunitätskosten

Der Diskontierungszinssatz auf Basis der Sozialen Opportunitätskosten orientiert sich an der Rendite, die mit einer alternativen Investition erzielt werden könnte.

Die Kapitalzinsentwicklung prognostiziert die mögliche Verzinsung von Kapital, das heute angelegt wird z.B. in festverzinsliche Anlagen, Fonds, etc.. Nach Keynes Liquiditätstheorie (Keynes 1936) bildet sich der Zinssatz aus der Produktivität des Kapitals und aus der vorhandenen Geldmenge sowie aus dem Liquiditätsbedürfnis der Wirtschaft. Die Geldmenge wird weitgehend von den Nationalbanken gesteuert. Mit Hilfe des Zinssatzes wird die Kapitalentwicklung am Geldmarkt bewertet. Der Diskontierungszinssatz ist vereinfacht ausgedrückt der inverse Zinssatz. Mittels Diskontierungszinssatz wird eine Ausgabe K_t im Jahr t abgezinst auf einen Bezugszeitpunkt t_B . Der Kapitalwert zum Zeitpunkt t_B gibt dann quasi an, welche Rücklagen heute getätigt werden müssen, um bei der angenommenen Verzinsung die Kapitalmenge K_t zum Zeitpunkt t für die Ausgaben bereitstellen zu können.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten einen solchen Zinssatz zu bestimmen. Einerseits kann der auf dem Kapitalmarkt erzielbare Zinssatz übernommen werden, der allerdings grossen Schwankungen unterworfen ist und ausserdem stark von der Bonität der beteiligten Akteure

abhängt (Rapp Trans AG (Schweiz) 2006). Alternativ kann auf die Rendite von langjährigen Staatsanleihen zurückgegriffen werden. Hier bietet sich z.B. der Zinssatz 10-jähriger Staatsobligationen, als quasi risikolose Vergleichsinvestition, als Grundlage für den Diskontierungszinssatz an (Schmidt 1996; Girmscheid 2006a).

Jahresmittel ² Monatsende Datum	CHF									EUR		USD
	Obligations der Eidgenossenschaft									Deutsche Staats- anleihen Obligations de l'État allemand	US-Treasury Bonds	Obligations du Trésor américain
	Obligations de la Confédération											
	2 Jahre 2 ans	3 Jahre 3 ans	4 Jahre 4 ans	5 Jahre 5 ans	7 Jahre 7 ans	10 Jahre ³ 10 ans ³	20 Jahre 20 ans	30 Jahre 30 ans	10 Jahre 10 ans	10 Jahre 10 ans		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1998	1.81	1.95	2.10	2.27	2.61	3.07	4.01	4.45	4.76	5.28		
1999	2.06	2.21	2.31	2.42	2.64	3.01	4.00	4.53	4.72	5.77		
2000	3.52	3.53	3.56	3.60	3.71	3.88	4.28	4.50	5.37	6.08		
2001	2.85	2.90	2.96	3.02	3.15	3.36	3.92	4.25	4.97	5.26		
2002	1.84	2.14	2.38	2.57	2.88	3.22	3.84	4.12	4.95	4.86		
2003	0.79	1.14	1.46	1.72	2.16	2.63	3.48	3.85	4.29	4.25		
2004	1.11	1.42	1.70	1.94	2.32	2.73	3.38	3.61	4.23	4.48		
2005	1.14	1.32	1.48	1.62	1.85	2.11	2.55	2.78	3.46	4.37		
2006	1.98	2.11	2.20	2.28	2.39	2.50	2.67	2.74	3.85	4.81		
2007	2.55	2.58	2.64	2.70	2.81	2.91	3.05	3.09	4.30	4.70		
2007 01	2.47	2.50	2.53	2.55	2.59	2.62	2.66	2.67	4.15	4.82		
2007 02	2.37	2.38	2.40	2.43	2.50	2.56	2.63	2.66	4.01	4.58		
2007 03	2.41	2.42	2.46	2.52	2.61	2.70	2.82	2.85	4.11	4.69		
2007 04	2.50	2.54	2.60	2.65	2.73	2.80	2.88	2.91	4.28	4.65		
2007 05	2.78	2.83	2.88	2.92	2.98	3.03	3.09	3.11	4.44	4.91		
2007 06	2.91	2.92	2.95	3.00	3.09	3.19	3.34	3.39	4.61	5.06		
2007 07	2.86	2.87	2.91	2.95	3.03	3.11	3.22	3.26	4.42	4.83		
2007 08	2.50	2.50	2.62	2.73	2.91	3.05	3.22	3.27	4.36	4.65		
2007 09	2.41	2.42	2.54	2.67	2.88	3.06	3.28	3.35	4.43	4.70		
2007 10	2.54	2.53	2.59	2.67	2.82	2.99	3.24	3.33	4.29	4.59		
2007 11	2.25	2.27	2.40	2.54	2.74	2.91	3.11	3.17	4.21	4.18		
2007 12	2.43	2.50	2.65	2.78	2.97	3.11	3.28	3.34	4.46	4.26		
2008 01	2.11	2.14	2.27	2.43	2.69	2.94	3.27	3.38	4.10	3.95		

Bild 43: Zinssätze Schweizer Staatsobligationen (Schweizerische Nationalbank 2008)

Aus den Daten in Bild 43 ergibt sich ein Mittelwert über die letzten zehn Jahre von $q^{Opp} = 2.94\%$. Dieser Wert wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit in den Fällen, in denen die Soziale Opportunitätskostenrate zugrundegelegt wird, als Diskontierungssatz übernommen.

Wahl des Diskontierungszinssatzes

In der aktuellen Literatur wird für öffentliche Investitionen meist die soziale Zeitpräferenzrate als adäquate Grundlage zur Bestimmung des Diskontierungszinssatzes empfohlen (HM Treasury 2004; Rapp Trans AG (Schweiz) 2006). Der Diskontierungszinssatz für private Investitionen sollte dagegen aus der sozialen Opportunitätskostenrate abgeleitet werden (Hirst 2001; Ross, Westerfield et al. 2002; Newnan, Eschenbach et al. 2004).

Bei der Auswahl des Diskontierungszinssatzes sind daher zunächst zwei grundlegende Fälle zu unterscheiden:

- Strassenbetreiber ist die öffentliche Hand
- Strassenbetreiber ist ein privates Unternehmen (z.B. in Form einer PPP-Abwicklung)

Fall 1 - wird die Strasse von der **öffentlichen Hand** betrieben, so wird empfohlen die **soziale Zeitpräferenzrate** als Grundlage für die Diskontierung aller Kostenanteile heranzuziehen. Neben den Betreiberkosten werden auch die Kostenanteile der Nutzer und Dritter, die zumeist keine direkten Cash-Flows darstellen, besser durch die volkswirtschaftlich orientierte Betrachtungsweise der sozialen Zeitpräferenzrate abgebildet.

Fall 2 - wird die Strasse von einem **privaten Eigentümer oder Betreiber** betrieben, so ist der Diskontierungszinssatz zwischen den verschiedenen Stakeholdergruppen zu differenzieren. Prinzipiell wird ein privater Investor die Rendite des Kapitals (also die soziale Opportunitätskostenrate) im Auge haben. Eine Verzinsung der Nutzerkosten und der Kosten Dritter mit dem Renditezinssatz einer privaten Investition ist allerdings nicht zielführend. Bei einer Investitionsentscheidung eines privaten Strassenbetreibers spielen zwar die Nutzerkosten und die Kosten Dritter zumeist eine kleinere Rolle, ganz zu vernachlässigen sind diese Kostenanteile aber nicht, da die Frequenz der Nutzung der Strasse und damit die Einnahmen des Betreibers von der Nutzerzufriedenheit abhängen. Für einen privaten Strassenbetreiber wird daher empfohlen, die Trennung der Kostenanteile in Betreiberkosten, Nutzerkosten und Kosten Dritter auch bei der Diskontierung aufrechtzuerhalten und für die einzelnen Stakeholdergruppen unterschiedliche Diskontierungszinssätze q^B , q^N und q^D anzusetzen (siehe Kapitel 5.3.2). In diesem Fall wird für die Diskontierung der **Betreiberkosten** (q^B) auf die **soziale Opportunitätskostenrate** zurückgegriffen, während die **Nutzerkosten** sowie die **Kosten Dritter** weiterhin mit der **sozialen Zeitpräferenzrate** diskontiert werden (q^N und q^D).

5.3.2. Kosten-Barwert einer Erhaltungsvariante

Der Kosten-Barwert $KBW_{t_B}^\chi$ einer Erhaltungsvariante χ ist die diskontierte Summe aller Kosten der drei Stakeholdergruppen die zeitabhängig über den gesamten Betrachtungszeitraum anfallen. Die Berechnung erfolgt in zwei Schritten:

- Berechnung der jährlichen Kosten der Erhaltungsvariante aus der Summe der Kosten der einzelnen Stakeholdergruppen
- Diskontierung der jährlichen Kosten auf den Betrachtungszeitpunkt

Zunächst werden die jährlichen Kosten K_t^χ der Erhaltungsvariante für jedes Jahr t des Betrachtungszeitraums berechnet. Dazu werden die Kosten der drei Stakeholdergruppen mithilfe der Kostenentwicklungsindizes aus den aktuellen (heutigen) Kostenansätzen abgeleitet (siehe Kapitel 5.3.1) und über das jeweilige Jahr t aufsummiert. Die Berechnung der Kosten der einzelnen Stakeholdergruppen wurde in den Kapiteln 5.2.1 (Betreiberkosten), 5.2.2 (Nutzerkosten) und 5.2.3 (Kosten Dritter) ausführlich beschrieben. Für jede Stakeholdergruppe erhält man demnach einen Gesamtbetrag der Kosten für die einzelnen Jahre des Betrachtungszeitraums.

Aus der Summe der erhöhten Kostenanteilen der drei Stakeholdergruppen ergeben sich die Gesamtkosten eines Jahres t .

Kostenermittlung im Jahr t ohne Gewichtungsfaktoren:

$$K_t^\chi = K_t^{B,\chi} + K_t^{N,\chi} + K_t^{D,\chi} \quad (27)$$

mit: $K_t^{B,\chi} =$ Betreiberkosten bei der Erhaltungsvariante χ im Jahr t

$K_t^{N,\chi} =$ Nutzerkosten bei der Erhaltungsvariante χ im Jahr t

$K_t^{D,\chi} =$ Kosten Dritter bei der Erhaltungsvariante χ im Jahr t

Die erhöhten Kosten der Stakeholder setzen sich wie folgt zusammen:

Betreiberkosten:

$$K_t^{B,\chi}(t) = \left(K_{t-/+)^{B,Massn}(\Delta t) + K_{t-/+)^{B,M-Neben}(\Delta t) + \Delta K_t^{B,Betrieb}(t) \Big|_{t_{St}^{\Delta K,B}}^{t_i^{m_i^\chi}} \right)^\chi \text{ im Zeitintervall } \left[t_{St}^{\Delta K,B}, t_i^{m_i^\chi} \right]$$

Nutzerkosten:

$$K_t^{N,\chi}(t) = \left(K_{t-/+)^{N,Massn}(\Delta t) + \Delta K_t^{N,Betrieb}(t) \Big|_{t_{St}^{\Delta K,N}}^{t_i^{m_i^\chi}} \right)^\chi \text{ im Zeitintervall } \left[t_{St}^{\Delta K,N}, t_i^{m_i^\chi} \right]$$

Kosten Dritter:

$$K_t^{D,\chi}(t) = \left(K_{t-/+)^{D,Massn}(\Delta t) + \Delta K_t^{D,Betrieb}(t) \Big|_{t_{St}^{\Delta K,D}}^{t_i^{m_i^\chi}} \right)^\chi \text{ im Zeitintervall } \left[t_{St}^{\Delta K,D}, t_i^{m_i^\chi} \right]$$

mit: $K_{t-/+)^{B,Massn}(\Delta t) =$ Massnahmekosten des Betreiber während einer Erhaltungs-
massnahme

$K_{t-/+)^{B,M-Neben}(\Delta t) =$ Massnahme-Nebenkosten des Betreiber während einer
Erhaltungsmassnahme

$\Delta K_t^{B,Betrieb}(t) =$ Erhöhte Betriebskosten des Betreibers nach Überschreiten des
Grenzwertes $I_x^{\Delta K,B}$

$K_{t-/+)^{N,Massn}(\Delta t) =$ Erhöhte Nutzerkosten während einer Erhaltungsmassnahme

$\Delta K_t^{N,Betrieb}(t) =$ Erhöhte Betriebskosten der Nutzer nach Überschreiten des
Grenzwertes $I_x^{\Delta K,N}$

$K_{t-/+)^{D,Massn}(\Delta t) =$ Erhöhte Kosten Dritter während einer Erhaltungsmassnahme

$\Delta K_t^{D,Betrieb}(t) =$ Erhöhte Betriebskosten Dritter nach Überschreiten des
Grenzwertes $I_x^{\Delta K,D}$

$\Delta t =$	Zeitraum der Massnahmendurchführung
$t_{St}^{\Delta K, N/B/D} =$	Zeitpunkt ab dem für Betreiber / Nutzer / Dritte erhöhte Kosten auftreten

Eine möglichst reale Erfassung der volkswirtschaftlichen Auswirkungen einer Erhaltungsvariante erhält man ohne jegliche Gewichtungsfaktoren. In gewissen Fällen kann es jedoch sinnvoll sein, die Kostenanteile der einzelnen Stakeholdergruppen nicht direkt aufzusummieren, sondern mit einzelnen Gewichtungsfaktoren zu versehen. Dadurch können die Kosten einer Stakeholdergruppe auf- oder abgewertet werden. Auf diese Weise kann die Kostenermittlung für verschiedene Entscheidungsszenarien angepasst werden. Beispielsweise spielen die Kosten der Nutzer oder der Dritten für eine reine Budgetplanung des Strassenbetreibers keine Rolle, d.h. in diesem Fall können die entsprechenden Gewichtungsfaktoren gleich null gesetzt und nur die Kosten des Strassenbetreibers in die Berechnung einbezogen werden.

Die Kostengruppen der Stakeholder Betreiber, Nutzer und Dritte müssen immer berücksichtigt werden, wenn man die Vorteilhaftigkeit einer Erhaltungsvariante oder Massnahme gegenüber anderen Varianten beurteilen möchte. Eine Gewichtung kann dann aufgrund von politischen Überlegungen erfolgen.

Da die Betreiberkosten in dem betrachteten System stets tatsächliche Cash-Flows darstellen, macht es bei diesen nur Sinn, sie komplett ($\alpha_B = 1$) oder gar nicht ($\alpha_B = 0$) zu berücksichtigen. Die Nutzerkosten oder die Kosten Dritter können auch anteilig berücksichtigt werden.

Kostenermittlung mit Gewichtungsfaktoren:

$$K_t^\chi = \alpha_B \cdot K_t^{B,\chi} + \alpha_N \cdot K_t^{N,\chi} + \alpha_D \cdot K_t^{D,\chi} \quad (28)$$

mit:	$K_t^\chi =$	Kosten der Erhaltungsvariante χ im Jahr t
	$K_t^{B,\chi} =$	Betreiberkosten der Erhaltungsvariante χ im Jahr t
	$K_t^{N,\chi} =$	Nutzerkosten der Erhaltungsvariante χ im Jahr t
	$K_t^{D,\chi} =$	Kosten Dritter der Erhaltungsvariante χ im Jahr t
	$\alpha_B =$	Gewichtungsfaktor der Betreiberkosten ($\alpha_B = 0 \vee \alpha_B = 1$)
	$\alpha_N =$	Gewichtungsfaktor der Nutzerkosten im Intervall $[0;1]$
	$\alpha_D =$	Gewichtungsfaktor der Kosten Dritter im Intervall $[0;1]$

Die Gewichtungsfaktoren α_B , α_N und α_D können jedoch beliebige positive Werte annehmen, es gilt:

$$0 \leq (\alpha_B, \alpha_N, \alpha_D) \leq \infty$$

Im Regelfall liegen die Gewichtungsfaktoren zwischen 0 und 1.

Werte kleiner eins bedeuten eine Abwertung, Werte grösser eins eine Aufwertung des betreffenden Kostenanteils. Für $\alpha_B = \alpha_N = \alpha_D = 1$ ergibt sich eine Kostenermittlung ohne Ab- oder Aufwertung einzelner Kostenanteile. Diese Variante sollte man in Kombination mit der probabilistischen Kosten-Barwert-Methode verwenden.

Im zweiten Schritt werden die aufsummierten jährlichen Kosten mit Hilfe des Diskontierungszinssatzes q auf den Bezugszeitpunkt t_B diskontiert und durch Summation über den Betrachtungszeitraum der Kosten-Barwert der Erhaltungsvariante berechnet. Zusätzlich wird der Kostenanteil aus der Systemabgrenzung (siehe Kapitel 3.2.3.3) im Endzeitpunkt der Betrachtung berücksichtigt.

Der Kosten-Barwert einer Erhaltungsvariante χ ergibt sich also zu:

$$KBW_{t_B}^{\chi} = \sum_{t=1}^{t_e} \frac{K_t^{\chi}}{(1+q)^{(t-t_B)}} + \frac{K_{t_e}^{\chi, Abgr}}{(1+q)^{(t_e-t_B)}} \quad (29)$$

- mit: $KBW_{t_B}^{\chi}$ = Kosten-Barwert der Erhaltungsvariante χ bezogen auf das Jahr t_B
- $K_{t_e}^{\chi, Abgr}$ = Kostenanteil aus der Systemabgrenzung der Erhaltungsvariante χ im Endzeitpunkt t_e (Wiederherstellungskosten / Substanzwertverlust (siehe Kapitel 3.2.3.3))
- q = Diskontierungszinssatz (öffentlicher Strassenbetreiber: Soziale Zeitpräferenzrate, Privater Strassenbetreiber: Soziale Opportunitätskosten)
- t_B = Bezugszeitpunkt (meist $t=0$)

Sollen bei Kosten-Barwertberechnung bei einem privaten Strassenbetreiber unterschiedliche Diskontierungszinssätze für die Kostenanteile der einzelnen Stakeholdergruppen berücksichtigt werden (siehe Kapitel 5.3.1), so ergibt sich der Kosten-Barwert wie folgt:

$$KBW_{t_B}^{\chi} = \sum_{t=1}^{t_e} \left(\frac{K_t^{B,\chi}}{(1+q^B)^{(t-t_B)}} + \frac{K_t^{N,\chi}}{(1+q^N)^{(t-t_B)}} + \frac{K_t^{D,\chi}}{(1+q^D)^{(t-t_B)}} \right) + \frac{K_{t_e}^{\chi, Abgr}}{(1+q^B)^{(t_e-t_B)}} \quad (30)$$

- mit: $K_t^{B,\chi}$ = Betreiberkosten der Erhaltungsvariante χ im Jahr t
- $K_t^{N,\chi}$ = Nutzerkosten der Erhaltungsvariante χ im Jahr t
- $K_t^{D,\chi}$ = Kosten Dritter der Erhaltungsvariante χ im Jahr t
- $K_t^{\chi, Abgr}$ = Abgrenzungskosten der Erhaltungsvariante χ im Jahr t
- $q^{B/N/D}$ = Diskontierungsfaktor für Betreiberkosten, Nutzerkosten und Kosten

Dritter

Der Kostenanteil aus der Systemabgrenzung wird in diesem Fall mit dem Diskontierungszinssatz der Betreiberkosten diskontiert, da die Kosten zum Ausgleich der Differenzen des Strassenzustands im Endzeitpunkt den Betreiberkosten zuzurechnen sind.

5.4. Gegenüberstellung verschiedener Erhaltungsvarianten - Optimierungsprozess

Ziel des Erhaltungsmanagements ist es eine möglichst kostenoptimale Erhaltungsvariante für das betrachtete Strassennetz über den Betrachtungszeitraum zu finden.

Im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell (siehe Kapitel 4) wurde das Vorgehen zur Definition verschiedener Erhaltungsvarianten auf Grundlage einer gegebenen Erhaltungsstrategie beschrieben. Mit Hilfe des LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodells lässt sich der Kosten-Barwert einer solchen Erhaltungsvariante als Summe der Kosten der einzelnen Stakeholder bestimmen (siehe Kapitel 5.3). Auf der Ebene dieses Kosten-Barwerts lassen sich die verschiedenen Varianten gegenüberstellen und vergleichen.

Für die Optimalvariante beim Vergleich m verschiedener Varianten gilt nach dem Kosten-Barwert-Entscheidungsaxiom (Girmscheid 2007b):

$$KBW_{t_B}^{\chi^{opt}} = \text{Min} \left(KBW_{t_B}^x \right) \Big|_{\chi=1}^{\chi=m} \quad (31)$$

Mit: $KBW_{t_B}^x =$ Kosten-Barwert der Erhaltungsvariante χ

$\chi^{opt} =$ Optimale Erhaltungsvariante innerhalb der m betrachteten Varianten

Auf Basis der Formel (31) werden verschiedenste Erhaltungsvarianten χ einer gewählten Strategie Γ gemäss dem Entscheidungsbaumverfahren (Bild 28) gebildet (siehe Kapitel 4.3) und unter beschränkter Rationalität die Optimalvariante $\chi^{opt} = \chi^{Basis}$ gebildet. Diese Optimalvariante kann dann auch für Verschiebungen von Massnahmen als Basisvariante herangezogen werden.

Mit diesem Vorgehen lassen sich eine unbegrenzte Anzahl möglicher Varianten miteinander vergleichen. Der Beweis der Optimalität einer gefundenen Variante ergibt sich aber nur wenn tatsächlich alle möglichen Varianten betrachtet werden. Mit einer auf einer gewissen Erfahrung aufbauenden Variantenwahl lässt sich die Anzahl der zu untersuchenden Varianten jedoch erheblich verringern, ohne das Ergebnis der Untersuchung deutlich zu verschlechtern. Dennoch bleibt dieses Vorgehen dann eine Optimierung unter begrenzter Rationalität, d.h. nur im Rahmen der betrachteten Varianten.

Alternativ wäre die Anwendung mathematische Optimierungsverfahren des Operations Research möglich. Mit entsprechenden geeigneten Optimierungsverfahren lässt sich der Rechenaufwand für die Optimierung deutlich reduzieren, wobei allerdings gleichzeitig der Aufwand für die notwendigen Vorarbeiten, beispielsweise zur automatischen Generierung von

Erhaltungsvarianten, deutlich steigt. In diesem Bereich besteht über dieses Forschungsprojekt hinausgehender Forschungsbedarf.

Die Optimierung des Strassenunterhalts erfolgt in zwei Schritten:

- Optimierung der Variantenbildung innerhalb einer gegebenen Erhaltungsstrategie
- Optimierung Erhaltungsstrategie
- In einem zweistufigen Verfahren wird also zunächst die optimale Erhaltungsvariante $\chi^{opt}(\Gamma)$ der einzelnen Erhaltungsstrategien Γ ermittelt. Im nächsten Schritt werden dann die optimalen Erhaltungsvarianten $\chi^{opt}(\Gamma)$ der einzelnen Strategien Γ gegenübergestellt und damit die optimale Erhaltungsstrategie Γ^{opt} ermittelt.
- Die Bereiche der Strategieentwicklung und –optimierung sind nicht Kerngegenstand dieses Forschungsprojekts. In diesen Bereichen wurden Grundlagen erarbeitet, die in weiteren Forschungsarbeiten weiterentwickelt werden können.

5.5. Kosten-Barwert-Differenz der Zusatzkosten durch Verschiebung von Massnahmen

Ausgangspunkt der Verschiebung einer Massnahme m_i^x des Strassenunterhalts ist zunächst die ermittelte und festgelegte Optimalvariante χ^{opt} einer Strategie Γ als Basisvariante χ^{Basis} . Diese ist die Variante der bisherigen Erhaltungspraxis. Ausgehend von dieser Basisvariante können verschiedene Alternativvarianten der Verschiebung entwickelt werden, die der Basisvariante gegenübergestellt werden.

Die Alternativvarianten können entweder

- eine Variation der Massnahmenauswahl bzw. des Zeitpunkts der Ausführung oder
- eine komplett neu entwickelte Erhaltungsvariante
- darstellen.

Die Berechnung der Zusatzkosten durch die Verschiebung einer oder mehrerer Erhaltungsvarianten einer Erhaltungsvariante erfolgt durch den Vergleich der Optimalvariante χ^{opt} , die auch als Basisvariante χ^{Basis} bezeichnet wird (ursprüngliche Planung) mit der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$ (mit Berücksichtigung der Verschiebung). Die Planung und Definition der Basisvariante und Verschiebungsalternative wurde in Kapitel 4.2 ausführlich beschrieben.

Kosten-Barwert-Differenzaxiom

1. KBW-Differenz-Zusatzkosten – genaue Methode

In der Zusatzkostenberechnung werden die Kosten der Verschiebungsalternative $KBW_{t_B}^{\tilde{\chi}}$ von den Kosten der Basisvariante $KBW_{t_B}^{\chi}$ subtrahiert. Für die Zusatzkosten aus der Verschiebung einer oder mehrerer Massnahmen ergibt sich dann:

$$\Delta KBW_{t_B}^{\tilde{\chi}-\chi} = \left(KBW_{t_B}^{\tilde{\chi}} - KBW_{t_B}^{\chi} \right) \Big|_{t_0}^{t_e} \quad (32)$$

mit:	$\Delta KBW_{t_B}^{\tilde{\chi}-\chi} =$	Barwert der Zusatzkosten durch die Verschiebung der Erhaltungsmassnahme(n)
	$KBW_{t_B}^{\chi} =$	Kosten-Barwert der Basisvariante (ursprüngliche Planung)
	$KBW_{t_B}^{\tilde{\chi}} =$	Kosten-Barwert der Verschiebungsalternative (mit Berücksichtigung der Verschiebung)
	$t_B =$	Bezugszeitpunkt
	$t_0 =$	Beginn des Betrachtungszeitraums
	$t_e =$	Ende des Betrachtungszeitraums

2. KBW-Differenz-Zusatzkosten – Näherungsmethode

Wird lediglich die isolierte Verschiebung einer einzelnen Erhaltungsmassnahme im Rahmen einer vereinfachten Betrachtung gemäss Kapitel 4.3.2 durchgeführt, so sollten neben den Differenzkosten der verschobenen Massnahme die zusätzlichen zukünftigen, über den Betrachtungszeitraum hinausgehenden Diskontierungseffekte einer solchen Verschiebung in der Berechnung der Zusatzkosten berücksichtigt werden (die Berechnung der zukünftigen Diskontierungseffekte wird im Folgenden ausführlich beschrieben).

Die Näherungsmethode für die Zusatzkosten ist dann exakt, wenn nach Bild 44 alle Folge-massnahmen nach der Verschiebungsmassnahme identisch sind mit der optimalen Basisvariante. Zudem wird der Endzeitpunkt von t_e auf $t = \infty$ ausgedehnt, um durch eine unendliche Reihenentwicklung eine Vereinfachung der Berechnung des Differenz-Barwerts der Zusatzkosten zu erreichen.

Die Kosten-Barwert-Differenz-Zusatzkosten infolge Vor- oder Aufschiebs von Massnahmen werden mit dem Näherungsverfahren wie folgt ermittelt:

Annahme: Alle Folgemaassnahmen m_i^x nach der verschobenen Massnahme sind identisch und unterscheiden sich in den beiden Varianten nur bezüglich ihres Zeitpunkts.

$$\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{\tilde{\chi}-\chi} = \Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B, \text{Massn}, \text{Diff}} + \Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B, \text{Massn}, \text{Disk}} + \Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B/N/D, \text{Betrieb}, \text{Diff}} + \Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B/N/D, \text{Betrieb}, \text{Disk}} \quad (33)$$

- mit: $\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B, \text{Massn}, \text{Diff}} =$ KBW-Differenz der Massnahmekosten des Betreibers bezogen auf den Verschiebungsbeginn
- $\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B/N/D, \text{Betrieb}, \text{Disk}} =$ KBW-Differenz der Diskontierungskosten der Folge-massnahmen von Betreiber / Nutzern / Dritten bezogen auf den Verschiebungsbeginn
- $\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B/N/D, \text{Betrieb}, \text{Diff}} =$ KBW-Differenz der Betriebskosten von Betreiber / Nutzern / Dritten bezogen auf den Verschiebungsbeginn
- $t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}} =$ Verschiebungsbeginn

Gemäss Bild 44 unterscheiden sich die Massnahmekosten der Verschiebungs-Alternativvariante von der Basisvariante um:

$$\Delta K^{B, \text{Massn}, \tilde{\chi}-\chi} = K_{t_{\tilde{n}}}^{B, \text{Massn}, \tilde{\chi}} - K_{t_n}^{B, \text{Massn}, \chi}$$

Die Kosten-Barwert-Differenz-Zusatzkosten der Massnahme ergeben sich aufgrund der Verschiebung um ΔT^{Versch} zu:

$$\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B, \text{Massn}, \text{Diff}} = \frac{K_{t_{\tilde{n}}}^{B, \text{Massn}, \tilde{\chi}}}{(1+q)^{t_{\tilde{n}}}} - \frac{K_{t_n}^{B, \text{Massn}, \chi}}{(1+q)^{t_n}}$$

Die erhöhten bzw. verminderten Kosten für Betreiber, Nutzer und Dritte infolge Vor- oder Aufschieb einer Massnahme ergeben sich wie folgt:

$$\Delta K^{B/N/D, \text{Betrieb}^+} = \Delta T^{\text{Versch}} \cdot k^{B/N/D, \text{Betrieb}}$$

Die Kosten-Barwert-Differenz-Zusatzkosten infolge Verschlechterung der Strasse bei Aufschieb ergibt sich bei dieser Differenzbetrachtung zu:

$$\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B/N/D, \text{Betrieb}^+, \text{Diff}} = \frac{K_{t_{\tilde{n}}}^{B/N/D, \text{Betrieb}^+, \tilde{\chi}}}{(1+q)^{t_{\tilde{n}}}} - \frac{K_{t_n}^{B/N/D, \text{Betrieb}^+, \chi}}{(1+q)^{t_n}}$$

- mit: $K_{t_n}^{B, \text{Massn}, \chi} =$ Massnahmekosten des Betreibers in der Basisvariante χ
- $K_{t_{\tilde{n}}}^{B, \text{Massn}, \tilde{\chi}} =$ Massnahmekosten des Betreibers in der Alternativvariante $\tilde{\chi}$
- $K_{t_n}^{B/N/D, \text{Betrieb}^+, \chi} =$ Betriebskosten des Betreibers / der Nutzer / Dritter in der Basisvariante χ

$K_{t_n}^{B/N/D, \text{Betrieb}^+, \tilde{\chi}}$ = Betriebskosten des Betreibers / der Nutzer / Dritter in der Basisvariante $\tilde{\chi}$

ΔT^{Versch} = Zeitspanne der Verschiebung

t_n = Zeitpunkt der Massnahme in der Basisvariante χ

$t_{\tilde{n}}$ = Zeitpunkt der Massnahme in der Alternativvariante $\tilde{\chi}$

Auswirkungen der Verschiebung:

Wird die Massnahme zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt als dem in der Erhaltungsstrategie Γ festgelegten Zeitpunkt $t^{\text{Grenz}}(I_x^{\text{Grenz}})$ ausgeführt, so sind bezüglich der Veränderung der Kosten zwei Fälle zu unterscheiden:

- Der Grenzwert $I_x^{\Delta K, i}$, ab dem erhöhte Kosten entstehen, wird weder in der Basisvariante noch in der Verschiebungsalternative überschritten. In diesem Fall fallen bei beiden Varianten nur die normalen Grundkosten $K_0^{B/N/D}$ an. Es ergibt sich also keine direkte kostenmässige Auswirkung der Verschiebung.
- Der Grenzwert $I_x^{\Delta K, i}$, ab dem erhöhte Kosten entstehen, wird in einer der Varianten überschritten. In diesem Fall führt die Verschiebung direkt zu erhöhten (Aufschub) oder verringerten (Vorschub) Kosten.

Zukünftige Diskontierungseffekte

Die zeitliche Verschiebung einer Massnahme hat in einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsanalyse nicht nur Einfluss auf die Höhe der einzelnen Kostenanteile, sondern bringt auch Diskontierungseffekte mit sich. Eine Verschiebung nach hinten führt durch die Diskontierung (im Normalfall) zu einer Verringerung, eine Verschiebung nach vorne (im Normalfall) zu einer Erhöhung der Kosten. Für die Massnahmen, die in den Betrachtungszeitraum fallen, werden diese Effekte automatisch in der Kosten-Barwert Berechnung berücksichtigt. Allerdings können die Auswirkungen einer Verschiebung einer Massnahme auch über den Betrachtungszeitraum hinaus wirksam werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn nur relativ kurze Betrachtungszeiträume untersucht werden. Die Verschiebung einer einzelnen Massnahme hat zur Folge, dass sämtliche Folgemassnahmen ebenfalls später anfallen. In Bild 44 ist die Verschiebung einer Erhaltungsmassnahme um die Zeitspanne ΔT im Vergleich zur Basisvariante dargestellt. Unter der Voraussetzung, dass die gewählten Massnahmen m_i^x der Erhaltungsvariante χ in Zukunft beibehalten werden (soweit dies technisch möglich ist), führt die Verschiebung einer Erhaltungsmassnahme zu einer Verschiebung aller zukünftigen Massnahmen um die selbe Zeitspanne. Diese Verschiebung hat Einfluss auf alle Kosten, die mit diesen Massnahmen im Zusammenhang stehen, also sowohl Betreiber- als auch Nutzerkosten und Kosten Dritter.

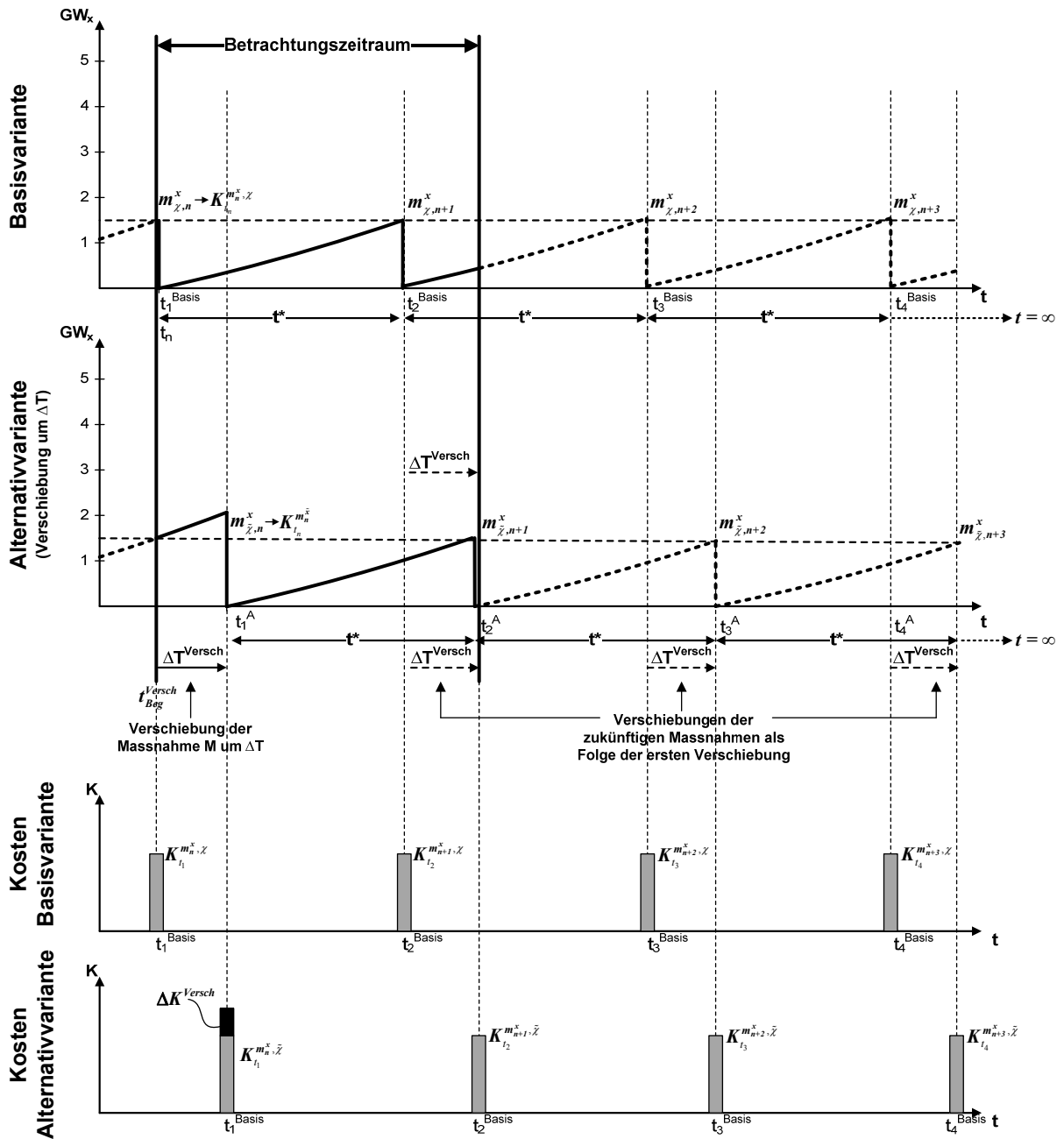


Bild 44: Über den Betrachtungszeitraum hinausgehende Auswirkungen der Verschiebung einer Erhaltungsmassnahme

Diskontierungseffekt des Aufschiebs einer Massnahme um ΔT^{Versch} :

Im Folgenden werden die zukünftigen Diskontierungseffekte aus der Verschiebung einer Erhaltungsmassnahme für den in Bild 44 dargestellten Fall, dass eine Erhaltungsmassnahme in gleichbleibenden Zeitintervallen t^* zur Anwendung kommt, für den Zeitraum bis $t = \infty$ hergeleitet. Bei einer Erhaltungsstrategie mit vorgegebenen Präventiv- bzw. Interventionsgrenzen ist dies ein häufig vorkommender allgemeiner Fall. Für andere Fälle muss die Herleitung dem Einzelfall angepasst werden.

Ausgangspunkt der Betrachtung für diesen Diskontierungseffekt ist der Beginn der Massnahme m_n^x , die um den Zeitraum $\Delta T^{Versch} \begin{pmatrix} + \\ - \end{pmatrix}$ verschoben werden soll. Nicht berücksichtigt wird in diesem Term der Betrag ΔK^{Versch} , sondern es wird davon ausgegangen, dass alle Folgemassnahmen m_i^x in der Basisvariante identisch sind und in der Alternativvariante identisch bleiben.

Ferner wird der Betrachtungszeitraum zur Vereinfachung der Reihenbildung bei allen Varianten von t_{Beg}^{Versch} bis $t_e = \infty$ ausgedehnt.

Der Kosten-Barwert der Massnahmen m_i^x der Basisvariante vom Zeitpunkt dies Verschiebungsbegins t_{Beg}^{Versch} bis zum Zeitpunkt $t_e = \infty$ ergibt sich zu:

$$KBW_{t_{Beg}^{Versch}}^{B, Massn, Basis} = \frac{K_{t^*}^{B, Massn, m_i^x}}{(1+q)^{t^*}} + \frac{K_{2t^*}^{B, Massn, m_i^x}}{(1+q)^{2t^*}} + \frac{K_{3t^*}^{B, Massn, m_i^x}}{(1+q)^{3t^*}} + \dots \quad (34)$$

Diese Abfolge von Kosten der Erhaltungsmassnahmen lässt sich als mathematische Reihe von $n=1$ bis $n=\infty$ darstellen:

$$KBW_{t_{Beg}^{Versch}}^{B, Massn, Basis} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{nt^*}^{B, Massn, m_i^x}}{(1+q)^{nt^*}} \quad (35)$$

mit: $KBW_{t_{Beg}^{Versch}}^{B, Massn, Basis} =$ Kosten-Barwert der Folge von Erhaltungsmassnahmen m_i^x von

$t_{Beg}^{Versch} = 1$ bis $t_e = \infty$ in der Basisvariante

$K_{nt^*}^{B, Massn, m_i^x} =$ Kosten der Massnahme m_i^x zum Zeitpunkt nt^*

$t_{Beg}^{Versch} =$ Verschiebungsbeginn

$t^* =$ Intervall in dem die Erhaltungsmassnahmen m_i^x ausgeführt werden

$n =$ Zähler der periodisch ausgeführten Erhaltungsmassnahmen m_i^x

$q =$ Diskontierungszinssatz

Die Kosten der einzelnen Massnahmen m_i^x unterscheiden sich lediglich durch die Preissteigerung aufgrund des unterschiedlichen Realisierungszeitpunktes. Daher kann die Formel (35) unter Berücksichtigung des Nettodiskontierungsfaktors, der Kostenentwicklung und Diskontierung beinhaltet, wie folgt umgeschrieben werden:

$$NDF = \frac{1 + GlobalI}{1 + q} \quad (36)$$

$$KBW_{t_{Beg}^{Versch}}^{B,Massn,Basis} = \sum_{n=1}^{\infty} NDF^{nt^*} \cdot K_0^{B,Massn,m_i^x} = K_0^{B,Massn,m_i^x} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} NDF^{nt^*} \quad (37)$$

mit: $KBW_{t_{Beg}^{Versch}}^{B,Massn,Basis}$ = Kostenbarwert der Massnahmekosten in der Basisvariante über den Zeitraum $t=1$ bis $t=\infty$ bezogen auf den Bezugszeitpunkt t_{Beg}^{Versch}

NDF = Nettodiskontierungsfaktor

$GlobalI$ = Globaler Kostensteigerungsindex

$K_0^{B,Massn,m_i^x}$ = Betreiberkosten der Massnahme m_i^x zum Zeitpunkt $t_{Beg}^{Versch} = 0$

Die Kosten der Massnahme werden über den Lebenszyklus konstant mit dem Wert zum Zeitpunkt $t_{Beg}^{Versch} = 0$ angesetzt, die Anpassung erfolgt durch den Nettodiskontierungsfaktor. Annahme: Die Massnahme m_i^x wird wiederholend über den gesamten Lebenszyklus angewendet.

m_i^x = Massnahme i zur Verbesserung des Zustandsindizes I_x in der Basisvariante

t^* = Intervall in dem die Erhaltungsmassnahmen m_i^x ausgeführt werden

Der Kosten-Barwert der Massnahmenkosten der Verschiebungsalternative mit jeweils um ΔT verschobenen Erhaltungsmassnahmen m_i^x ergibt sich über den Zeitraum t_{Beg}^{Versch} bis $t_e = \infty$ wie folgt:

$$\begin{aligned} KBW_{t_{Beg}^{Versch}}^{B,Massn,Alt} &= K_0^{B,Massn,m_i^x} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (NDF)^{n \cdot t^* + \Delta T} \\ &= K_0^{B,Massn,m_i^x} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (NDF)^{n \cdot t^*} \cdot (NDF)^{\Delta T} = K_0^{B,Massn,m_i^x} \cdot (NDF)^{\Delta T} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (NDF)^{n \cdot t^*} \end{aligned} \quad (38)$$

mit: $KBW_{t_{Beg}^{Versch}}^{B,Massn,Alt}$ = Kosten-Barwert der Folge von Erhaltungsmassnahmen m_i^x von $t_{Beg}^{Versch} = 1$ bis $t_e = \infty$ in der Alternativvariante

ΔT^{Versch} = Zeitintervall um das die Massnahme m_i^x verschoben wird

Aus der Differenz der in den Formeln (37) und (38) dargestellten mathematischen Reihen ergibt sich für die zukünftigen Diskontierungseffekte:

$$\begin{aligned} \Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B, \text{Massn}, \text{Disk}} &= K_0^{B, \text{Massn}, m_i^x} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (NDF)^{n-t^*} - K_0^{B, \text{Massn}, m_i^x} \cdot (NDF)^{\Delta T^{\text{Versch}}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (NDF)^{n-t^*} \\ &= \left(1 - (NDF)^{\Delta T^{\text{Versch}}}\right) \cdot K_0^{B, \text{Massn}, m_i^x} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (NDF)^{n-t^*} \end{aligned} \quad (39)$$

mit: $\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B, \text{Massn}, \text{Disk}}$ = Diskontierungseffekt der verschobenen Folgemassnahmen aus der Verschiebung einer Massnahme m_i^x um ΔT^{Versch}

Die Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} (NDF)^{n-t^*}$ stellt eine geometrische Reihe dar, die für $NDF < 1$ gegen $\frac{1}{(NDF)^{-t^*} - 1}$ konvergiert (Papula 2009).

Damit lässt sich die Differenz der zukünftigen Diskontierungseffekte zwischen der Basisvariante χ und der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$ aufgrund der Verschiebung der Massnahme m_i^x um die Zeitspanne ΔT^{Versch} nach Formel (39) in geschlossener Form darstellen:

$$\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B, \text{Massn}, \text{Disk}} = \left(1 - (NDF)^{\Delta T^{\text{Versch}}}\right) \cdot K_0^{B, \text{Massn}, m_i^x} \cdot \frac{1}{(NDF)^{-t^*} - 1} \quad (40)$$

mit: $K_0^{B, \text{Massn}, m_i^x}$ = Betreiberkosten der Massnahme m_i^x zum Zeitpunkt $t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}} = 0$
 NDF = Nettodiskontierungsfaktor
 t^* = Intervall in dem die Erhaltungsmassnahmen m_i^x ausgeführt werden
 ΔT^{Versch} = Zeitintervall um das die Massnahme m_i^x verschoben wird

Dieser Term sollte bei kurzen Betrachtungszeiträumen als zusätzlicher Kostenanteil bei der Berechnung des Kosten-Barwerts einer Erhaltungsvariante berücksichtigt werden.

Analog lassen sich durch die Verschiebung der Massnahme m_i^x und der Folgemassnahmen um ΔT^{Versch} vom Zeitpunkt $t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}$ bis $t_e = \infty$ die erhöhten und zusätzlichen Kosten des Betreibers, der Nutzer und der Dritten im Betrieb darstellen:

$$\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}}}^{B/N/D, \text{Betrieb}, \text{Disk}} = \left(1 - (NDF)^{\Delta T^{\text{Versch}}}\right) \cdot \sum_{t_{m_i^x}}^{t_{m_i^x}^{\text{Versch}}+1} K_t^{B/N/D, \text{Betrieb}} \cdot \frac{1}{(NDF)^{-t^*} - 1} \quad (41)$$

- mit: $K_t^{B/N/D,Betrieb}$ = Betriebskosten des Betreibers / der Nutzer / der Dritten im Intervall $\left[t^{m_i^x}, t^{m_{i+1}^x} \right]$ zwischen zwei aufeinanderfolgenden Massnahmen
- NDF = Nettodiskontierungsfaktor
- ΔT^{Versch} = Zeitintervall um das die Massnahme m_i^x verschoben wird
- t^* = Intervall in dem die Erhaltungsmassnahmen m_i^x ausgeführt werden

Damit erhält man die gesamten Zusatzkosten der Verschiebung wie folgt (Bild 46):

$$\Delta KBW_{t_{Beg}}^{\tilde{\chi}-\chi, Versch} = \Delta KBW_{t_{Beg}}^{B, Massn, Diff, Versch} + \Delta KBW_{t_{Beg}}^{B/N/D, Betrieb, Diff, Versch} + \Delta KBW_{t_{Beg}}^{B/N/D, Betrieb, Disk, Versch} + \Delta KBW_{t_{Beg}}^{B, Massn, Disk, Versch}$$

$$\begin{aligned} \Delta KBW_{t_{Beg}}^{\tilde{\chi}-\chi, Versch} &= \frac{K_{t_{\tilde{n}}}^{B, Massn, \tilde{\chi}}}{(1+q)^{t_{\tilde{n}}}} - \frac{K_{t_n}^{B, Massn, \chi}}{(1+q)^{t_n}} + \sum_{t=1}^{t_e} \frac{K_{t_{\tilde{n}}}^{B/N/D, Betrieb, \tilde{\chi}}}{(1+q)^{t_{\tilde{n}}}} - \sum_{t=1}^{t_e} \frac{K_{t_n}^{B/N/D, Betrieb, \chi}}{(1+q)^{t_n}} \\ &+ (1-NDF)^{\Delta T^{Versch}} \cdot \sum_{t^{m_i^x}}^{t^{m_{i+1}^x}} K_t^{B/N/D, Betrieb} \cdot \frac{1}{(NDF)^{-t^*} - 1} \\ &+ \left(1 - (NDF)^{\Delta T^{Versch}}\right) \cdot K_0^{B, Massn, m_i^x} \cdot \frac{1}{(NDF)^{-t^*} - 1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta KBW_{t_{Beg}}^{\tilde{\chi}-\chi, Versch} &= \frac{K_{t_{\tilde{n}}}^{B, Massn, \tilde{\chi}}}{(1+q)^{t_{\tilde{n}}}} - \frac{K_{t_n}^{B, Massn, \chi}}{(1+q)^{t_n}} + \sum_{t=1}^{t_e} \left(\frac{K_{t_{\tilde{n}}}^{B/N/D, Betrieb, \tilde{\chi}}}{(1+q)^{t_{\tilde{n}}}} - \frac{K_{t_n}^{B/N/D, Betrieb, \chi}}{(1+q)^{t_n}} \right) \\ &+ \frac{(1-NDF)^{\Delta T^{Versch}}}{(NDF)^{-t^*} - 1} \cdot \left(\sum_{t^{m_i^x}}^{t^{m_{i+1}^x}} K_t^{B/N/D, Betrieb} + K_0^{B, Massn, m_i^x} \right) \end{aligned} \quad (42)$$

Da meist die Verschiebung einer Massnahme nur wenige Jahre ΔT beträgt, kann bei den direkt mit der Massnahme in einer Zeitperiode anfallenden Kosten eine rein statische Kostenbetrachtung durchgeführt werden (Bild 47). Damit vereinfacht sich die obige Formel wie folgt:

$$\begin{aligned} \Delta K_{t_{Beg}}^{\tilde{\chi}-\chi, Versch} &= K_{t_{\tilde{n}}}^{B, Massn, \tilde{\chi}} - K_{t_n}^{B, Massn, \chi} + \int_{t=1}^{t_e} \Delta K^i \cdot dt \Bigg|_{i=B/N/D} \\ &+ \frac{(1-NDF)^{\Delta T^{Versch}}}{(NDF)^{-t^*} - 1} \cdot \left(\sum_{t^{m_i^x}}^{t^{m_{i+1}^x}} K_t^{B/N/D, Betrieb} + K_0^{B, Massn, m_i^x} \right) \end{aligned} \quad (43)$$

mit:	$\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}}^{\tilde{\chi}-\chi}$ =	Kosten-Barwert der Zusatzkosten zwischen ursprünglich geplanter Variante χ und Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$
	$\Delta K_{t_{\text{Beg}}}^{\tilde{\chi}-\chi}$ =	Statisch ermittelte Zusatzkosten zwischen ursprünglich geplanter Variante χ und Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$
	$\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}}^{B,Massn,Diff}$ =	Kosten-Barwert-Differenz der Massnahmenkosten des Betreibers
	$\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}}^{B,Massn,Disk}$ =	Kosten-Barwert-Differenz der Diskontierungseffekte aus der Verschiebung der Massnahmenkosten
	$\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}}^{B/N/D,Betrieb,Diff}$ =	Kosten-Barwert-Differenz der Betriebskosten des Betreibers / der Nutzer / Dritter
	$\Delta KBW_{t_{\text{Beg}}}^{B/N/D,Betrieb,Disk}$ =	Kosten-Barwert-Differenz der Diskontierungseffekte aus der Verschiebung der Betriebskosten des Betreibers / der Nutzer / Dritter
	$K_{t_n}^{B,Massn,\chi}$ =	Massnahmekosten des Betreibers in der Basisvariante χ im Jahr t_n
	$K_{t_{\tilde{n}}}^{B,Massn,\tilde{\chi}}$ =	Massnahmekosten des Betreibers in der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$ im Jahr $t_{\tilde{n}}$
	$K_{t_n}^{B/N/D,Betrieb,\chi}$ =	Betriebskosten des Betreibers / der Nutzer / Dritter in der Basisvariante χ im Jahr t_n
	$K_{t_{\tilde{n}}}^{B/N/D,Betrieb,\tilde{\chi}}$ =	Betriebskosten des Betreibers / der Nutzer / Dritter in der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$ im Jahr $t_{\tilde{n}}$
	$K_t^{B/N/D,Betrieb}$ =	Betriebskosten des Betreibers / der Nutzer / der Dritten im Intervall $\left[t^{m_i^x}, t^{m_{i+1}^x} \right]$ zwischen zwei aufeinanderfolgenden Massnahmen
	$K_0^{B,Massn,m_i^x}$ =	Betreiberkosten der Massnahme m_i^x zum Zeitpunkt $t_{\text{Beg}}^{\text{Versch}} = 0$
	NDF =	Nettodiskontierungsfaktor
	ΔT^{Versch} =	Zeitintervall um das die Massnahme m_i^x verschoben

	wird
$\left[t^{m_i^x}, t^{m_{i+1}^x} \right] =$	Zeitintervall zwischen zwei Massnahmen $t^{m_i^x}$ und $t^{m_{i+1}^x}$
$t_n = t_{Beg}^{Versch} =$	Zeitpunkt der Massnahmendurchführung in der Basisvariante
$t_{\tilde{n}} =$	Zeitpunkt der Massnahmendurchführung in der Verschiebungsalternative

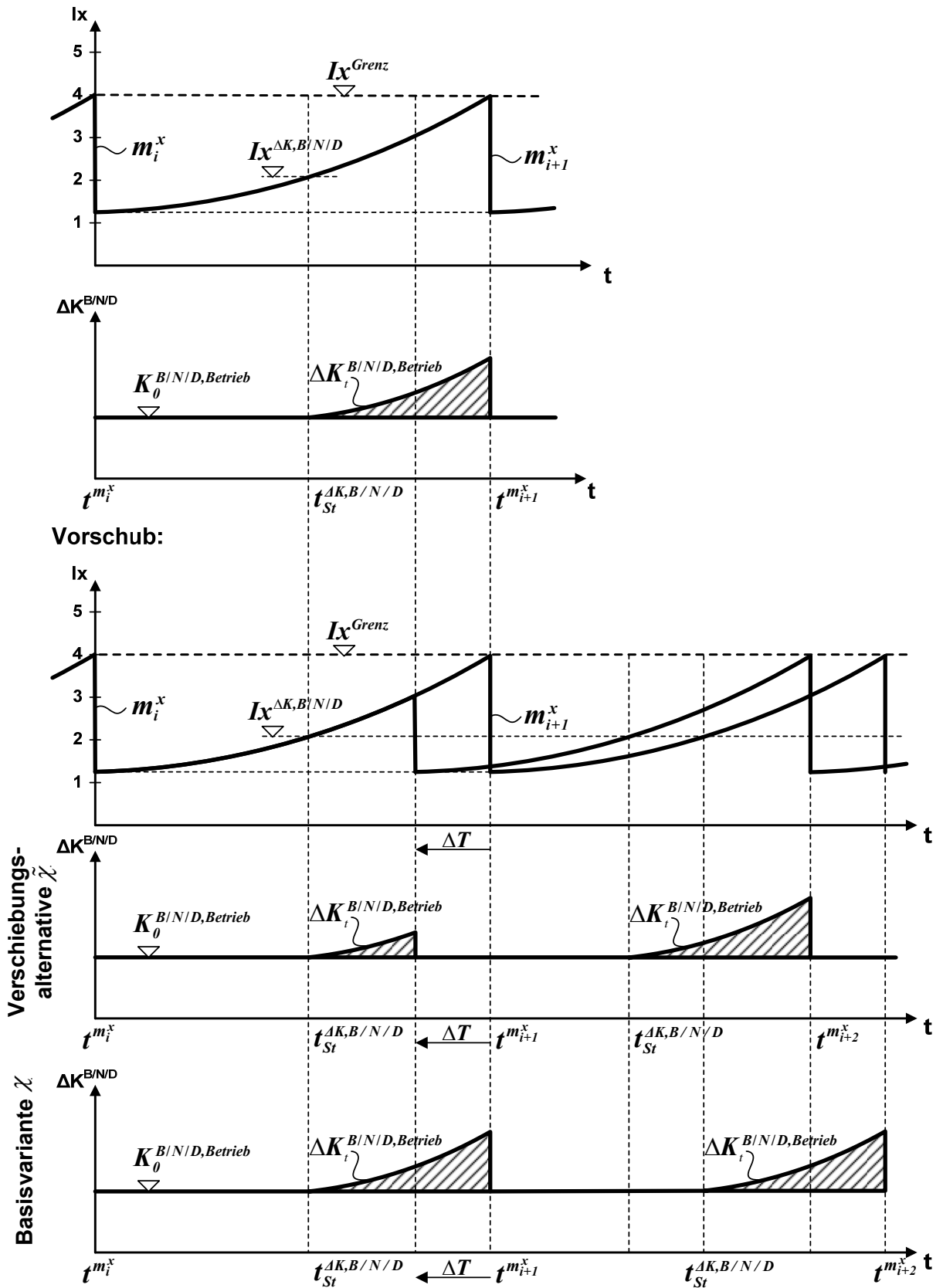


Bild 45: Veränderung der Betriebskosten für Betreiber / Nutzer und Dritte beim Vorschub einer geplanten Erhaltungsmaßnahme

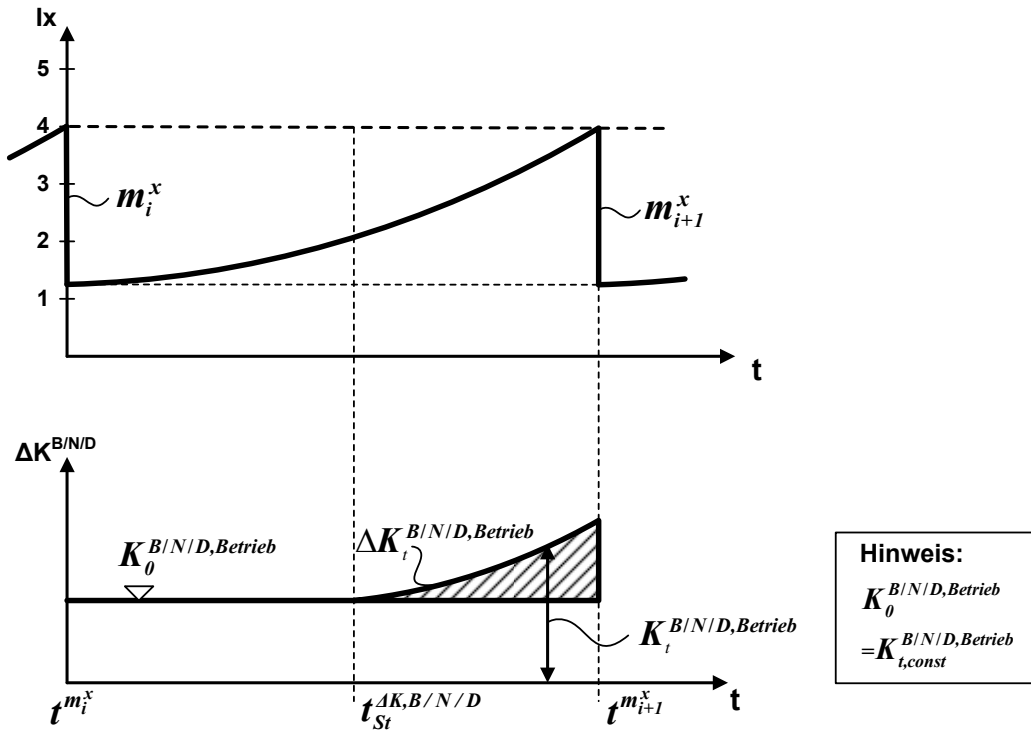


Bild 46: Kostenentwicklung bei sich verschlechterndem Strassenzustand - konstante und erhöhte Betriebskosten für Betreiber / Nutzer und Dritte

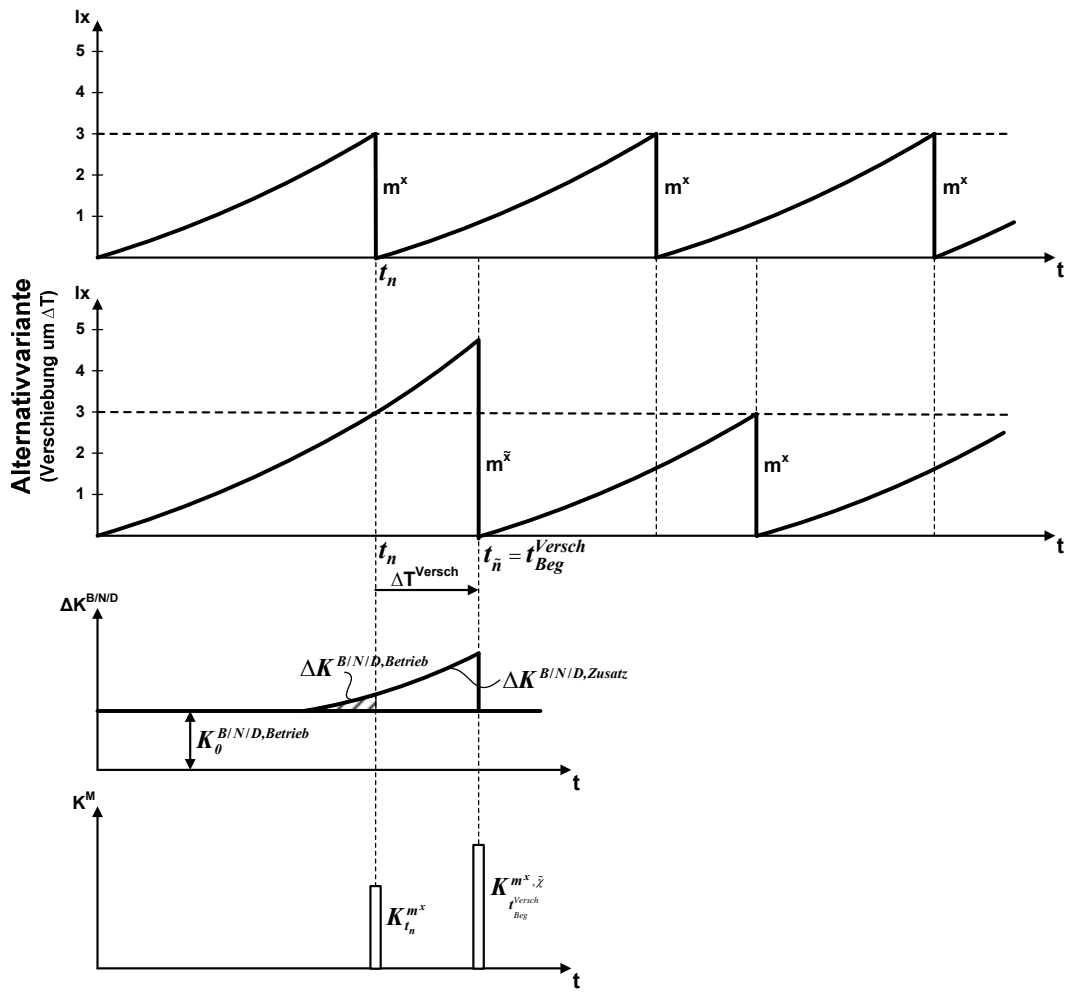


Bild 47: Vereinfachte Betrachtung der Zusatzkosten bei der Verschiebung einer Massnahme m_i^x um ΔT^{Versch}

6. Probabilistische Simulation

Sämtliche Eingangsgrößen der betrachteten Untersuchungen sind gewissen Unsicherheiten unterworfen. Dies gilt einerseits schon für die Parameter, die die Definition der Erhaltungsvariante betreffen (Einwirkungen auf die Strasse, Strassenzustandsentwicklung, etc.), andererseits auch die Kostenanteile in der Bewertung der verschiedenen Erhaltungsvarianten. In einer deterministischen Betrachtung der Parameter, wie in den Kapiteln 3.2 und 5 beschrieben, werden diese Unsicherheiten nicht betrachtet. Somit stellt das Ergebnis lediglich den Erwartungswert dar, sagt aber nichts über die mögliche Streubreite und die Verteilung der möglichen Ergebnisse aus. Die Aussagekraft einer solchen deterministischen Betrachtung kann durch eine Sensitivitätsanalyse verbessert werden. Alternativ bietet die probabilistische Betrachtung die Möglichkeit schon bei der Bestimmung der Ausprägungen der einzelnen Parameter die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Eingangswerte in die Berechnung einzubeziehen und somit auch eine Verteilungsfunktion der möglichen Ergebnisse als Output zu erhalten (Ang und Tang 2006).

Grundsätzlich können alle Parameter der Berechnung probabilistisch betrachtet werden. Bezüglich der Beeinflussung der Ergebnisse und der Komplexität der Betrachtung sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Probabilistische Kostenermittlung
- Probabilistische Definition der Erhaltungsvarianten

Im Folgenden wird zunächst die probabilistische Betrachtung prinzipiell erklärt, danach wird auf die beiden oben stehenden Fälle genauer eingegangen. Eine umfassende mathematische Formulierung des probabilistischen LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodells findet man auch bei Girmscheid (2007b).

6.1. Grundlagen der probabilistischen Simulation

Die probabilistische Simulation berücksichtigt die Tatsache, dass die Eingangsparameter einer Investitionsentscheidung, die zukünftige Entwicklungen einbezieht, mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind (Girmscheid 2007b). Diese Unsicherheit lässt sich durch statistische Betrachtungen der Vergangenheit oder durch Expertenschätzungen in Form Dichtefunktionen bezüglich der Verteilung der Ausprägungen der Eingangsparameter abbilden und so in die Berechnung integrieren. Für jeden Eingangsparameter wird dafür nicht nur ein erwarteter Wert der Ausprägung sondern eine Dichtefunktion zwischen

- Minimalwert,
- Erwartungswert und
- Maximalwert

in die Berechnung integriert.

Für einfache Probleme liessen sich die Dichtefunktionen der Verteilung der Eingangsparameter für eine Berechnung in geschlossener Form berücksichtigen. Die hier betrachteten Probleme mit einer Vielzahl von Eingangsparametern machen aufgrund ihrer Komplexität eine solche Berechnung unmöglich. Dieses Problem kann durch die Simulation der Ergeb-

nisse mithilfe eines geeigneten Simulationsverfahrens umgangen werden. Die Berechnung der Kosten einer Erhaltungsvariante erfolgt dann nicht in einem Berechnungsgang, wie bei der deterministischen Betrachtung, sondern in Form einer Simulation, bei der eine Vielzahl von Szenarien untersucht wird. Aus der Gesamtheit der untersuchten Szenarien ergibt sich dann die Verteilungsfunktion des Gesamtergebnisses.

Die probabilistische Simulation erfolgt in drei Schritten:

- Definition des mathematischen Modells zur Ermittlung der Zielgrößen der Szenarien
- Definition der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Einflussgrößen
- Simulation der Ergebnisse

Für den ersten Schritt, also die Definition des mathematischen Modells, kann auf das in Kapitel 5 beschriebene LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell zurückgegriffen werden. Dieses bewertet eine Erhaltungsvariante und deren Auswirkungen auf die einzelnen Stakeholdergruppen monetär und berechnet als Zielgrösse den Kosten-Barwert einer Erhaltungsvariante. Damit ist das LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell auch als Grundlage für die probabilistische Simulation geeignet.

Im Folgenden wird zunächst auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Eingangsparameter und dann die Simulation der Ergebnisse eingegangen. Die Simulation kann mit dem Monte Carlo Sampling Verfahren oder dem Latin Hypercube Sampling Verfahren erfolgen. Die detaillierte Funktionsweise der Monte Carlo Simulation und des Latin Hypercube Sampling Verfahrens kann für praktische Anwendungen bei Girmscheid und Busch (2008) nachgelesen werden.

6.1.1. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Eingangsparameter

Die Eingangsparameter der probabilistischen Simulation werden variabel entsprechend einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion definiert. Für jeden Parameter wird eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion mit Minimal-, Maximal- und Erwartungswert der Ausprägung festgelegt. Für die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kommen verschiedene mathematische Funktionen in Frage. Üblicherweise wird eine Dreiecksfunktion (Simpsonfunktion) oder Beta-Funktion gewählt.

Dreiecksverteilung

Bei der Dreiecksverteilung wird von einem linearen Verlauf der Wahrscheinlichkeitsdichte zwischen dem Minimal- und dem Erwartungswert bzw. zwischen dem Erwartungs- und dem Maximalwert ausgegangen (Bild 48). Durch Integration über x erhält man aus der Dichtefunktion die Verteilungsfunktion.

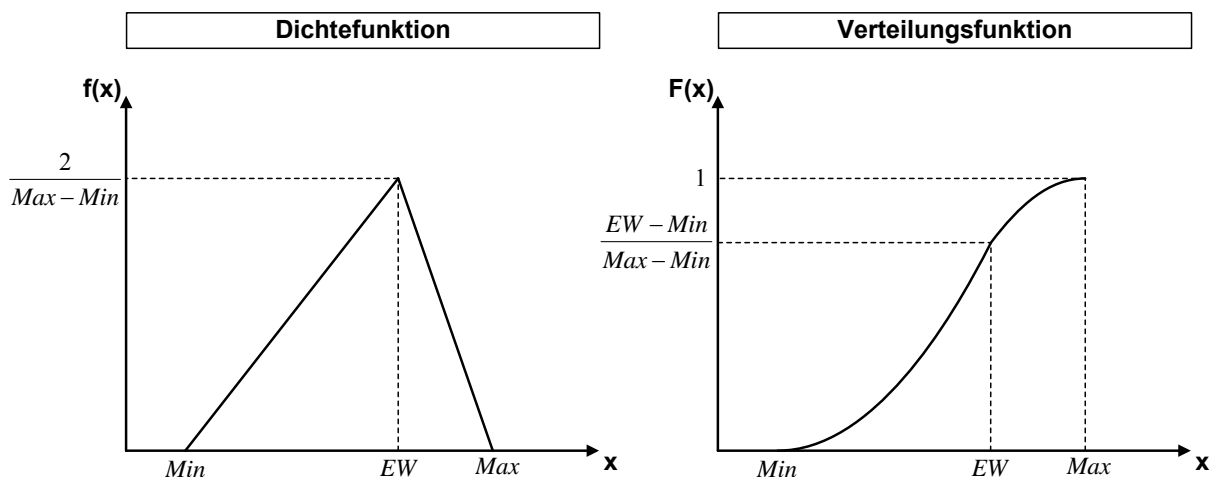


Bild 48: Dichte- und Verteilungsfunktion der Dreiecksverteilung (Simpson-Verteilung)

Für die Dichtefunktion $f^{Dreieck}(x)$ der Dreiecksdichteverteilung gilt:

$$f^{Dreieck}(x) = \begin{cases} \frac{2(x - Min)}{(Max - Min)(EW - Min)} & \text{für } Min \leq x \leq EW \\ \frac{2(Max - x)}{(Max - Min)(Max - EW)} & \text{für } EW \leq x \leq Max \\ 0 & \text{für } x \leq Min \vee x \geq Max \end{cases} \tag{44}$$

Aus der Integration über x folgt für die Verteilungsfunktion $F^{Dreieck}(x)$:

$$F^{Dreieck}(x) = \int_{Min}^{Max} f(x) dx = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq Min \\ \frac{(x - Min)^2}{(Max - Min)(EW - Min)} & \text{für } Min \leq x \leq EW \\ 1 - \frac{(Max - x)^2}{(Max - Min)(Max - EW)} & \text{für } EW \leq x \leq Max \\ 1 & \text{für } x \geq Max \end{cases} \tag{45}$$

- mit: Min = Minimum der Wahrscheinlichkeitsverteilung
- Max = Maximum der Wahrscheinlichkeitsverteilung
- EW = Erwartungswert der Wahrscheinlichkeitsverteilung

Beta-Verteilung

Die Beta Verteilung stellt eine stetige Zufallsverteilung dar, deren Verlauf zwischen Minimal- und Maximalwert durch die beiden Parameter p und q angepasst werden kann. Je nach Kombination der beiden Parameter verläuft die Dichtefunktion flacher oder steiler, ausserdem verschiebt sich der Erwartungswert zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert. Dadurch kann mit der Beta-Funktion der erwartete Verlauf der Wahrscheinlichkeitsverteilung möglichst realitätsnah angenähert werden. In Bild 49 sind die Dichte- und Verteilungsfunktionen für verschiedene Kombinationen von p und q beispielhaft dargestellt.

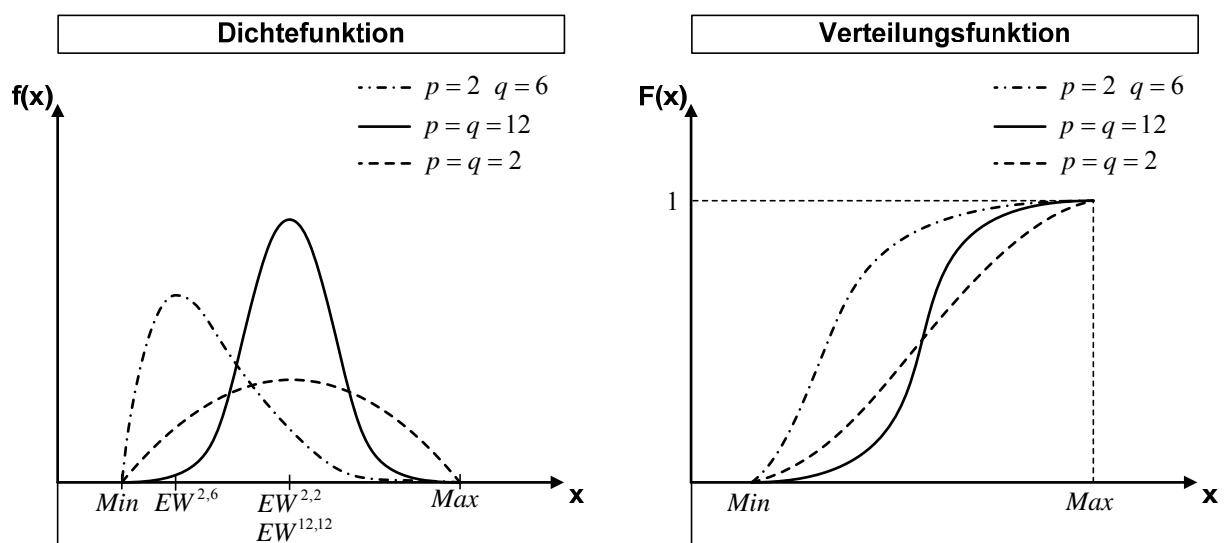


Bild 49: Dichte- und Verteilungsfunktionen der Beta-Dichte-Verteilung in Abhängigkeit der Parameter p und q

Die Dichtefunktion $f^{Beta}(x)$ der Beta-Verteilung ist definiert durch:

$$f^{Beta}(x) = \begin{cases} \frac{(x - Min)^{p-1} \cdot (Max - x)^{q-1}}{B(p, q) \cdot (Max - Min)^{p+q-1}} & \text{für } Min \leq x \leq Max \\ 0 & \text{für } x \leq Min \vee x \geq Max \end{cases} \tag{46}$$

Mit der Beta-Funktion $B(p, q)$, für die gilt:

$$B(p, q) = \int_{Min}^{Max} (u - Min)^{p-1} (Max - u)^{q-1} du \tag{47}$$

- mit: p = Parameter der Beta-Verteilung
- q = Parameter der Beta-Verteilung
- u = Hilfsvariable

Aus der Integration über x folgt für die Verteilungsfunktion $F^{Beta}(x)$:

$$F^{Beta}(x) = \int_{Min}^{Max} f(x) dx$$

Die Parameter p und q der Beta-Dichte-Verteilung müssen entsprechend der erwarteten Verteilung des betrachteten Einflussparameters gewählt werden. Für $p = q$ ergibt sich eine symmetrische Dichtefunktion, d.h. Abweichungen vom Erwartungswert sind in beide Richtungen gleich wahrscheinlich und mit den gleichen Ausschlägen zu erwarten. Wird $p < q$ gewählt, so verschiebt sich der Erwartungswert hin zum Minimalwert und umgekehrt. Je grösser p und q gewählt werden, desto steiler verläuft die Dichte- und damit auch die Verteilungsfunktion, was bedeutet, dass die Abweichungen vom Erwartungswert unwahrscheinlicher und kleiner werden (Bild 49).

6.1.2. Simulation mittels Monte Carlo Sampling Verfahren

Viele Problemstellungen im Ingenieurwesen oder wirtschaftliche Entscheidungsprobleme lassen sich nicht oder nur schwer analytisch lösen. In diesen Fällen kann auf numerische Lösungsverfahren, wie die Monte Carlo Simulation zurückgegriffen werden (Ang und Tang 2006).

Bei der Monte Carlo Simulation handelt es sich um ein Verfahren zur numerischen Lösung mathematischer Problemstellungen durch die Verwendung von Zufallszahlen mit denen Zufallsereignisse erzeugt werden (Mertens 1982). Sie wird überwiegend dort eingesetzt, wo analytische Methoden versagen, z.B. zur Nachbildung einer nicht vorhandenen empirischen Datenbasis. Im vorliegenden Fall soll ein qualitativ formuliertes Entscheidungsproblem (auf der Grundlage des LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell), bei dem die Werte der Einflussgrössen – zumindest teilweise – nicht exakt bekannt, sondern nur in Bandbreiten abschätzbar sind, untersucht werden.

Die Nachbildung einer empirischen Datenbasis erfordert eine grosse Anzahl an Simulationsdurchläufen, bei denen jeweils eine mögliche Ausprägung des Endergebnisses erzeugt wird. Sind alle Einflussparameter diskreter Natur, d.h. sie können nur bestimmte Werte annehmen, so wäre es theoretisch möglich alle möglichen Szenarien durch die Kombination der einzelnen Werte durchzuspielen. Bei einer grossen Anzahl von Einflussparametern und wenn mindestens einer von diesen eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung aufweist, ist es unmöglich alle Szenarien zu simulieren, da dies zu einer unendlichen Anzahl von Simulationsläufen führen würde. Daher wird eine festgelegte Anzahl von Szenarien (z.B. 10'000) durchgespielt, die, nach einer statistischen Auswertung, ein genügend genaues Ergebnis für die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Endergebnisses ergibt.

In jedem dieser Simulationsläufe werden die Eingangsparameter entsprechend der ihnen zugeordneten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen gewählt. Die Gesamtheit der erzielten Ergebnisse ergibt die Verteilung der Ergebnisse der Untersuchung unter Berücksichtigung der Streuung der Eingangsparameter.

Die Simulation nach dem Monte Carlo Sampling Verfahren läuft in folgenden Schritten ab:

- 1) Zufallsverteilte Auswahl der Ausprägungen aller Eingangsparameter
- 2) Auswertung des zugrundeliegenden mathematischen Modells mit den gewählten Eingangsparametern

Wiederholung der Schritte 1) und 2) bis die festgelegte Zahl an Szenarien erreicht ist.

- 3) Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ergebnisses der Untersuchung aus der Gesamtheit der simulierten Ergebnisse.

Die Auswahl der Ausprägungen der Eingangsparameter erfolgt beim Monte Carlo Sampling Verfahren mit Hilfe einer Zufallszahl Z . Diese wird mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators zwischen 0 und 1 bestimmt. Die Zufallszahl Z entspricht dem Wert der Verteilungsfunktion $F(x)$ des betrachteten Eingangsparameters. Um den zugehörigen Wert des Eingangsparameters x bestimmen zu können, muss also zunächst die Umkehrfunktion $G(F(x))$ bestimmt werden (Girmscheid 2007d).

$$Z = F(x) \Rightarrow G(F(x)) = G(Z) = x \quad \text{mit } Z \in \mathbb{R}, 0 \leq Z \leq 1 \tag{48}$$

mit: $Z =$ Zufallszahl zwischen 0 und 1

$F(x) =$ Verteilungsfunktion des betrachteten Eingangsparameters

$G(F(x)) =$ Umkehrfunktion der Verteilungsfunktion $F(x)$

Mit Hilfe der Umkehrfunktion $G(F(x))$ lässt sich aus der Zufallszahl Z direkt auf die Ausprägung des Eingangsparameters x schliessen (Bild 50).

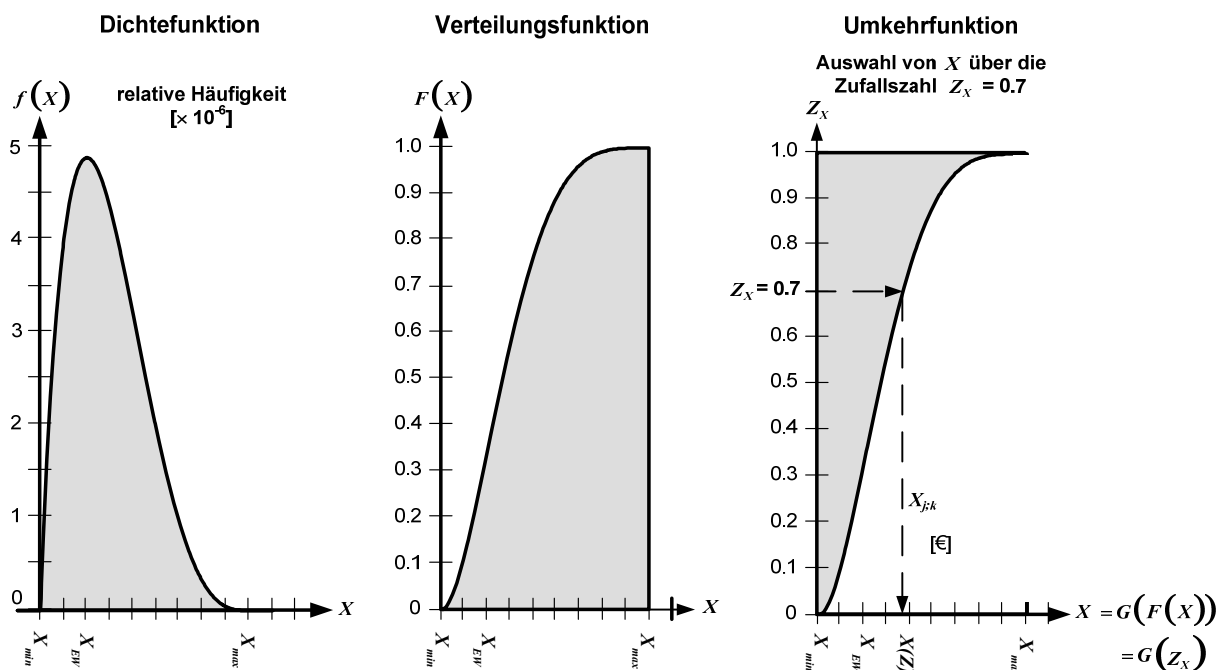


Bild 50: Bestimmung des Eingangsparameters x aus der Zufallszahl Z mit Hilfe der Verteilungsfunktion von x und deren Umkehrfunktion (Girmscheid 2006b)

Da die Ermittlung der Ausprägung der Eingangsparameter rein zufällig passiert, wird eine sehr grosse Anzahl von Simulationsläufen benötigt, um bei allen Eingangsparametern eine gleichmässige Verteilung der gezogenen Werte zu erreichen. Mit der Rechenleistung moderner PC-Systeme stellt dies zwar zumeist kein grösseres Problem dar, alternativ kann die Simulation aber mit dem Latin Hypercube Sampling Verfahren beschleunigt werden.

6.1.3. Simulation mittels Latin Hypercube Sampling Verfahren

Das Latin Hypercube Verfahren ist eine Variante der Monte Carlo Simulation, mit der die Effizienz des Verfahrens gesteigert werden soll. Es unterscheidet sich lediglich hinsichtlich der Bestimmung der Ausprägung der Eingangsparameter für die Simulation. Bei der Monte Carlo Simulation besteht das Problem, dass die rein zufällige Bestimmung der Ausprägungen der Eingangsparameter dazu führen kann, dass bei einer beschränkten Anzahl von Simulationen viele der gezogenen Werte in einem engen Bereich der Verteilungsfunktion des Eingangsparameters liegen und somit nicht das gesamte Spektrum der Möglichen Ausprägungen abgedeckt wird. Um dennoch zu guten Ergebnissen zu kommen, die den gesamten Bereich der möglichen Eingangswerte repräsentieren, müssen bei der Monte Carlo Simulation sehr viele Simulationsläufe durchgeführt werden. Dieses Problem umgeht das Latin Hypercube Verfahren bei einer beschränkten Anzahl von Simulationen dadurch, dass bereits gezogene Bereiche der Verteilungsfunktion „gesperrt“ werden. Dadurch schränkt sich der Bereich aus dem gezogen wird mehr und mehr ein und die gezogenen Werte werden zwangsläufig über den gesamten möglichen Bereich der Ausprägung verteilt (Bild 51).

Ablauf der Latin Hypercube Sampling

Im ersten Schritt werden die Verteilungsfunktionen der einzelnen Eingangsparameter in n Intervalle unterteilt, wobei n die Anzahl der geplanten Simulationsläufe darstellt. Bei der Simulation werden dann für jedes Szenario zwei Zufallszahlen gezogen. Die erste Zufallszahl Z_1 bestimmt welches der n Intervalle gezogen wird. Mit Hilfe der zweiten Zufallszahl Z_2 wird innerhalb des gewählten Intervalls der Wert des Eingangsparameters x , analog zum Monte Carlo Sampling, über die Umkehrfunktion der Verteilungsfunktion bestimmt.

In Bild 51 ist das Vorgehen für den Fall $n = 5$ Intervalle für einen Eingangsparameter beispielhaft dargestellt. Zunächst wird der Gültigkeitsbereich der Verteilungsfunktion $F(0,1)$ in fünf Teilintervalle unterteilt. In jedem Simulationslauf werden zunächst die Zufallszahlen Z_1 und Z_2 gezogen. Mit der ersten Zufallszahl $Z_1 = 0.87$ wird das Intervall 5 mit $[0.8;1.0[$ gezogen. Dann wird innerhalb des Intervalls 5 $[0.8;1[$ eine Zufallszahl z.B. $Z_2 = 0.95$ generiert, die dann auf der Abszisse der Umkehrfunktion $G(F(x)) = x$ die Ausprägung des Eingangsparameters $x=6.86$ für die Simulation festlegt (Bild 51). In den nächsten Simulationsläufen ist das Intervall 5 nicht mehr auswählbar („gesperrt“), die nächsten Werte müssen also in den anderen Intervallen liegen.

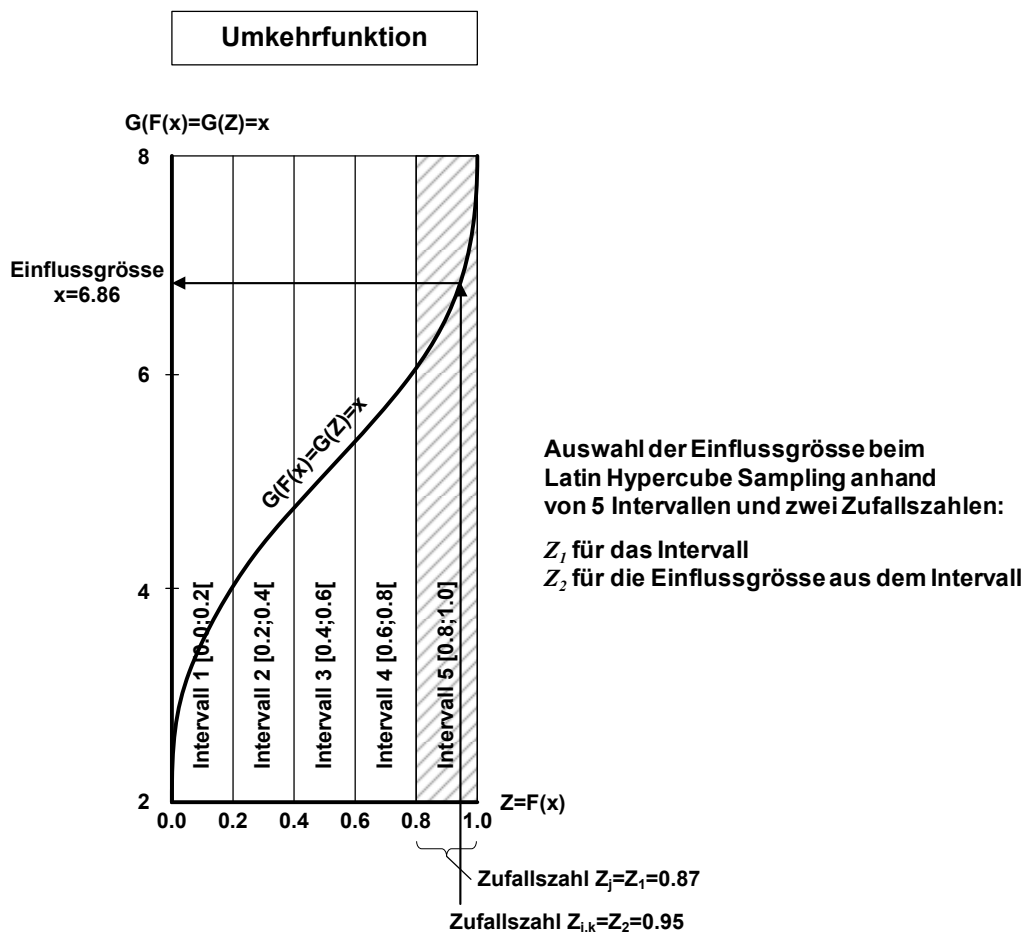


Bild 51: Bestimmung des Eingangsparameters x aus zwei Zufallszahlen mittels Latin Hypercube Sampling (Girmscheid und Busch 2008)

Die Intervallaufteilung über die Umkehrfunktion erfolgt gleichmässig im Gesamtintervall $[0.0;1.0]$. Die unterschiedliche Steigung der Umkehrfunktion führt allerdings dazu, dass die Bereiche der Dichtefunktion mit hoher Wahrscheinlichkeitsdichte, entsprechend der Dichtefunktion öfter gezogen werden, als die mit geringer Wahrscheinlichkeitsdichte (Bild 52). Daher bilden die mit dem Hypercube Sampling Verfahren ermittelten Werte die erwartete Verteilung des Eingangsparameters x optimal ab.

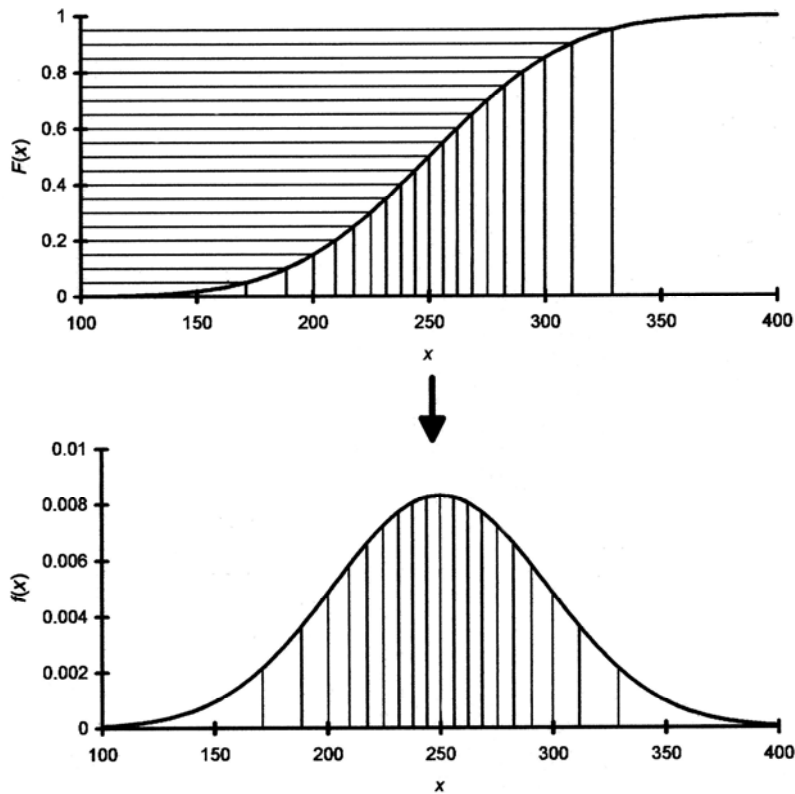


Bild 52: Auswirkung der äquidistanten Intervallaufteilung auf die Ergebnisdichte (Girmscheid und Busch 2008)

In Bild 53 sind die Ergebnisse der Ermittlung der Dichtefunktion einer Einflussgrösse mit der Dreiecksverteilung mit $Min = 0$, $EW = 20$, $Max = 30$ beim Latin Hypercube Sampling und beim Monte Carlo Sampling nach 300 Iterationen gegenübergestellt. Man sieht deutlich, dass die Dichtefunktion der Einflussgrösse beim Latin Hypercube Sampling bereits deutlich abgebildet wurde, wohingegen das originäre Sampling der Monte Carlo Simulation deutliche Löcher und Erhebungen aufweist.

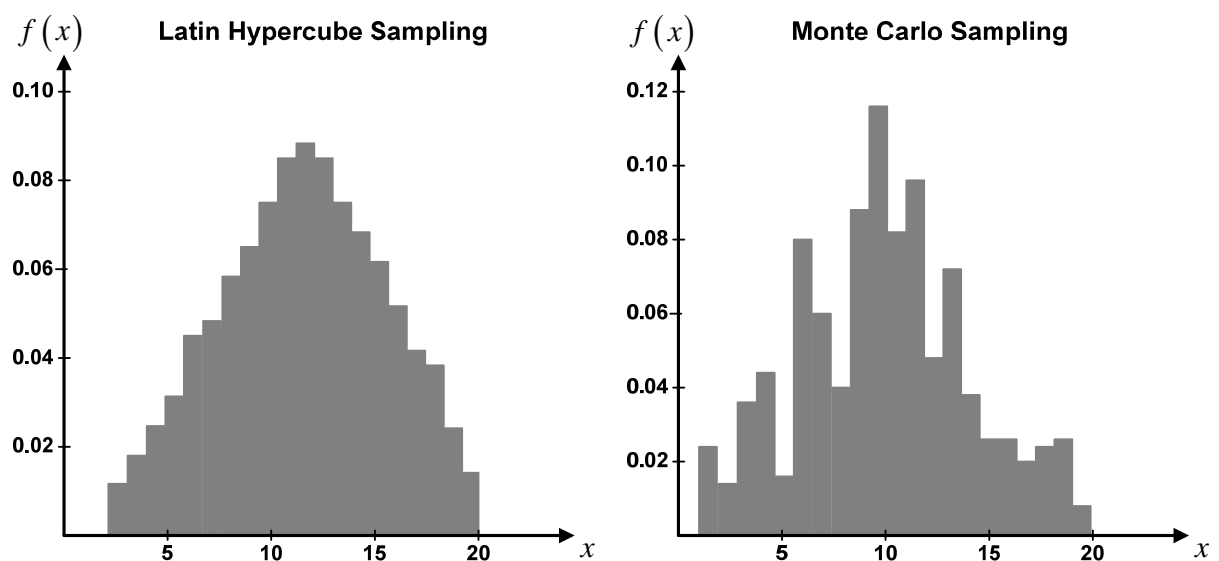


Bild 53: Gegenüberstellung der Genauigkeit von Latin Hypercube Sampling und Monte Carlo Sampling bei der Abbildung einer Dreiecksverteilung (Girmscheid und Busch 2008)

Mit dem Latin Hypercube Verfahren ist also eine deutliche Steigerung der Effizienz der Simulation möglich, da bereits nach relativ wenigen Simulationsläufen eine gute Abbildung einer empirischen Datenbasis erreicht wird.

6.2. Probabilistische Kostenermittlung

Bei der probabilistischen Kostenermittlung werden sämtliche Kostenanteile sowie deren Entwicklungsfaktoren im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilung zufallsverteilt betrachtet. Eine solche Betrachtung hat keinen Einfluss auf die Definition der Erhaltungsvarianten, das heisst auf die Abfolge der Erhaltungsmassnahmen und die Entwicklung des Strassenzustands. Die probabilistische Kostenermittlung erfolgt also ausschliesslich im LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodell, die Definition der Erhaltungsvarianten im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell bleibt davon unberührt.

Grundlage für eine probabilistische Kostenermittlung ist, dass die einzelnen Kostenanteile nicht als fixe Kosten in Höhe ihres Erwartungswertes, sondern mit einer Streubreite im Intervall zwischen Minimum und Maximum definiert und deren Gewichtung innerhalb des jeweiligen Intervalls mittels einer Dichtefunktion betrachtet werden. Diese Angaben können entweder aus statistischen Erhebungen der Vergangenheit, durch Expertenschätzungen oder durch Kostenrechnung der jeweiligen Szenarien z.B. Massnahmenkosten oder Nutzerkosten gewonnen werden.

Die einzelnen Kostenanteile werden dann durch Dichtefunktionen der Kosten dargestellt (Girmscheid 2007b):

$$f(K_t^{i,\chi}) = \Xi(K_{t,min}^{i,\chi}, K_{t,EW}^{i,\chi}, K_{t,max}^{i,\chi}) \quad (49)$$

mit: $f(K_t^{i,\chi}) =$ Dichtefunktion des Kostenanteils i in der Erhaltungsvariante χ im Jahr t

$\Xi =$ (Dreiecksfunktion \vee Beta – Funktion)

$K_{t,min}^{i,\chi} =$ Minimalwert des Kostenanteils i in der Erhaltungsvariante χ im Jahr t

$K_{t,EW}^{i,\chi} =$ Erwartungswert des Kostenanteils i in der Erhaltungsvariante χ im Jahr t

$K_{t,max}^{i,\chi} =$ Maximalwert des Kostenanteils i in der Erhaltungsvariante χ im Jahr t

$i =$ Sämtliche Kostenanteile der Betreiberkosten, Nutzerkosten sowie der Kosten Dritter

Genauso wie die absoluten Werte der einzelnen Kostenanteile unterliegen auch deren Kostenentwicklungsindizes gewissen Unsicherheiten, gleiches gilt für den Diskontierungszinssatz. Diese Parameter des LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodells werden also auch probabilistisch, d.h. unter Berücksichtigung des möglichen Intervalls und der Dichtefunktion, betrachtet. Es gilt also (Girmscheid 2007b):

$$f(\mu KI) = \Xi(\mu KI_{min}, \mu KI_{EW}, \mu KI_{max}) \quad (50)$$

$$f(q) = \Xi(q_{min}, q_{EW}, q_{max}) \quad (51)$$

mit: $f(\mu KI) =$ Dichtefunktion des Kostenentwicklungsindex μKI
 $\mu KI_{min/EW/max} =$ Minimal- / Erwartungs- / Maximalwert des
 Kostenentwicklungsindex der Kostenart μ
 (μ =Baukosten, Strassenbetriebskosten,...)
 $f(q) =$ Dichtefunktion des Diskontierungszinssatzes q
 $q_{min/EW/max} =$ Minimal- / Erwartungs- / Maximalwert des
 Diskontierungszinssatzes q

Die Dichtefunktionen der Eingangsparameter (Kostenanteile, Kostenentwicklungsindizes und Diskontierungszinssatz) ergeben sich, wie in Kapitel 6.1.1 beschrieben durch Integration über den möglichen Bereich der Parameterausprägungen vom Minimal- bis zum Maximalwert.

In jedem Simulationslauf wird dann, je nachdem ob mit dem Monte Carlo Sampling oder dem Latin Hypercube Sampling gearbeitet wird, mithilfe einer oder zweier Zufallszahlen (Z bzw. Z_1 und Z_2) eine mögliche Ausprägung, d.h. ein möglicher Wert innerhalb des Intervalls $[Min, Max]$ der einzelnen Kostenanteile bzw. Kostenentwicklungsindizes sowie des Diskontierungszinssatzes bestimmt. Mit diesen Werten wird mithilfe des LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodells der Kosten-Barwert eines einzelnen möglichen probabilistisch bestimmten Szenarios der betrachteten Erhaltungsvariante bestimmt. Dieses Ergebnis stellt ein Szenario innerhalb der Simulation dar. Mit jedem weiteren Simulationsdurchlauf wird ein weiteres Szenario entwickelt und der zugehörige Kosten-Barwert bestimmt.

Aus der Menge der Ergebnisse der Kosten-Barwertberechnung in den einzelnen Simulationsläufen ergibt sich eine Dichte- und Verteilungsfunktion für den Kosten-Barwert als Gesamtergebnis der probabilistischen Simulation (Girmscheid 2007b).

Dichtefunktion des Kosten-Barwerts nach n Simulationsdurchläufen:

$$f(KBW_{t_B, \delta}^{\chi}) = f(KBW_{t_B, EW}^{\chi}; \sigma_{KBW}^{\chi 2}) \Big|_{\delta < \infty} \quad (52)$$

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

Zeitpunkt t_B

$KBW_{t_B,EW}^\chi =$ Erwartungswert des Kosten-Barwerts der Erhaltungsvariante χ
bezogen auf den Zeitpunkt t_B

$\sigma_{KBW}^{\chi 2} =$ Standardabweichung des Kosten-Barwerts der Erhaltungsvariante χ

Verteilungsfunktion des Kosten-Barwerts nach n Simulationsdurchläufen:

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

In Bild 54 ist die Dichtefunktion $f(KBW_{t_B}^\chi)$ und die Verteilungsfunktion $F(KBW_{t_B}^\chi)$ des Kosten-Barwerts der Erhaltungsvariante χ nach n Simulationsdurchläufen dargestellt.

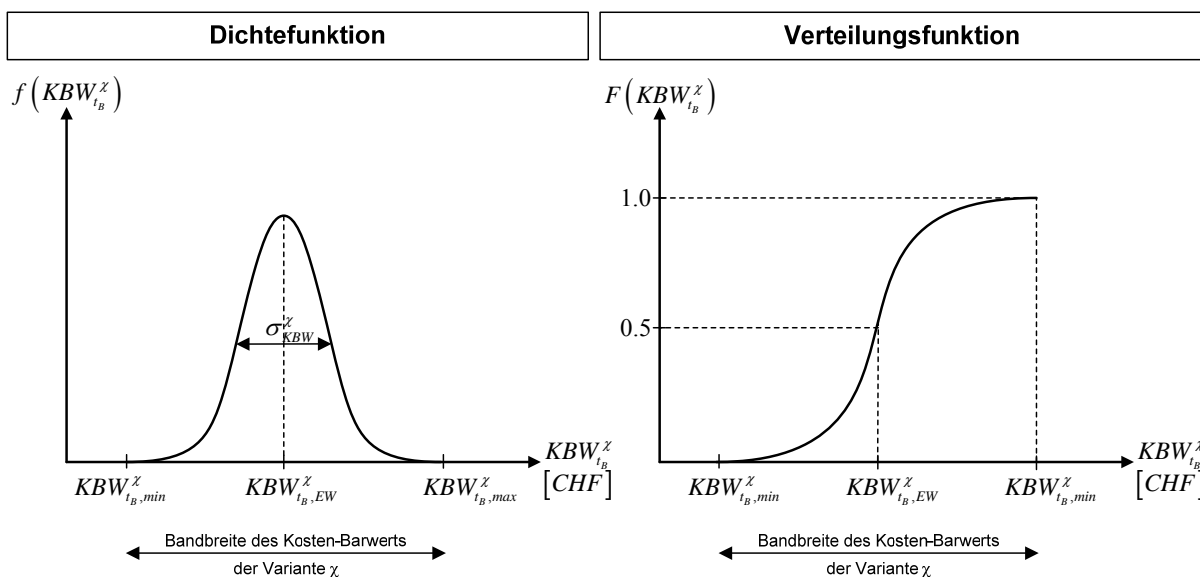


Bild 54: Dichte- und Verteilungsfunktion des Kostenbarwerts $KBW_{t_B}^\chi$ der Erhaltungsvariante χ nach n Simulationsdurchläufen

6.3. Probabilistisches LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell

Im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell werden die Prozesse zur Definition von Erhaltungsvarianten auf der Grundlage einer Erhaltungsstrategie beschrieben. Eine probabilistische Betrachtung auf dieser Ebene bedeutet, dass bei der Definition einer Erhaltungsvariante die Inputparameter des LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodells in Intervallen definiert und mit einer entsprechend Dichtefunktion angesetzt werden. Damit erfolgt nicht nur die kostenmässige Bewertung der Erhaltungsvarianten, sondern auch deren Entwicklung auf einer probabilistischen Basis. Bei der Simulation der verschiedenen Szenarien wird dann in jedem

Simulationsdurchlauf ein neues Szenario der betrachteten Erhaltungsvariante χ entwickelt, das sich nicht nur hinsichtlich der Kosten sowie der Kostenentwicklung und der Entwicklung des Diskontierungszinssatzes, sondern auch hinsichtlich des Zeitpunkts und der Auswahl der Erhaltungsmassnahmen unterscheiden kann.

Bei den Parametern, die in der probabilistischen Definition der Erhaltungsvarianten eine Rolle spielen, ist zu unterscheiden zwischen

- den realen (natürlichen oder anthropogenen) Einflüssen auf das System (Input)
- sowie
- deren Abbildung in den Parametern des LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodells.

6.3.1. Grundlagen der probabilistischen Prognose des Zustands eines Strassennetzes

Zur Ermittlung des Kostenverlaufs über den betrachteten Lebenszyklus der Strasse sowie des dazugehörigen Kosten-Barwerts einer Erhaltungsvariante χ der Strategie Γ , muss zum einen das Verkehrsaufkommen und zum anderen das Zustandsverhalten des Strassenabschnitts oder Netzes ermittelt werden. Die probabilistische Prognose des Zustandsverhaltens beruht

- prospektiv auf der probabilistischen Prognose des Verkehrsaufkommens
- retrospektiv auf Verhaltenskurven vergleichbarer Strassen und Belastungen.

Diese beiden Eingangsgrössen sind Streuungen unterworfen.

6.3.2. Streubreite der retrospektiven Verhaltenskurven

Die Verhaltenskurven bzw. Zustandsverläufe werden retrospektiv empirisch aufgrund von Labor-Insitu-Versuchen oder aufgrund von Messreihen realer Strassen über viele Jahre gewonnen. Die ermittelten Zustandsverläufe aus retrospektivem Datenmaterial (Verkehrsbelastung, Zustandsentwicklung $I_x(t)$, Umwelteinflüsse) werden mittels Regressionskurven mit einer statistischen Streubreite aus der „Messpunktwolke“ gewonnen. Diese statistischen Streubreiten reflektieren

- Schwankungen in der Verkehrsbelastung
- Schwankungen aufgrund wechselnder natürlicher Umweltbelastung
- Schwankungen in der Qualität des Strassenaufbaus bzw. des Strassenbau- und Untergrundmaterials (Bild 55).

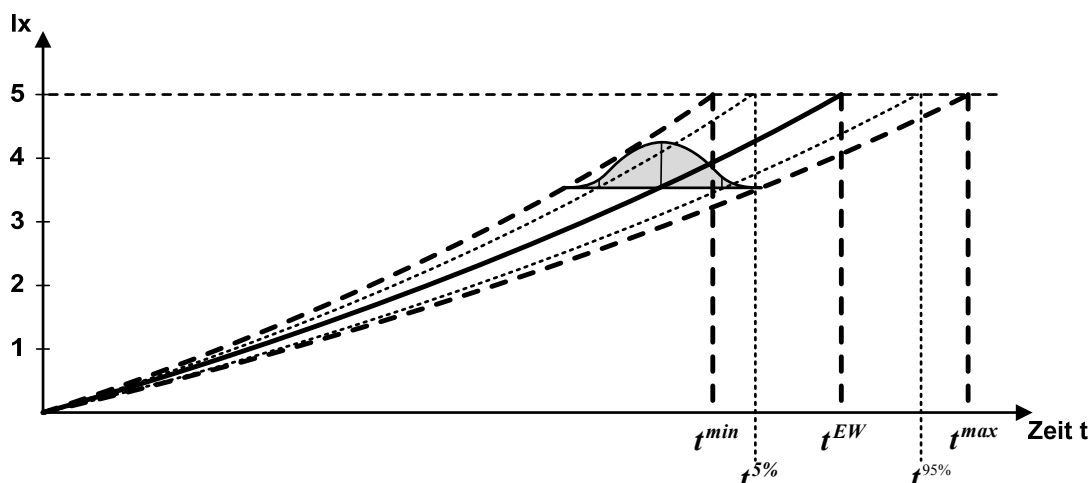


Bild 55: Verhaltenskurven des Strassenzustands und die Streubreite um 5% bzw 95% Fraktile

6.3.3. Streubreite der prospektiven Verkehrsprognose

Das zukünftige Verkehrsaufkommen bzw. die Verkehrsbelastung (Anzahl / Art der Fahrzeuge) muss prospektiv aufgrund sozialer, wirtschaftlicher und verkehrstechnischer Entwicklungsannahmen in Bandbreiten bzw. mit Minimal-, Erwartungs- und Maximalwert prognostiziert werden. Da die Verhaltenskurven nach Verkehrslastklassen mit relativ grossen Intervallen

- T1 – Tägliche äquivalente Verkehrslast: < 30
- T2 – Tägliche äquivalente Verkehrslast: 30-100
- T3 – Tägliche äquivalente Verkehrslast: 100-300
- T4 – Tägliche äquivalente Verkehrslast: 300-1000
- T5 – Tägliche äquivalente Verkehrslast: 1000-3000
- T6 – Tägliche äquivalente Verkehrslast: 3000-10000

unterteilt werden (SN 640324a 1997), muss die zukünftige Verkehrsaufkommensprognose in Verkehrslastklassen aufgeteilt werden.

Da die Verkehrsaufkommensprognose (V_{Bel}) aus 3 Kurvenscharen (V_{Bel}_{Min} , V_{Bel}_{EW} , V_{Bel}_{Max}) besteht, erhält man eine Streubreite für den jeweiligen Zeitpunkt $t^{n/n+1}$ in dem eine Verkehrslastklassenänderung eintritt (Bild 56).

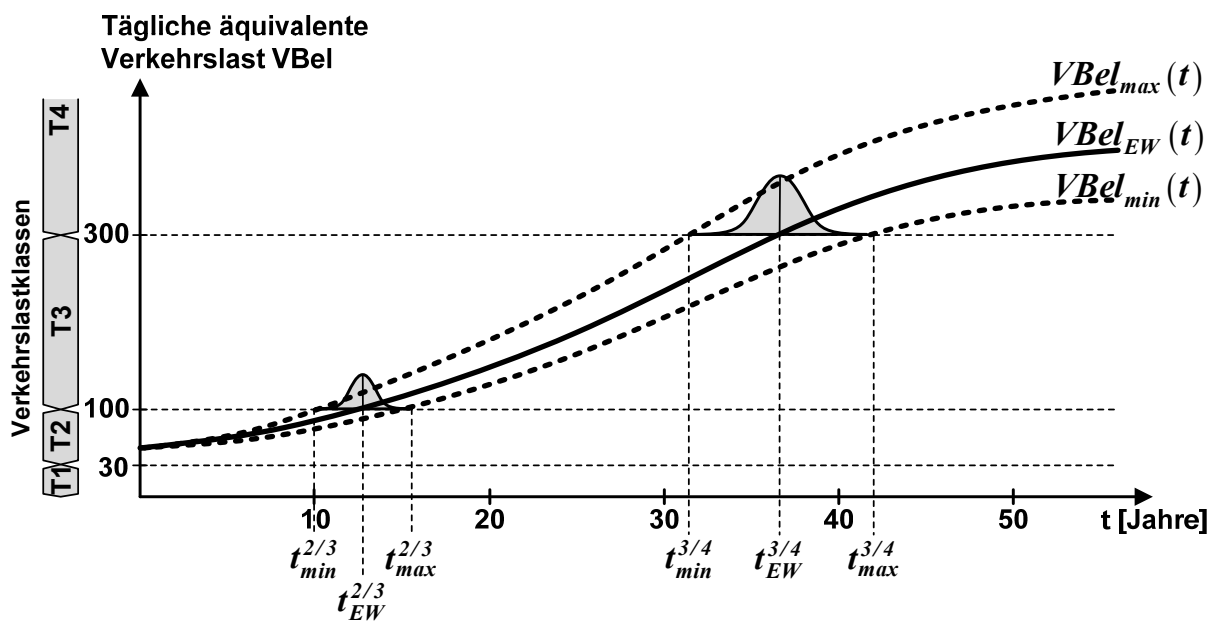


Bild 56: Verkehrsaufkommensprognose

6.3.4. Beurteilung der Prognose des Strassenzustands

Die Zuverlässigkeit der Prognose des Zukünftigen Strassenzustands wird einerseits durch die Streubreite der Verkehrsprognose und der zu erwartenden Streuung des zeitlichen Wechsels in die nächste Verkehrslastklasse $[t_{min}^{n/n+1}, t_{max}^{n/n+1}]$ beeinflusst. Andererseits wird die Zuverlässigkeit der Strassenzustandsprognosen durch die retrospektiv ermittelten Verhaltenskurven und ihre statistische Streubreite beeinflusst.

Beide Einflüsse können sich addieren oder subtrahieren. Damit liegt der Zeitpunkt $t^{m_i^x}$ an dem eine Massnahme notwendig wird in einem Intervall $\left[t_{min}^{m_i^x} \left(VBel_{max}^{min}(t), Ix_{max}^{min}(t) \right), t_{max}^{m_i^x} \left(VBel_{max}^{min}(t), Ix_{max}^{min}(t) \right) \right]$ (Bild 57).

Diese probabilistische Streubreite des Massnahmenzeitpunkts (Bild 57) beeinflusst probabilistisch somit auch den zeitlichen Anfall der deterministischen sowie probabilistischen Massnahmenkosten bzw. diese erhöhen oder verringern die Kosten für die Stakeholder:

- Massnahme - $\left[K_{min}^{B,Massn}, K_{max}^{B,Massn} \right]$
- Stakeholder - $\left[K_{min}^{B/N/D,M-Neben}, K_{max}^{B/N/D,M-Neben} \right], \left[K_{min}^{B/N/D,Betrieb}, K_{max}^{B/N/D,Betrieb} \right]$

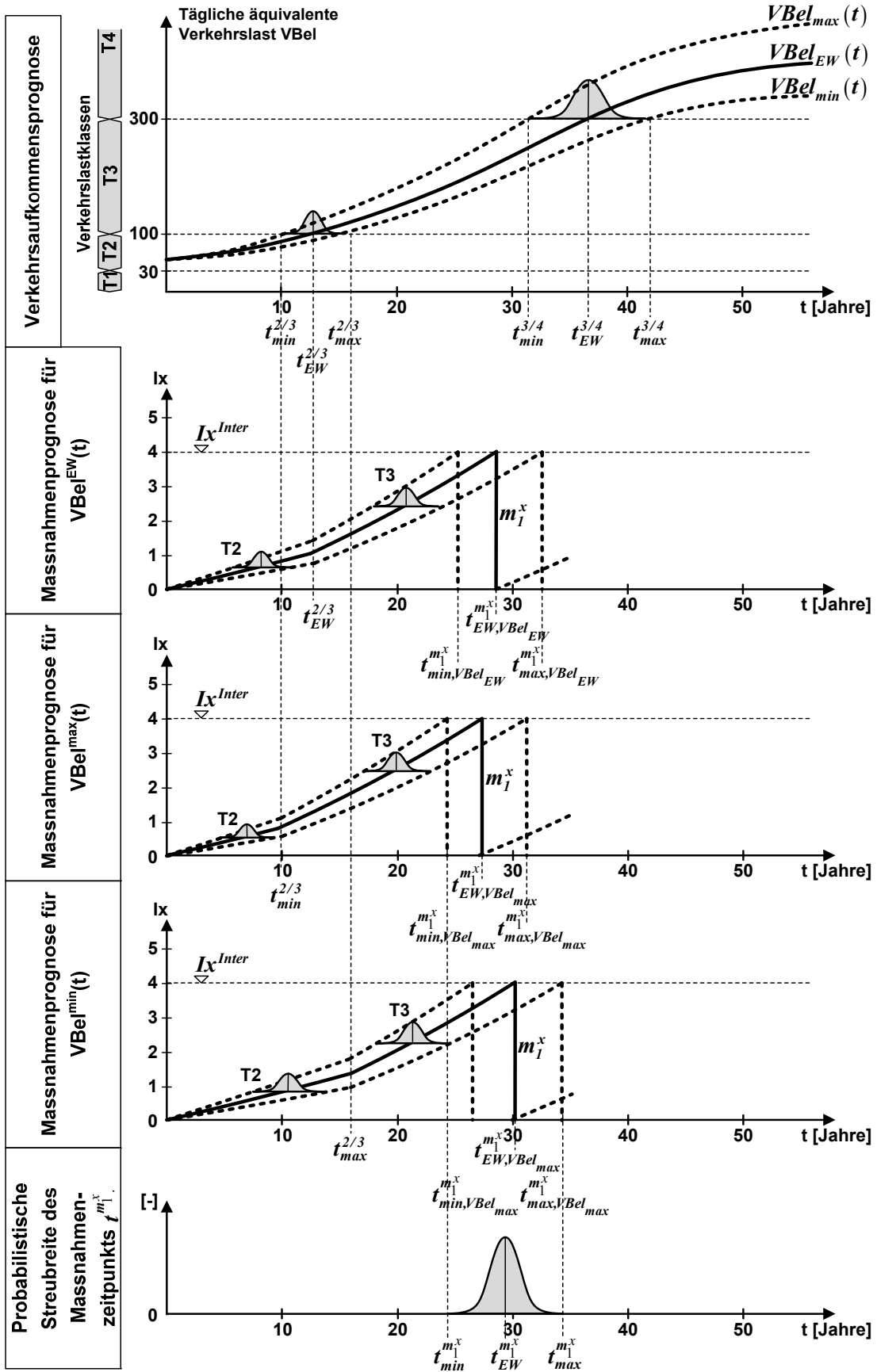


Bild 57: Massnahmenzeitpunkt – Wirkung der Streuung von Verkehrsaufkommensprognose und statistische Streubreite der Verhaltenskurven auf den Massnahmenzeitpunkt

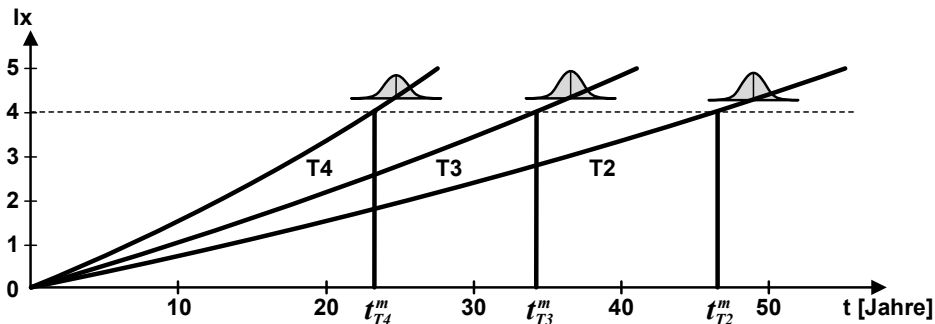


Bild 58: Zustandsverlauf und Massnahmenzeitpunkt in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung

6.3.5. Probabilistisch betrachtete Parameter des LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodells

Die auf der Systemdefinition aufbauenden Modelle, die eine intendierte Aussage über das reale System machen sollen, enthalten stets gewisse Vereinfachungen gegenüber der Systemdefinition, die ein möglichst genaues Abbild der Realität darstellen sollte. Dementsprechend lassen sich auch die oben beschriebenen Unsicherheiten in den Systemparametern nicht alle eins zu eins in die probabilistische Betrachtung im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell übernehmen. Vor allem in Bezug auf die Prognose des Strassenzustands müssen im LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell Zugeständnisse an die vorhandene Datenmenge zur Ableitung der Zustandsentwicklung gemacht werden. Die Prognose kann also nur so genau sein, wie die Qualität der vorhandenen Verhaltensdaten bezüglich Zustandsentwicklung von Strassenbelägen sowie entsprechender Erhaltungsmassnahmen. Da die zur Zeit vorhandene Datenbasis in der Schweiz noch relativ „grob“ ist, d.h. relativ grossen Streubreiten unterworfen ist, können zur Zeit nur relativ „grobe“ Ergebnisse mittels der deterministischen sowie der probabilistische Betrachtung erzielt werden.

Im Einzelnen hat dies folgende Auswirkungen auf die Umsetzung in der probabilistischen Definition der Erhaltungsvarianten:

- Die Verkehrsbelastung wird bei der Vorhersage des Zustandsverlaufs der Strasse in Form von Verkehrslastklassen abgebildet. Diese decken jeweils einen relativ grossen Bereich der Verkehrsbelastung ab, so dass es unwahrscheinlich ist, dass sich die Verkehrslastklasse infolge der zu erwartenden Schwankungen der Verkehrsbelastung ändert. Vielmehr wird meist die komplette Streubreite der Verkehrsbelastung innerhalb einer Verkehrslastklasse liegen. Daher wird die Verkehrslastklasse nicht als eigenständiger probabilistischer Parameter berücksichtigt.
- Analog zur Verkehrsbelastung werden auch die Umwelteinflüsse in einem relativ groben Raster in Form der Höhenlage der Strasse berücksichtigt. Die Bereiche, in denen die Umwelteinflüsse als konstant angesetzt werden, sind allerdings so gross, dass eine Berücksichtigung als probabilistischer Parameter nicht sinnvoll ist.

Aus den beschriebenen Problemen bei der Abbildung der vorhandenen Unsicherheiten in Form von probabilistischen Parametern folgt, dass eine direkte Berücksichtigung dieser Einflüsse nicht möglich ist. Daher werden sämtliche die Zustandsentwicklung betreffenden Unsicherheiten indirekt in den Verlaufskurven des Strassenzustands berücksichtigt. Die schon

in der Definition der Verlaufskurven implizit vorhandenen Unsicherheiten, werden um die Anteile, die sich aus der Verkehrsbelastung und den Umwelteinflüssen ergeben, erhöht. Es wird also mit einer grösseren Streubreite der Verlaufskurven gerechnet und damit die Unsicherheiten bezüglich aller Systemparameter mit einkalkuliert. Daraus ergibt sich eine breitere Streubreite der Verlaufskurven und ein flacherer Verlauf der Dichtefunktion des Strassenzustands. Damit werden zu jedem Zeitpunkt der Betrachtung die Wahrscheinlichkeit einer Abweichung vom Erwartungswert sowie die möglichen Schwankungen grösser.

Die Streubreite der Verlaufskurven wird im probabilistischen LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell in Form von prozentualen Abweichungen δ_x vom Erwartungswert der Zustandsentwicklung abgebildet. Dazu wird für jede Verlaufskurve ein Wert für die maximale prozentuale Abweichung δ_x^{max} von der erwarteten Verlaufskurve aus der Summe der einzelnen Unsicherheitsfaktoren bestimmt (vereinfachend wird in diesem Fall nur von symmetrischen Dichtefunktionen ausgegangen, d.h. die möglichen Abweichungen in beide Richtungen werden gleich gross angenommen).

Für die maximale prozentuale Abweichung vom Erwartungswert bei den einzelnen Zustandsindizes I_x gilt:

$$\delta_x^{max} = \delta_x^{Orig} + \delta_x^{Verkehr} + \delta_x^{Umwelt} \quad [\%] \quad (53)$$

In jedem Szenario ν der Simulation wird innerhalb des Intervalls $[-\delta_x^{max}; +\delta_x^{max}]$ ein Wert δ_x für die Abweichung von der erwarteten Verlaufskurve bestimmt.

Die Abweichung δ_x kann

- für den ganzen Betrachtungszeitraum konstant,
- zwischen zwei Erhaltungsmassnahmen konstant oder
- für einen Zeitraum von c Jahren der Betrachtung konstant

angenommen werden (Bild 59).

Wird die Abweichung für den ganzen Betrachtungszeitraum konstant gehalten, so muss in jedem Szenario ν zur Definition einer möglichen Erhaltungsvariante χ_ν nur einmal zu Beginn ein Wert δ_x für jeden Zustandsindex I_x bestimmt werden. Diese Abweichung vom erwarteten Zustandsverlauf gilt dann für das gesamte Szenario. Die weitere Definition der Erhaltungsvariante verläuft analog zu dem in Kapitel 4 beschriebenen Vorgehen bei der deterministischen Variantendefinition.

Eine realistischere Simulation erhält man, wenn nach jeder Erhaltungsmassnahme ein neuer Wert δ_x für jeden Zustandsindex I_x bestimmt wird. Insbesondere nach umfangreichen Erhaltungsmassnahmen ist eine neue Ausgangssituation gegeben, die einen veränderten Zustandsverlauf wahrscheinlich macht. Zu beachten ist, dass damit nicht ein prinzipiell langsamerer oder schnellerer Verlauf infolge der spezifischen Massnahme erfasst wird, sondern lediglich eine zufällige Schwankung des Verlaufs z.B. infolge einer besseren oder schlechteren Ausführung der Massnahme. Wie in Kapitel 4 beschrieben, kann eine prinzipielle Verän-

derung des Zustandsverlaufs aufgrund fehlender Daten für die Verlaufskurven in den entwickelten Modellen noch nicht berücksichtigt werden.

Die realistischste Betrachtung ergibt die Differenzierung pro Jahr bzw. in Intervallen von c Jahren, da sich Inputparameter wie Verkehrsbelastung und Umwelteinflüsse in relativ kurzen Zeitabschnitten ändern können. Allerdings führt diese Betrachtung auch zu einem erheblichen Rechenaufwand, da in jedem Szenario ν jeweils für jedes Jahr neue Werte δ_x bestimmt werden müssen, die dann den weiteren Zustandsverlauf beeinflussen.

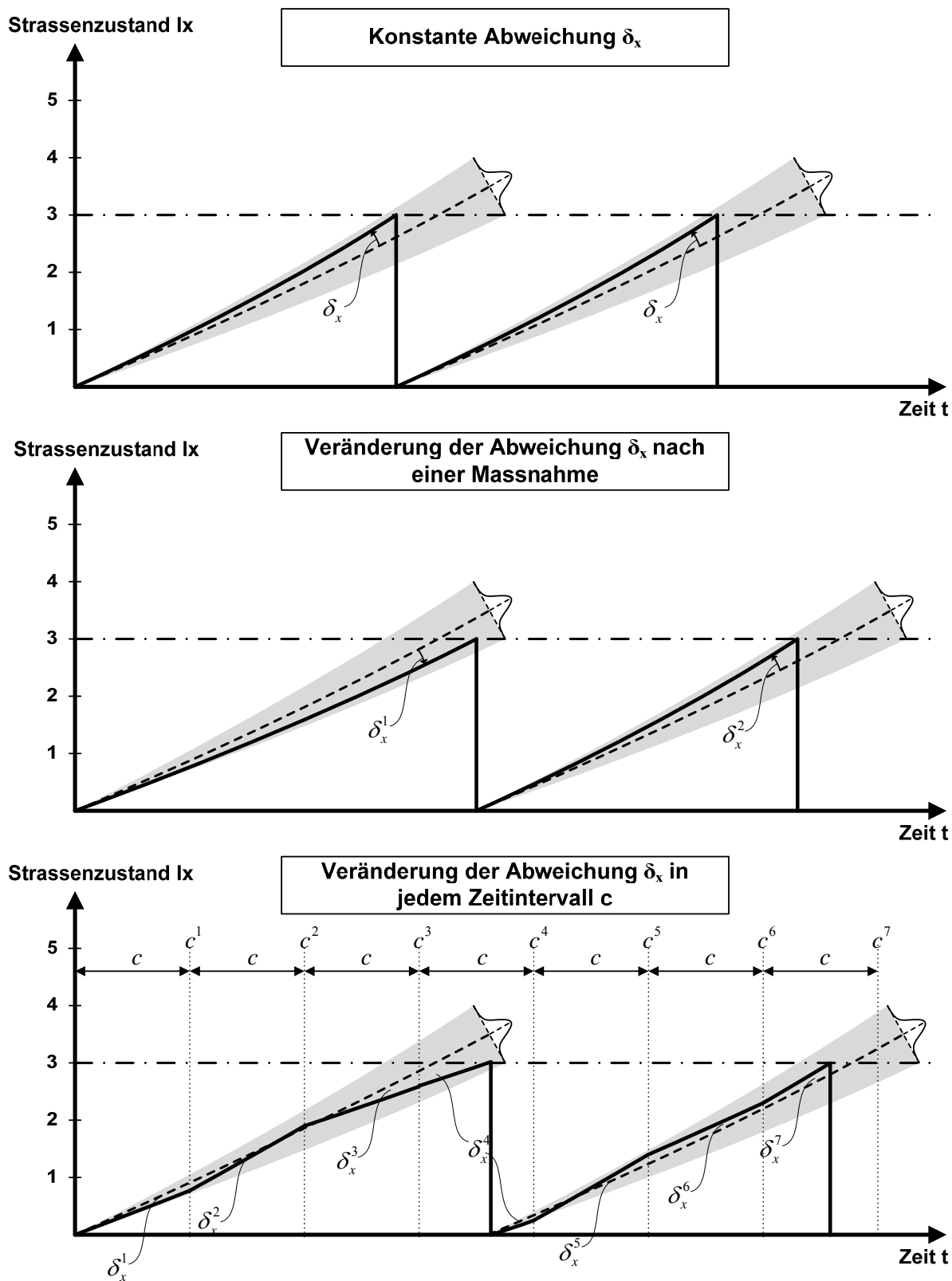


Bild 59: Entwicklung des Strassenzustands bei konstanter, zwischen zwei Massnahmen konstanter und auf einem Intervall c konstanter Abweichung δ_x vom erwarteten Zustandsverlauf

Die probabilistisch ermittelten Verlaufskurven $I_x(t)$ des Strassenzustands werden wie folgt in Abhängigkeit von δ_x angegeben:

Bei über dem Betrachtungszeitraum bzw. zwischen zwei Massnahmen konstanten δ_x :

$$I_x(t) = f^{I_x}(t) \cdot \delta_x \quad (54)$$

Wird für jedes Zeitintervall c^i ein neuer Wert δ_x ermittelt, so wird der Strassenzustand im Zeitintervall c^i rekursiv aus dem Strassenzustand des vorherigen Zeitintervalls c^{i-1} bestimmt:

$$I_x(t) = f_v^{I_x}(c^{i-1}) + (f_{EW}^{I_x}(t) - f_{EW}^{I_x}(c^{i-1})) \cdot \delta_x^i \quad \text{mit} \quad i = \left\{ i \in \mathbb{Z} \mid i = \max i \left(\left\lfloor \frac{t}{c \cdot i} \right\rfloor \geq 1 \right) \right\} \quad (55)$$

Für die Streubreite des Strassenzustands im Zeitpunkt t gilt also:

$$I_x(t) \in [I_x^{Min}(t); I_x^{Max}(t)] = [I_x^{EW}(t) \cdot (100 - \delta_x^{max}); I_x^{EW}(t) \cdot (100 + \delta_x^{max})]$$

6.3.6. Betrachtungszeitraum der probabilistischen Betrachtung

Der Betrachtungszeitraum einer probabilistischen Betrachtung entspricht prinzipiell dem einer deterministischen Betrachtung wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben. Allerdings kann die Variabilität des Zustandsverlaufs dazu führen, dass Erhaltungsmassnahmen in den einzelnen Simulationläufen früher oder später eingeplant werden müssen. Vor allem wenn lediglich die Verschiebung einer einzelnen Massnahme und damit ein kurzer Betrachtungszeitraum betrachtet wird, kann dies Einfluss auf die sinnvolle Wahl des Betrachtungszeitraums haben (siehe Kapitel 4.3.2). Da aber in eine Wirtschaftlichkeitsanalyse stets nur Varianten mit gleichem Betrachtungszeitraum gegenübergestellt werden können, muss in jedem Fall ein fester Anfangs- und Endzeitpunkt festgelegt werden. Diese Zeitpunkte sind dann allerdings so zu wählen, dass in allen möglichen Fällen der Simulation (d.h. auch bei spätest möglicher Umsetzung der Massnahmen) sämtliche relevanten Erhaltungsmassnahmen in den Betrachtungszeitraum fallen.

7. Auswirkungen zeitlicher Verschiebungen von Erhaltungsmaßnahmen

Eine zeitliche Verschiebung einer Erhaltungsmaßnahme kann sowohl eine Verschiebung auf einen früheren Zeitpunkt, als auch eine Verschiebung auf einen späteren Zeitpunkt bedeuten. Beide Fälle sollten, vorausgesetzt die Basisvariante stellt den optimalen Fall dar, eine Erhöhung der Kosten zur Folge haben. Im Folgenden wird systematisch auf die jeweiligen Mechanismen der Zusatzkostenentstehung bei den einzelnen Kostengruppen der drei Stakeholdergruppen eingegangen.

7.1. Mechanismen der Entstehung von Zusatzkosten

Die durch eine Verschiebung einer oder mehrerer Massnahmen hervorgerufenen Zusatzkosten bestehen aus mehreren Komponenten, denen jeweils andere Mechanismen der Kostenentstehung zugrunde liegen. Prinzipiell ist davon auszugehen, dass durch die Verschiebung einer Erhaltungsmaßnahme, die ja zum optimalen Zeitpunkt eingeplant sein sollte, erhöhte Kosten entstehen. Dies gilt allerdings nur für die Summe der Kosten und muss nicht für alle Kostenanteile zutreffen. Einzelne Kostenanteile können durch eine Verschiebung einer Erhaltungsmaßnahme durchaus geringer werden, so dass in diesem Fall negative Zusatzkosten entstehen.

Im Folgenden werden die Zusatzkosten getrennt nach den Kostenanteilen der einzelnen Stakeholdergruppen betrachtet, ausserdem wird - analog zu Kapitel 5 - differenziert nach Kosten im normalen Betrieb und Kosten während einer Erhaltungsmaßnahme.

7.1.1. Betreiberkosten

Die Betreiberkosten teilen sich auf in die Massnahmekosten der durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen und die Betriebskosten des Strassenunterhalts. Eine Verschiebung einer Massnahme beeinflusst beide Kostengruppen.

Massnahmekosten

Bezüglich der Auswirkungen einer Verschiebung einer Massnahme sind drei grundsätzliche Fälle zu unterscheiden:

- Zum verschobenen Zeitpunkt kann dieselbe Massnahme, eventuell in anderem Umfang, ausgeführt werden.
- Durch die Verschiebung wird eine umfangreichere Massnahme notwendig.
- Durch die Verschiebung kann eine geringfügigere Massnahme gewählt werden.

Die Anwendbarkeit einer Massnahme wird durch den im Projekt *Standardisierte Erhaltungsmaßnahmen* (Bild 33) festgelegten Anwendungsbereich vorgegeben. Zusammen mit dem

prognostizierten Verlauf des Strassenzustands ergibt sich daraus das Zeitfenster, in dem mit einer bestimmten Erhaltungsmassnahme m_i^x gearbeitet werden kann (Bild 60). Eine weitere Verschiebung der Erhaltungsmassnahme m_i^x über die Grenzen dieses Zeitfensters macht entweder eine umfangreichere oder eine geringfügigere Erhaltungsmassnahme erforderlich.

Da sich die Anwendungsbereiche verschiedener standardisierter Erhaltungsmassnahmen überschneiden, kann es aber sein, dass die ursprünglich geplante Erhaltungsmassnahme bei einer Verschiebung innerhalb des möglichen Zeitfensters zwar noch anwendbar wäre, eine andere Erhaltungsmassnahme dann aber einen grösseren Nettonutzen hat. Es sollten also jeweils alle anwendbaren Erhaltungsmassnahmen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit im konkreten Fall überprüft werden.

In Bild 60 sind neben dem Anwendungsbereich einer Massnahme m_i^x und dem sich daraus ergebenden Zeitfenster für die Ausführung dieser Massnahme auch die Auswirkungen einer Verschiebung auf die direkten Massnahmekosten und die Gesamtmassnahmekosten dargestellt. Die direkten Massnahmekosten entsprechen den Kosten, die unmittelbar durch die betrachtete Massnahme anfallen. Die Gesamtmassnahmekosten entsprechen der Summe der Massnahmekosten über den Betrachtungszeitraum.

Differenziert nach den oben dargestellten drei Fällen ergeben sich die folgenden Auswirkungen einer Verschiebung (Bild 60):

- Verschiebung der Massnahme m_i^x innerhalb des Anwendungsbereichs $[I_x^{min}; I_x^{max}]$

ergibt aufgrund des Zustandsverlaufs ein Anwendungsfenster von $(t_{min}^{m_i^x} \leq t^{m_i^x} \leq t_{max}^{m_i^x})$:

In diesem Fall bleiben die direkten Massnahmekosten konstant, da die Massnahme m_i^x unverändert ausgeführt werden kann.

Bei einer späteren Ausführung bleiben die Kosten der Massnahme konstant, es wird aber durch die Verschiebung Zeit gewonnen, in der die Strasse weiter betrieben werden kann, ohne dass investiert werden muss. Dies bewirkt eine Verringerung der Gesamtmassnahmekosten über den Betrachtungszeitraum aufgrund der Verringerung der Anzahl von Massnahmen.

- Aufschiebung der Massnahme über die Anwendungsgrenze I_x^{max} bzw. die Grenze $t_{max}^{m_i^x}$ der Anwendbarkeit der Massnahme m_i^x hinaus $(t^{m_i^x} > t_{max}^{m_i^x})$:

In diesem Fall ist die Massnahme m_i^x nicht mehr anwendbar und es wird eine umfangreichere Massnahme nötig. Daher steigen die direkten Massnahmekosten zunächst sprunghaft an.

Der Einfluss der Verschiebung auf die Gesamtmassnahmekosten hängt davon ab, welchen Einfluss die ursprünglich geplante bzw. die nach der Verschiebung nötige umfangreichere Massnahme auf den Strassenzustand haben. Entscheidend ist das Verhältnis von Mehraufwand für die umfangreichere Massnahme zu der eventuell grösseren Verbesserung des Strassenzustands durch diese Massnahme. Es kann also zunächst zu einer Erhöhung oder zu einer Verringerung der Gesamtmassnahmekosten kommen.

Wenn die ursprünglich geplante Massnahme die optimale Massnahme darstellt, so ist davon auszugehen, dass sich die Gesamtmassnahmekosten bei Ausführung einer anderen Massnahme erhöhen; diese Annahme wurde in Bild 60 getroffen.

Bei einem weiteren Aufschub bleiben die direkten Massnahmekosten zunächst konstant, die Gesamtmassnahmekosten verringern sich bei einem weiteren Aufschub, ausgehend von ihrem neuen Niveau, entsprechend dem oben beschriebenen Mechanismus, bis wiederum eine noch umfangreichere Massnahme nötig wird.

- Vorschub der Massnahme m_i^x vor die Grenze I_x^{Inter} und die Grenze der Anwendbarkeit der Massnahme m_i^x $[I_x^{min}; I_x^{max}]$ im Zeitfenster $t^{m_i^x} < t_{min}^{m_i^x}$:

In diesem Fall kann eine weniger umfangreiche Massnahme gewählt werden, da der Strassenzustand noch auf einem besseren Niveau ist. Daher verringern sich die direkten Massnahmekosten bei einem Vorschub vor die Grenze $t_{min}^{m_i^x}$ um die Kostendifferenz zwischen der ursprünglich geplanten und der dann ausgeführten Massnahme.

Wie beim Aufschub einer Massnahme über die Grenze $t_{max}^{m_i^x}$ hinweg, kann die Auswirkung eines solchen Vorschubs auf die Gesamtmassnahmekosten nicht allgemein geklärt werden. In diesem Fall ist das Verhältnis von geringerem Aufwand für die neue Massnahme zu dem wahrscheinlich auch geringeren Einfluss dieser Massnahme auf den Strassenzustand entscheidend dafür, ob die Gesamtmassnahmekosten steigen oder sinken.

Wenn die ursprünglich geplante Massnahme die optimale Massnahme darstellt, so ist davon auszugehen, dass sich die Gesamtmassnahmekosten bei Ausführung einer anderen Massnahme erhöhen; diese Annahme wurde in Bild 60 getroffen.

Bei einem weiteren Vorschub bleiben die direkten Massnahmekosten konstant, die Gesamtmassnahmekosten steigen ausgehend von ihrem neuen Niveau an.

Bei einer isolierten Betrachtung der Massnahmekosten ohne Berücksichtigung des intendierten Nutzens gemäss der festgelegten Erhaltungsstrategie ist also jeweils der spätest mögliche Zeitpunkt der Ausführung einer Massnahme ideal. Eine frühere Ausführung führt ebenso zu Zusatzkosten wie ein weiterer Aufschub, der dann eine umfangreichere Massnahme erforderlich macht.

Sobald der Zeitpunkt des Eingreifens über das Zeitfenster, das dem Anwendungsbereich der Massnahme entspricht hinaus verschoben wird, und damit eine andere Massnahme erforderlich wird, ist mit erhöhten Massnahmekosten zu rechnen. Wird der Zeitpunkt des Eingreifens so weit nach vorne verschoben, dass eine Massnahme mit geringerem Umfang möglich wird, verringern sich die Massnahmekosten zunächst. Es ist allerdings in beiden Fällen zu beachten, dass dies sowohl zu einer Erhöhung, als auch zu einer Verringerung der Gesamtmassnahmekosten führen kann.

Zusammenfassung:

Wird die Interventionsgrenze I_x^{Grenz} für eine gewählte optimale Erhaltungsstrategie nach dem ökonomischen Minimalprinzip:

- a. unterschritten, so erhöhen sich die Gesamtmassnahmenkosten über den Betrachtungszeitraum und die Stakeholderkosten trotz zunächst geringerer Kosten der einzelnen Massnahmen, zudem ist der Nutzengewinn meist gering.

- b. überschritten, so verringern sich die Massnahmekosten jedoch reduziert sich auch der Nutzen der Verkehrsanlage.

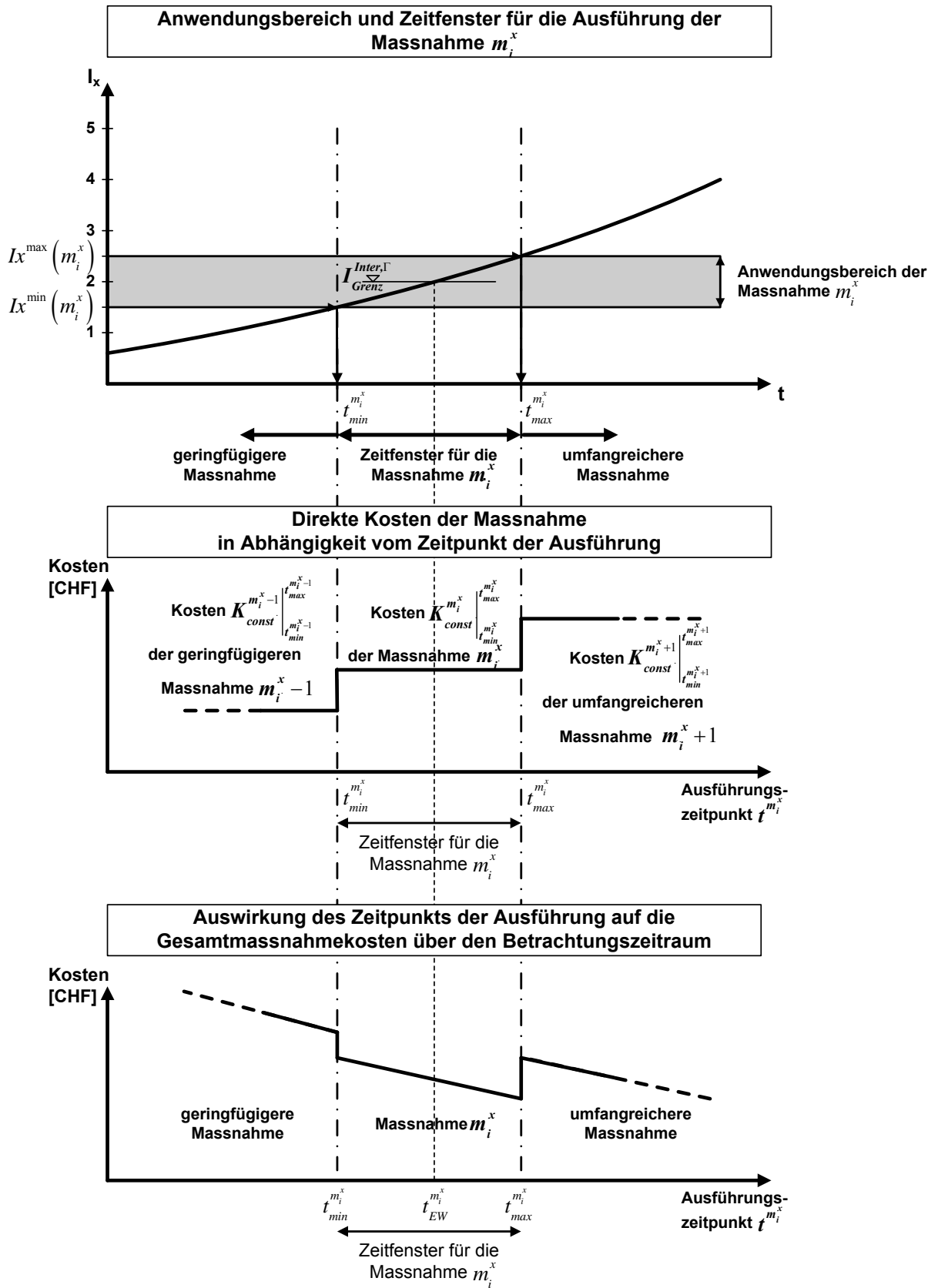


Bild 60: Ableitung des möglichen Zeitfensters einer Erhaltungsmassnahme aus deren Anwendungsbereich und dem prognostizierten Verlauf des Strassenzustands

Betriebskosten

Die Betriebskosten des Strassenbetreibers hängen direkt vom Strassenzustand ab, wobei sich bei zunehmender Verschlechterung des Strassenzustands eine überproportionale Zunahme der Betriebskosten ergibt (siehe Kapitel 5.2.1). Dementsprechend führt jeder Aufschub einer Massnahme zu Zusatzkosten bei den Betriebskosten, da mit dem sich verschlechternden Strassenzustand die Kosten entsprechend ansteigen. Umgekehrt führt ein Vorschub zu einer Reduktion der Betriebskosten.

Die Höhe der Zusatzkosten hängt von dem Zustandsniveau ab, bei dem die Massnahme eingeplant war. Je schlechter das Zustandsniveau ist, desto grösser sind die Änderungen der Betriebskosten bei einer Verschiebung.

7.1.2. Nutzerkosten

Die Nutzerkosten setzen sich aus den Kostengruppen Zeitkosten, Fahrzeugbetriebskosten und Unfallkosten zusammen. Diese hängen alle vom Strassenzustand ab und steigen mit schlechter werdendem Strassenzustand an, so dass sich jeweils bei einem Aufschub einer Massnahme höhere Nutzerkosten einstellen, bei einem Vorschub verringern sich die Nutzerkosten. Diese Effekte sind jedoch meist kaum merkbar, da bis zu einem bestimmten Nutzenniveau I_x^{Grenz} die Nutzerkosten relativ konstant sind.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Kostengruppen der Nutzerkosten eingegangen.

Zeitkosten

Bei den Zeitkosten der Nutzer ist zu unterscheiden zwischen Zeitverlusten infolge eines schlechten Strassenzustands und damit geringerer gefahrener Geschwindigkeit und den Zeitverlusten infolge Stau im Baustellenbereich.

Im zugrundeliegenden Kostenmodell hängt die gefahrene Geschwindigkeit und damit auch die Zeitkosten hauptsächlich von der Längsebenheit (I_2) ab. Eine Auswirkung auf die Zeitkosten ergibt sich bei der Verschiebung einer Massnahme also nur dann, wenn diese eine Änderung des Index I_2 bewirkt oder wenn durch vermehrte kleinere Massnahmen Leistungs- bzw. Verkehrseinschränkungen für den Nutzer entstehen. Ansonsten bleiben die Zeitkosten vom Zeitpunkt der Ausführung unbeeinflusst. Die gefahrene Geschwindigkeit hängt im Modell von vom Index I_2 ab, d.h. mit dem Aufschub einer Massnahme entstehen proportional zur Entwicklung des Index I_2 Zusatzkosten für die Nutzer, ein Vorschub hat den umgekehrten Effekt. Allerdings ist zu beachten, dass ein Einfluss des Strassenzustands auf die gefahrene Geschwindigkeit, insbesondere bei der gegebenen Geschwindigkeitsbeschränkung in der Schweiz, erst bei sehr schlechtem Strassenzustand auftritt und die Verschiebung einer Massnahme damit in den meisten Fällen keinen Einfluss auf die Gesamtkosten einer Erhaltungsvariante hat.

Die Zeitverluste infolge Stau verändern sich nur unwesentlich durch eine Verschiebung einer Massnahme, da sich lediglich der Zeitpunkt der Verkehrsbehinderung ändert. Allerdings kann eine sehr viel umfangreichere oder eine weniger umfangreiche Massnahme zu einer Änderung der Behinderungsdauer und damit zu einer Änderung der Zeitkosten führen.

Fahrzeugbetriebskosten

Bei den Fahrzeugbetriebskosten spielen drei Einflüsse eine Rolle, die zu entgegengesetzten Wirkungen auf die Nutzerkosten führen können. Mit einer Verschlechterung des Strassenzustands entstehen:

- Verringerte Treibstoffkosten aufgrund der geringeren gefahrenen Geschwindigkeit
- Erhöhtes Staupotential durch geringere Leistungsfähigkeit bei hoch ausgelasteten Strassen (erhöhte Treibstoffkosten)
- Erhöhte leistungsabhängige Fahrzeugbetriebskosten aufgrund der höheren Belastung der Fahrzeuge
- Erhöhte zeitabhängige Fahrzeugbetriebskosten aufgrund der erhöhten Reisezeit infolge geringerer Geschwindigkeit

Die Entwicklung der Treibstoffkosten und der zeitabhängigen Fahrzeugbetriebskosten hängt von der gefahrenen Geschwindigkeit ab. Zu beachten ist allerdings, dass diese beiden Kostengruppen stets gegensätzlich wirken. Eine geringere Geschwindigkeit führt auf der einen Seite zu einer Verringerung der Treibstoffkosten (ausser bei Staus), auf der anderen Seite zu einer Erhöhung der zeitabhängigen Fahrzeugbetriebskosten.

Für die Entwicklung der gefahrenen Geschwindigkeit in Abhängigkeit von einer Verschiebung einer Massnahme gelten dieselben Mechanismen wie sie bei den Zeitkosten beschrieben wurden, d.h. sie ist hauptsächlich abhängig vom Index I2, ein Einfluss tritt aber erst bei sehr schlechten Zustandswerten auf.

Die leistungsabhängigen Fahrzeugbetriebskosten hängen ebenfalls linear von der Längsebenheit I2 ab, was dazu führt, dass jede Veränderung des Index I2 auch zu einer Veränderung der Fahrzeugbetriebskosten führt.

Insgesamt überwiegen bei den Fahrzeugbetriebskosten bei einer Verschlechterung des Strassenzustands immer die kostenerhöhenden Faktoren. Die Einsparungen bei den Treibstoffkosten wirken dem nur geringfügig entgegen besonders dann, wenn vermehrt Staus durch den verschlechterten Zustand entstehen. Daher entstehen bei einem Aufschub einer Massnahme immer Zusatzkosten für die Nutzer, bei einem Vorschub fallen geringere Kosten an.

Unfallkosten

Die Unfallkosten hängen im gewählten Modell stark von der Griffigkeit (I4) ab (siehe Kapitel 5.2.2). Es ist also auch hier zunächst zu unterscheiden in Massnahmen, die den Index I4 beeinflussen und Massnahmen die keinen Einfluss auf diesen Index haben.

Da die Unfallkosten bei einer Verschlechterung des Strassenzustands überproportional ansteigen, führt ein Aufschub einer Massnahme immer zu einer deutlichen Erhöhung der Unfallkosten. Umgekehrt führt Vorschub zu einer Verringerung der Unfallkosten. Die Unfallkosten haben in den durchgeführten Beispielrechnungen einen deutlichen Einfluss auf die Zusatzkosten einer Massnahmenverschiebung (siehe Anhang, Beispiel 1) obwohl die im Beispiel zugrundegelegte I4-Funktion relativ flach verläuft (Bild 63).

7.1.3. Kosten Dritter

Die Kosten Dritter setzen sich aus Umweltkosten (Lärmbelastung, Luftverschmutzung und Klimaeffekten) und Unfallkosten zusammen.

Sämtliche Komponenten der Umweltkosten hängen von der Fahrzeuggeschwindigkeit ab. Eine Verschlechterung des Strassenzustands führt zu einer Verringerung der möglichen Geschwindigkeit und damit auch zu einer Verringerung der Umweltkosten.

Die von Dritten zu tragenden Unfallkosten stellen einen Anteil der gesamten Unfallkosten dar. Sie verhalten sich also bei einem Vor- oder Aufschub einer Massnahme analog zu den Unfallkosten der Nutzer (siehe oben).

Insgesamt wirken also bei den Kosten Dritter zwei Effekte einander entgegen. Bei einem Aufschub einer Massnahme erhöhen sich die Unfallkosten, was zu Zusatzkosten führt, während sich die Umweltkosten verringern. Bei einem Vorschub einer Massnahme ändern sich jeweils die Vorzeichen.

7.2. Zusammenfassung

Die Betrachtung der einzelnen Kostengruppen und der Mechanismen der Zusatzkostenentstehung (siehe Kapitel 7.1) zeigt, dass je nach Ausgangssituation und je nach betrachteter Massnahme deutlich unterschiedliche Auswirkungen einer Verschiebung zu beobachten sind. Es gibt jeweils Kostengruppen, bei denen durch eine Verschiebung Zusatzkosten entstehen, Kostengruppen, die unbeeinflusst bleiben aber auch Kostengruppen bei denen es zu einer Verringerung der Kosten kommt (negative Zusatzkosten). Welcher Einfluss überwiegt hängt daher stark vom betrachteten Einzelfall ab.

Die Grösse der Einflusses einer Verschiebung auf die Entwicklung der Kosten in einer Kostengruppe hängt zum einen von der Entwicklung der für die Kostenentwicklung ausschlaggebenden Zustandsindizes, zum anderen von der Entwicklung der Kosten in Abhängigkeit von den einzelnen Zustandsindizes ab (Bild 61). Eine exponentielle Entwicklung des Strassenzustands sowie eine exponentielle Entwicklung der Kosten in Abhängigkeit vom Strassenzustand führt zu einer sehr grossen Erhöhung der Kosten im Falle eines Aufschubs einer Massnahme, da in beide die Kosten beeinflussenden Parameter überproportional ansteigen. Umgekehrt führt in diesem Fall ein Vorschub zu einer sehr geringen Verringerung der Kosten, da hier beide Parameter in einen Bereich mit sehr geringer Steigung kommen und sich daher zunehmend langsamer verändern. Die übrigen in Bild 61 dargestellten Fälle einer linearen Entwicklung sowie einer logarithmischen Entwicklung und deren mögliche Kombinationen ergeben sich analog hierzu.

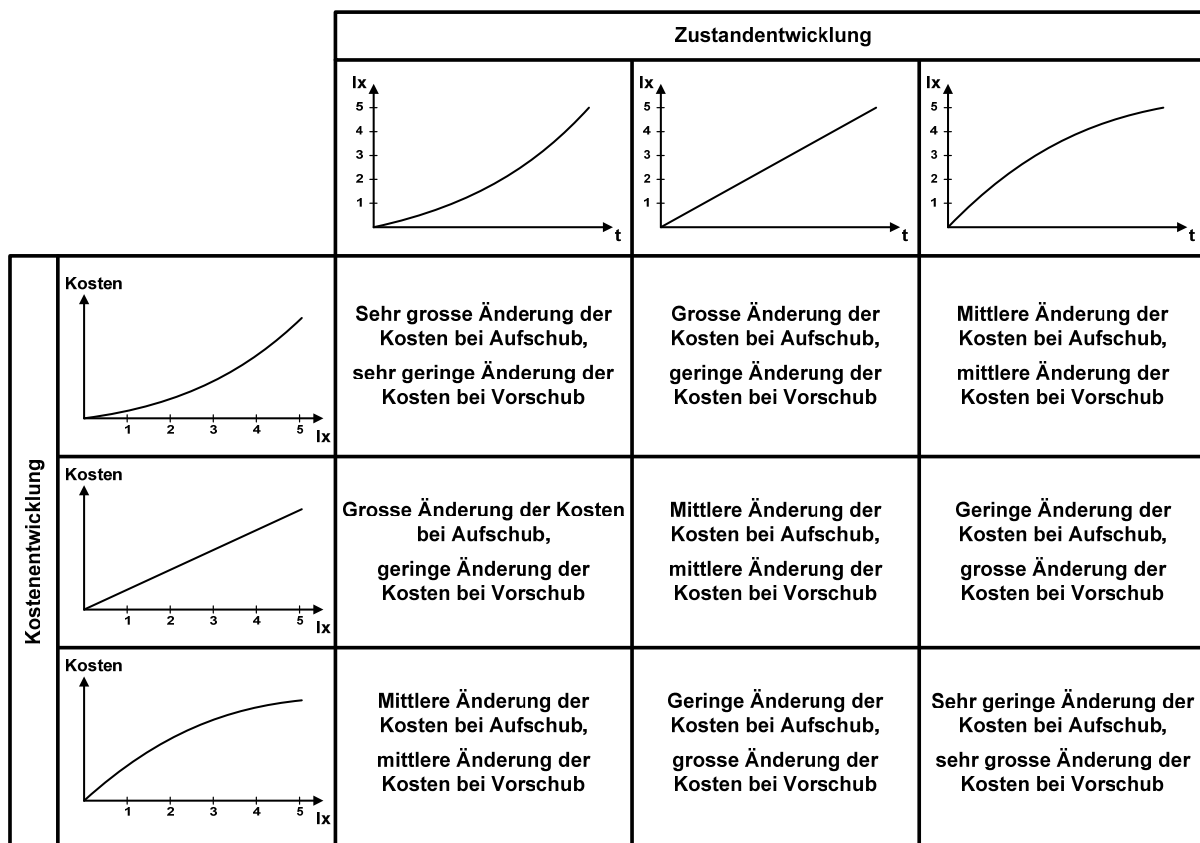


Bild 61: Grössenordnung der zu erwartenden Änderung der Kosten in einer Kostengruppe in Abhängigkeit von der Entwicklung der massgeblichen Zustandsindizes sowie der Entwicklung der Kosten in Abhängigkeit von diesen Indizes

Die Tatsache, dass sich die einzelnen Kostengruppen sehr unterschiedlich entwickeln können zeigt auch, dass eine Aussage allein aufgrund der Gesamtsumme der Zusatzkosten wenig aussagekräftig ist. Eine Differenzierung zumindest auf Stakeholderebene liefert hier wichtige Zusatzinformationen (siehe auch Anhang: Beispiel 1).

Allgemein kann gesagt werden, dass es für den Strassenbetreiber meist ideal ist, die Massnahmen so spät wie möglich innerhalb ihres Anwendungsbereichs auszuführen. Dies führt jedoch zur Reduzierung des Nutzens, den ein Verbindungsabschnitt oder Netz erzeugen soll. Daher erhöhen sich potentiell die Kosten für Nutzer und Dritte. Welcher Einfluss überwiegt ist im Einzelfall zu prüfen. Da die Strasse, der Verbindungsabschnitt bzw. das Netz nur erstellt wurde / wird um einen volkswirtschaftlichen Nutzen zu erzeugen, ist eine rein betreiberorientierte Kostenminimierung nicht nutzenorientiert. In diesem Zusammenhang sollte der Strassenbetreiber die Kosten der Nutzer und der Dritten in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse ausreichend berücksichtigen (siehe Kapitel 5.3).

Anhang – Berechnungsbeispiele

Die Grundlage für die Entwicklung von Anwendungsbeispielen zu den entwickelten Modellen bilden die im Einzelprojekt 2 *Schadensprozesse und Zustandsverläufe* (Scazziga 2008) entwickelten Verlaufskurven des Strassenzustands. In Bild 62 und Bild 63 sind die allgemeinen Verlaufskurven der Zustandsindizes über einen Zeitraum von 60 Jahren unter der Annahme, dass keine Erhaltungsmassnahmen durchgeführt werden, dargestellt.

Die Schadensentwicklung verläuft bei allen Zustandsmerkmalen - mit Ausnahme von I_{A4} - relativ langsam und weist eine lineare oder logarithmische Entwicklung auf. Das bedeutet, dass einzig bei den strukturellen Schäden eine exponentielle Entwicklung der Schäden, die zu einem mit fortschreitender Schädigung immer schnelleren Schadensverlauf führt, zu rechnen ist. Die anderen Schadensbilder zeigen eher eine Stabilisierung des Schadensverlaufs auf einem gewissen Niveau.

Für die Indizes I_{A5} (Flicke) und I_5 (Tragfähigkeit) liegen keine Modelle vor. Diese Indizes werden in den folgenden Beispielen konstant auf einem mittleren Wert von $I_{A5}=I_5=3$ angenommen.

Bei den messtechnisch aufgenommenen Indizes I_2 bis I_5 wird davon ausgegangen, dass der theoretisch mögliche Optimalwert von $I_x=0$ auch im Neuzustand aufgrund von immer vorhandenen Mängeln, die innerhalb der Neubautoleranzen liegen, nicht erreicht wird. Die entsprechenden Verlaufskurven beginnen daher auf dem Niveau $I_x=0.5$ bzw. im Fall der Längsebenheit bei $I_2=1.2$.

Aufgrund der langsamen und mit zunehmender Schädigung langsameren Schadensentwicklung der meisten Schadensbilder, zeigt sich, dass über einen sinnvoll gewählten Betrachtungszeitraum von maximal 60 Jahren lediglich die Indizes

- I_{A2} – Schäden der bitumenhaltigen Schichten,
- I_{A3} – Verformungen der bitumenhaltigen Schichten,
- I_{A4} – Strukturelle Schäden,
- I_1 – Oberflächenschäden und
- I_3 – Ebenheit quer

einen Schädigungsgrad erreichen, der eine Erhaltungsmassnahme nötig macht.

Die Indizes

- I_{A1} – Oberflächenglätte,
- I_2 – Ebenheit längs und
- I_4 – Griffigkeit

spielen demnach für das Erhaltungsmanagement eine untergeordnete Rolle.

Inwieweit sich diese Feststellung mit der Praxis des Erhaltungsmanagements deckt oder mit Effekten aus der Datenaufnahme und –auswertung zu erklären ist, bleibt zu untersuchen. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird auf die gegebenen Verlaufskurven zurückgegriffen.

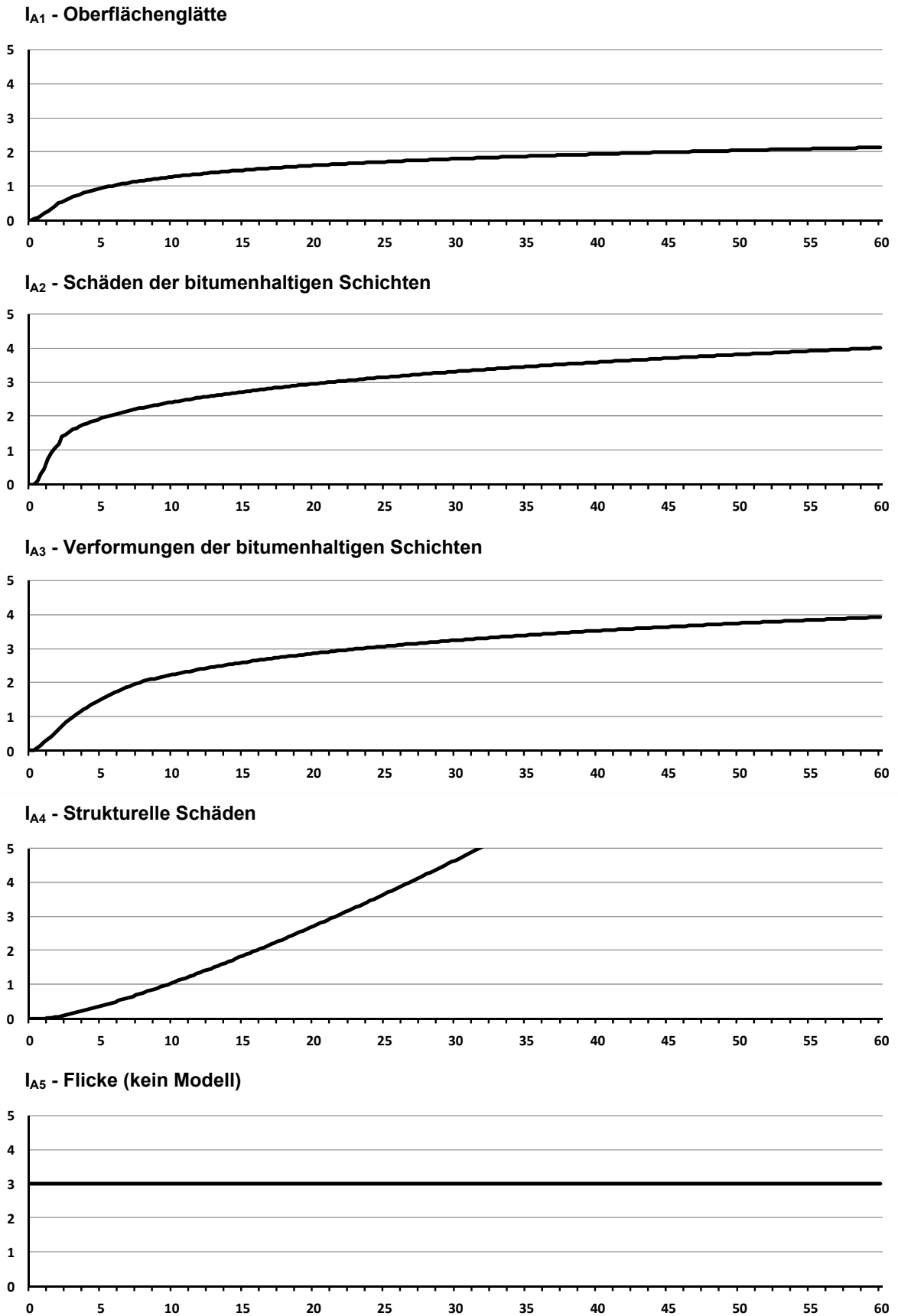


Bild 62: Verlaufskurven der Zustandsindizes I_{A1} bis I_{A5} über einen Zeitraum von 60 Jahren unter der Annahme, dass keine Erhaltungsmassnahmen durchgeführt werden

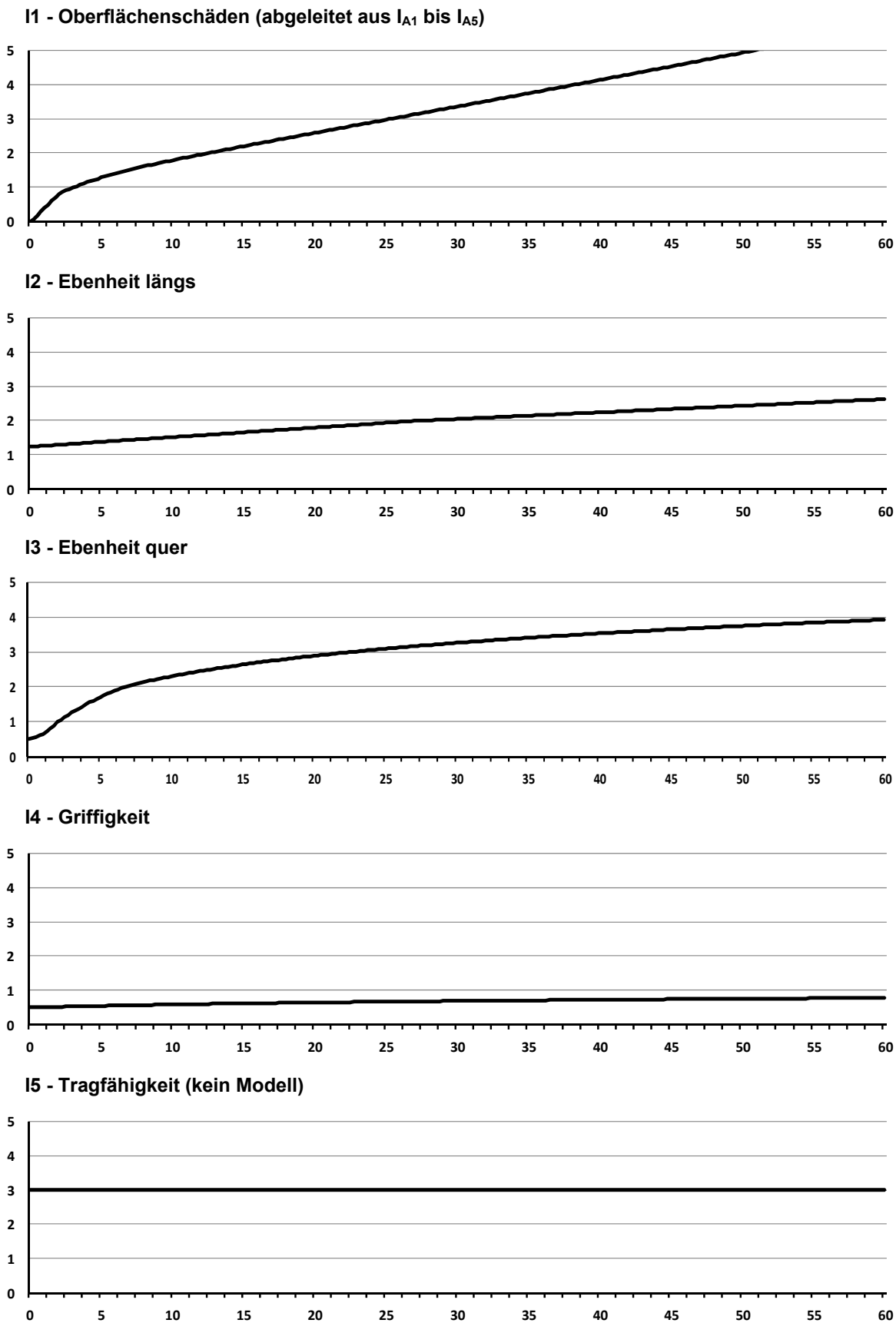


Bild 63: Verlaufskurven der Zustandsindizes I1 bis I5 über einen Zeitraum von 60 Jahren unter der Annahme, dass keine Erhaltungsmassnahmen durchgeführt werden

Beispielberechnungen

Im Folgenden werden zwei Anwendungsbeispiele für die entwickelten Modelle dargestellt. Im Beispiel 1 wird der Aufschub einer Massnahme gegenüber dem Planungsfall betrachtet; im Beispiel 2 werden zwei auf verschiedenen Erhaltungsstrategien beruhenden Erhaltungsvarianten gegenübergestellt.

In beiden Beispielen gelten für die Massnahmenplanung und Kostenberechnung die folgenden Annahmen bzw. Eingangsparameter:

Betrachtete Strasse:	HLS rechter Fahrstreifen Abschnitt von 1km Länge Signalisierte Geschwindigkeit: 120 km/h
Verkehrsbelastung:	DTV = 20'000 Anteil Güterverkehr = 20%
Anwohner:	Keine direkt betroffenen Anwohner

Die Kostenansätze für die einzelnen Kostengruppen der drei Stakeholdergruppen wurden aus den Ergebnissen des Einzelprojekts 4 *Gesamtnutzen und Kosten-Nutzen-Verhältnisse* übernommen (Lücking, Herrmann et al. 2008). Für den Diskontierungsfaktor wurde auf die soziale Zeitpräferenzrate zurückgegriffen und ein Wert von $q=2.0\%$ gewählt.

1. Beispiel 1 – Aufschub einer einzelnen Massnahme innerhalb des Anwendungsbereichs

Geht man zu Beginn der Betrachtung vom Neuzustand in allen Zustandsindizes aus, so entsteht zuerst beim Index I_{A4} (Strukturelle Schäden) Handlungsbedarf (Bild 64). Bei einer Eingreifgrenze von $I_{A4}=3.5$ bietet sich gemäss dem Katalog der standardisierten Erhaltungsmassnahmen (Bild 33) für das Hauptauslösende Merkmal I_{A4} ein Hocheinbau der Deck- und Binderschicht an (Massnahme 2.4.1).

Im Folgenden soll in einer vereinfachten Betrachtung gemäss Kapitel 4.3.2 die Auswirkungen eines Aufschubs dieser Massnahme vom frühest möglichen Zeitpunkt ($I_{A4}=3.3$) zum spätest möglichen Zeitpunkt ($I_{A4}=5$) ermittelt werden.

1.1 Variantendefinition

Die Basisvariante und die Vergleichsalternative werden wie folgt definiert (siehe Bild 64 und Bild 65):

- Basisvariante χ :
Frühest mögliche Ausführung der Massnahme bei Erreichen des Zustandswerts $I_{A4}=3.3$

im Jahr $t=24$ sowie eine Wiederholung der Massnahme beim nächsten Erreichen des Zustandswerts $I_{A4}=3.3$ im Jahr $t=48$

- Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$:

Verschiebung der ersten Massnahme bis zum Erreichen des Zustandswert $I_{A4}=5.0$ im Jahr $t=32$ sowie eine Wiederholung der Massnahme beim nächsten Erreichen des Zustandswerts $I_{A4}=3.3$ im Jahr $t=56$

Im Fall der Verschiebungsalternative erreicht der Zustandsindex I_{A4} einen Wert von 5.0, was dem oberen Ende des Anwendungsbereichs der gewählten Massnahme entspricht. Zu beachten ist, dass üblicherweise in der Erhaltungsstrategie eine Mindestanforderung definiert wird, die ein Eingreifen bereits vor diesem Wert vorgibt.

Die Wiederholung der Massnahme in den beiden Varianten ist nötig um in beiden Fällen den gesamten Einflussbereich der betrachteten Massnahme abbilden zu können (siehe Kapitel 4.3.2). In der praktischen Anwendung kann hier auch eine andere Massnahme eingeplant werden (ein zweimaliger Hocheinbau stellt eher einen theoretischen Fall dar).

Der Betrachtungszeitraum wird gemäss Kapitel 4.3.2 für den Aufschub einer Massnahme so gewählt, dass der Startzeitpunkt unmittelbar vor der Ausführung der Massnahme in der Basisvariante liegt und der Endzeitpunkt unmittelbar nach Ausführung der Folgemassnahme in der Verschiebungsalternative liegt (siehe Bild 64).

Bild 64 und Bild 65 zeigen den Zustandsverlauf in der Basisvariante χ und der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$ über einen Zeitraum von 60 Jahren. Für die Berechnung der Zusatzkosten der Verschiebung kann der Betrachtungszeitraum aber auf das Intervall $[t_a = 24; t_e = 56]$ eingeschränkt werden.

Die Einschränkung des Betrachtungszeitraums entspricht dem in Kapitel 4.3.2 beschriebenen vereinfachten Vorgehen. Die Tatsache, dass auch hier 25 Jahre betrachtet werden, zeigt, dass vor allem bei umfangreichen Massnahmen, die zu einer deutlichen Verbesserung des Strassenzustands führen, der Unterschied zwischen der vereinfachten Betrachtung und der lebenszyklusorientierten Betrachtung nach Kapitel 4.3.2 verwischt, da auch die vereinfachte Betrachtung mit verkürztem Betrachtungszeitraum einen grossen Ausschnitt des sinnvoll abbildbaren Zeitrahmens von 50-60 Jahren beinhaltet.

1.2 Kostenermittlung

Die Kosten der beiden Varianten ergeben sich gemäss den in Kapitel 5 definierten Ansätzen als Summe der einzelnen Kostengruppen der Stakeholder Betreiber, Nutzer und Dritte. Für die durchgeführten Massnahmen (Hocheinbau Deck und Binderschicht fallen fixe Kosten von 3500,- CHF und variable Kosten von 44,- CHF/m² an.

Bild 67 zeigt die einzelnen Kostenanteile, die in den einzelnen Jahren des Betrachtungszeitraums anfallen. Zunächst werden die Kosten in den einzelnen Jahren ermittelt und diese dann auf den Bezugszeitpunkt t_b diskontiert. Da der Betrachtungszeitraum erst im Jahr $t=24$ beginnt, wird dieser Zeitpunkt als Bezugszeitpunkt gewählt. Aus der Diskontierung ergeben sich die jährlichen Kosten-Barwerte und aus deren Summe der gesamte Kosten-Barwert KBW_t^χ bzw. $KBW_t^{\tilde{\chi}}$ der Basisvariante bzw. der Verschiebungsalternative.

In Bild 68 sind die einzelnen Kostengruppen, bei denen sich Kostenanteile ergeben graphisch für beide Varianten dargestellt.

Aus der Differenz $\Delta KBW_t = KBW_t^{\tilde{z}} - KBW_t^z$ der beiden Varianten ergeben sich die Zusatzkosten der Verschiebungsalternative. Die jährlichen Zusatzkosten sind in Bild 69 ohne bzw. mit Berücksichtigung der Diskontierung dargestellt.

1.3 Auswertung der Ergebnisse

Insgesamt ergibt sich beim Vergleich von Basisvariante und Verschiebungsalternative über den Betrachtungszeitraum eine Kosten-Barwert-Differenz von $\Delta KBW = 129'305 \text{ CHF}$. Dies entspricht einer Erhöhung der Kosten der Basisvariante um 19%.

Diese Differenz teilt sich wie folgt auf die einzelnen Stakeholdergruppen auf:

$$\text{Betreiber: } \Delta KBW_{t_B}^B = -51'189 \text{ CHF}$$

$$\text{Nutzer: } \Delta KBW_{t_B}^N = 167'402 \text{ CHF}$$

$$\text{Dritte: } \Delta KBW_{t_B}^D = 13'091 \text{ CHF}$$

Es zeigt sich also, dass lediglich auf Seiten der Nutzer und der Dritten Zusatzkosten durch die Verschiebung der Massnahme entstehen. Der Strassenbetreiber hingegen profitiert von der Verschiebung. Dieses Ergebnis lässt mit Hilfe der einzelnen Kostenanteile in Bild 67 und Bild 68 erklären. Während die Kosten der Nutzer und Dritten in starkem Masse vom Strassenzustand abhängen und damit bei der Verschiebungsalternative in den Jahren der Verschiebung ($t=24$ bis $t=32$) bei schlechtem Strassenzustand zu hohen Kosten führen, spielen die vom Strassenzustand abhängigen Kostenanteile bei den Betreiberkosten eine eher untergeordnete Rolle. Zwar steigen die laufenden Betriebskosten in den Jahren der Verschiebung überproportional an, ihre absolute Grösse bleibt aber im Vergleich zu den Massnahmekosten und den Kosten aus der Systemabgrenzung gering. Aufgrund der Verschiebung der Massnahme liegt bei der Verschiebungsalternative im Endzustand ein deutlich besserer Strassenzustand vor, als in der Basisvariante (siehe Bild 64 und Bild 65). Dies führt zu geringeren Abgrenzungskosten im Endzeitpunkt. Dieser Effekt überwiegt bei weitem die Erhöhung der laufenden Betriebskosten bei schlechterem Strassenzustand.

Zu beachten ist, dass die Ersparnis auf Seiten des Strassenbetreibers nur dadurch möglich wird, dass auch nach der Verschiebung noch die selbe Massnahme durchgeführt werden kann. Es entstehen hier also keine höheren Massnahmekosten. Ist dies nicht der Fall, so ist auch für den Betreiber mit höheren Kosten zu rechnen.

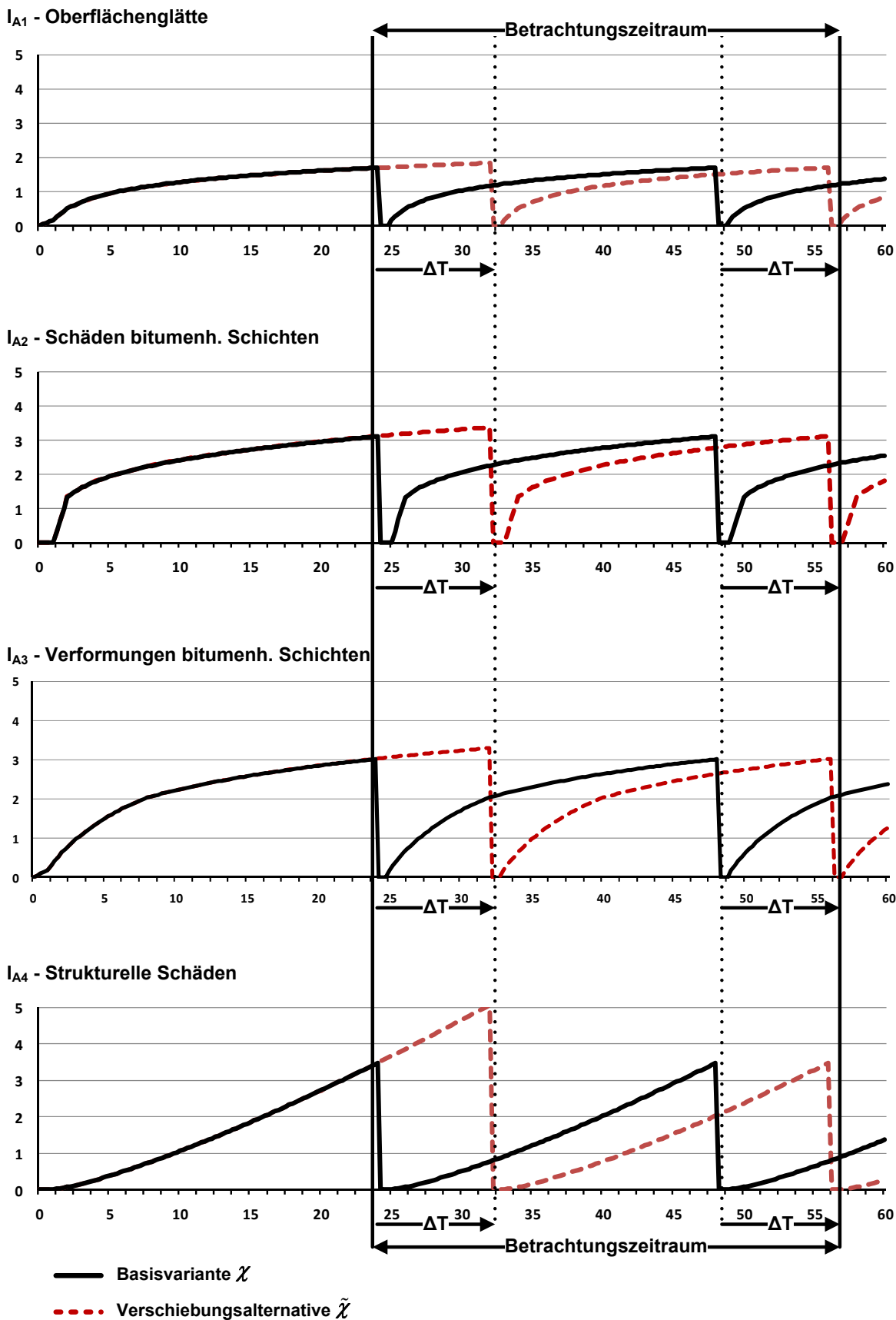


Bild 64: Zustandsverlauf über 60 Jahre in den Indizes I_{A1} bis I_{A4} bei der Basisvariante χ und der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$

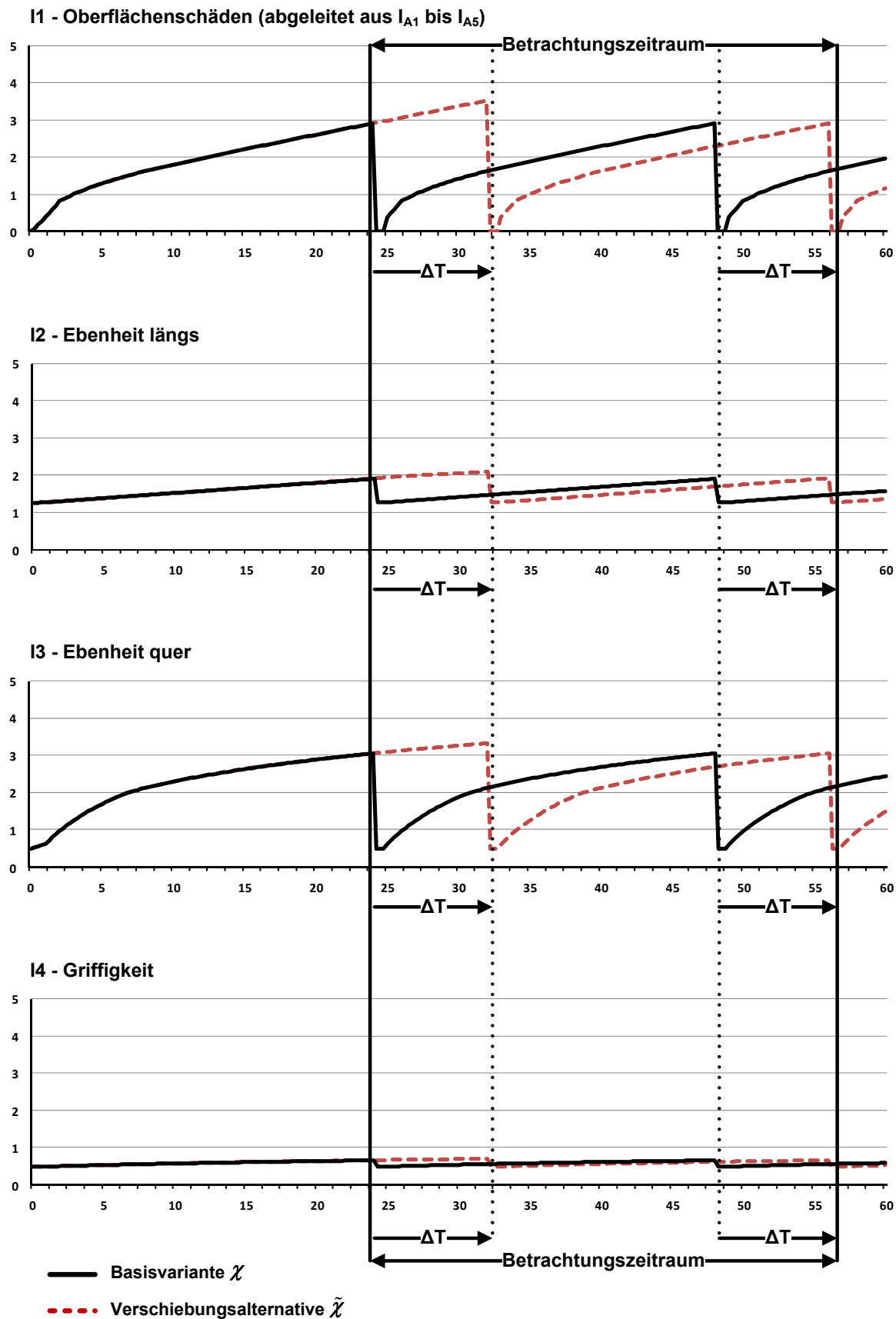


Bild 65: Zustandsverlauf über 60 Jahre in den Indizes I1 bis I4 bei der Basisvariante χ und der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$

Jahr		24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Betreiberkosten												
	Betrieblicher Unterhalt	2'228	0	0	7	185	340	480	609	728	833	935
	Erhaltungsmassnahmen	179'500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe Betreiberkosten	181'728	0	0	7	185	340	480	609	728	833	935
Nutzerkosten												
	Reisezeitkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fahrzeugbetriebskosten	0	704	1'494	2'284	3'074	3'864	4'654	5'444	6'234	7'024	7'814
	Unfallkosten	0	0	288	789	1'265	1'719	2'152	2'567	2'965	3'347	3'715
	Summe Nutzerkosten	0	465	1'783	3'073	4'339	5'583	6'806	8'011	9'199	10'372	11'530
Kosten Dritter												
	Unfallkosten	0	0	80	218	350	475	595	710	820	925	1'027
	Lärmkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Luftverschmutzungskosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Klimakosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe Kosten Dritter	0	0	80	218	350	475	595	710	820	925	1'027
Gesamtkosten im Jahr t		181'728	398	1'862	3'298	4'874	6'398	7'881	9'330	10'746	12'130	13'491
Kosten-Barwert im Jahr t		181'728	391	1'790	3'108	4'502	5'794	6'998	8'122	9'172	10'150	11'067

Jahr		35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Betreiberkosten												
	Betrieblicher Unterhalt	1'034	1'131	1'226	1'320	1'413	1'505	1'597	1'688	1'778	1'869	1'959
	Erhaltungsmassnahmen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe Betreiberkosten	1'034	1'131	1'226	1'320	1'413	1'505	1'597	1'688	1'778	1'869	1'959
Nutzerkosten												
	Reisezeitkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fahrzeugbetriebskosten	8'604	9'394	10'185	10'975	11'765	12'555	13'345	14'135	14'925	15'715	16'505
	Unfallkosten	4'070	4'412	4'743	5'063	5'373	5'673	5'965	6'248	6'524	6'792	7'052
	Summe Nutzerkosten	12'674	13'807	14'927	16'037	17'137	18'228	19'310	20'383	21'448	22'506	23'557
Kosten Dritter												
	Unfallkosten	1'125	1'220	1'311	1'399	1'485	1'568	1'649	1'727	1'803	1'877	1'949
	Lärmkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Luftverschmutzungskosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Klimakosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe Kosten Dritter	1'125	1'220	1'311	1'399	1'485	1'568	1'649	1'727	1'803	1'877	1'949
Gesamtkosten im Jahr t		14'833	16'157	17'464	18'757	20'036	21'302	22'555	23'798	25'030	26'252	27'465
Kosten-Barwert im Jahr t		11'930	12'740	13'501	14'216	14'887	15'517	16'108	16'662	17'181	17'667	18'121

Jahr		46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
Betreiberkosten												
	Betrieblicher Unterhalt	2'048	2'138	2'228	0	0	7	185	340	480	609	728
	Erhaltungsmassnahmen	0	0	179'500	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe Betreiberkosten	2'048	2'138	181'728	0	0	7	185	340	480	609	728
Nutzerkosten												
	Reisezeitkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fahrzeugbetriebskosten	17'295	18'085	0	704	1'494	2'284	3'074	3'864	4'654	5'444	6'234
	Unfallkosten	7'307	7'555	0	0	288	789	1'265	1'719	2'152	2'567	2'965
	Summe Nutzerkosten	24'602	25'639	0	465	1'783	3'073	4'339	5'583	6'806	8'011	9'199
Kosten Dritter												
	Unfallkosten	2'020	2'088	0	0	80	218	350	475	595	710	820
	Lärmkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Luftverschmutzungskosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Klimakosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe Kosten Dritter	2'020	2'088	0	0	80	218	350	475	595	710	820
Gesamtkosten im Jahr t		28'670	29'866	181'728	398	1'862	3'298	4'874	6'398	7'881	9'330	10'746
Kosten-Barwert im Jahr t		18'545	18'940	112'984	243	1'113	1'932	2'799	3'603	4'351	5'050	5'702

Kostenanteil aus der Systemabgrenzung (diskontiert): 96'973 CHF

Kosten Barwert der Erhaltungsvariante: 683'585 CHF

Bild 66: Kostenanteile der Betreiberkosten, Nutzerkosten und Kosten Dritter über den Betrachtungszeitraum in der Basisvariante χ

Jahr		24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Betreiberkosten												
	Betrieblicher Unterhalt	2'228	2'317	2'436	2'639	2'928	3'304	3'766	4'316	4'953	0	0
	Erhaltungsmassnahmen	0	0	0	0	0	0	0	0	179'500	0	0
	Summe Betreiberkosten	2'228	2'317	2'436	2'639	2'928	3'304	3'766	4'316	184'453	0	0
Nutzerkosten												
	Reisezeitkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fahrzeugbetriebskosten	18'875	19'665	20'455	21'245	21'758	22'306	22'854	23'402	0	704	1'494
	Unfallkosten	7'796	8'033	8'263	8'489	8'709	8'925	9'136	9'343	0	0	288
	Summe Nutzerkosten	26'671	27'698	28'718	29'734	30'467	31'231	31'990	32'745	0	704	1'783
Kosten Dritter												
	Unfallkosten	2'155	2'220	2'284	2'346	2'407	2'467	2'525	2'583	0	0	80
	Lärmkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Luftverschmutzungskosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Klimakosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe Kosten Dritter	2'155	2'220	2'284	2'346	2'407	2'467	2'525	2'583	0	0	80
Gesamtkosten im Jahr t		31'054	32'235	33'438	34'719	35'803	37'002	38'282	39'644	184'453	398	1'862
Kosten-Barwert im Jahr t		31'054	31'603	32'140	32'716	33'076	33'514	33'993	34'512	157'429	333	1'528

Jahr		35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Betreiberkosten												
	Betrieblicher Unterhalt	7	185	340	480	609	728	833	935	1'034	1'131	1'226
	Erhaltungsmassnahmen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe Betreiberkosten	7	185	340	480	609	728	833	935	1'034	1'131	1'226
Nutzerkosten												
	Reisezeitkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fahrzeugbetriebskosten	2'284	3'074	3'864	4'654	5'444	6'234	7'024	7'814	8'604	9'394	10'185
	Unfallkosten	789	1'265	1'719	2'152	2'567	2'965	3'347	3'715	4'070	4'412	4'743
	Summe Nutzerkosten	3'073	4'339	5'583	6'806	8'011	9'199	10'372	11'530	12'674	13'807	14'927
Kosten Dritter												
	Unfallkosten	218	350	475	595	710	820	925	1'027	1'125	1'220	1'311
	Lärmkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Luftverschmutzungskosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Klimakosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe Kosten Dritter	218	350	475	595	710	820	925	1'027	1'125	1'220	1'311
Gesamtkosten im Jahr t		3'298	4'874	6'398	7'881	9'330	10'746	12'130	13'491	14'833	16'157	17'464
Kosten-Barwert im Jahr t		2'652	3'843	4'946	5'973	6'932	7'828	8'663	9'446	10'182	10'873	11'523

Jahr		46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
Betreiberkosten												
	Betrieblicher Unterhalt	1'320	1'413	1'505	1'597	1'688	1'778	1'869	1'959	2'048	2'138	2'228
	Erhaltungsmassnahmen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	179'500
	Summe Betreiberkosten	1'320	1'413	1'505	1'597	1'688	1'778	1'869	1'959	2'048	2'138	181'728
Nutzerkosten												
	Reisezeitkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fahrzeugbetriebskosten	10'975	11'765	12'555	13'345	14'135	14'925	15'715	16'505	17'295	18'085	0
	Unfallkosten	5'063	5'373	5'673	5'965	6'248	6'524	6'792	7'052	7'307	7'555	0
	Summe Nutzerkosten	16'037	17'137	18'228	19'310	20'383	21'448	22'506	23'557	24'602	25'639	0
Kosten Dritter												
	Unfallkosten	1'399	1'485	1'568	1'649	1'727	1'803	1'877	1'949	2'020	2'088	0
	Lärmkosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Luftverschmutzungskosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Klimakosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe Kosten Dritter	1'399	1'485	1'568	1'649	1'727	1'803	1'877	1'949	2'020	2'088	0
Gesamtkosten im Jahr t		18'757	20'036	21'302	22'555	23'798	25'030	26'252	27'465	28'670	29'866	181'728
Kosten-Barwert im Jahr t		12'133	12'706	13'244	13'748	14'221	14'664	15'079	15'466	15'828	16'165	96'431

Kostenanteil aus der Systemabgrenzung (diskontiert): 68'447 CHF

Kosten Barwert der Erhaltungsvariante: 812'890 CHF

Bild 67: Kostenanteile der Betreiberkosten, Nutzerkosten und Kosten Dritter über den Betrachtungszeitraum in der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$

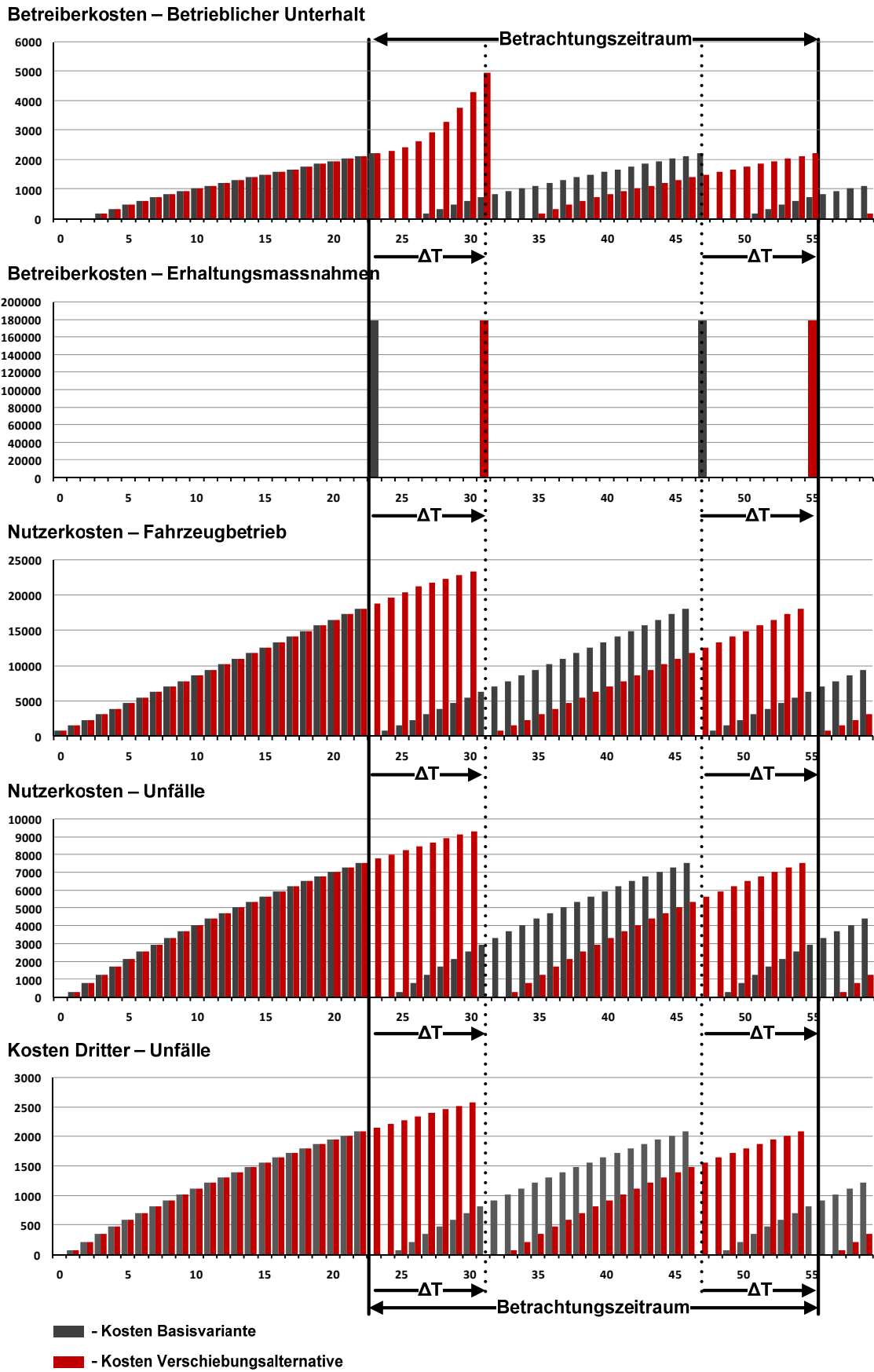


Bild 68: Verlauf der Kostenanteile der Betreiberkosten, Nutzerkosten und Kosten Dritter über 60 Jahre in der Basisvariante χ und der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$

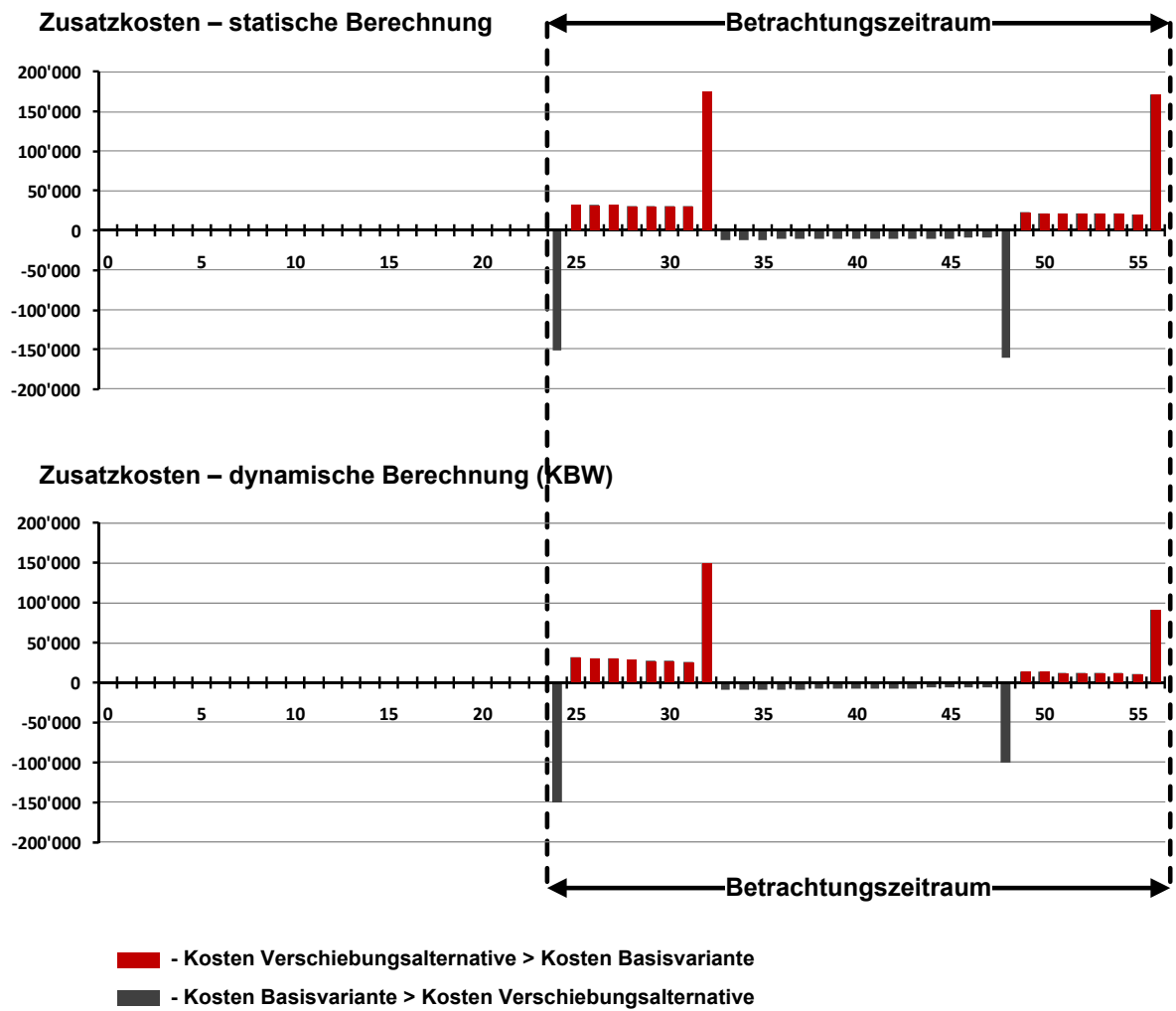


Bild 69: Statische und dynamische Betrachtung der Zusatzkosten der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$ gegenüber der Basisvariante χ über den Betrachtungszeitraum

2. Beispiel 2 - Aufschiebung einer einzelnen Massnahme über die Grenze des Anwendungsbereichs

Im Beispiel 2 wird von derselben Ausgangssituation, wie im Beispiel 1 ausgegangen. Allerdings wird von einer anderen Eingreifgrenze ausgegangen und es werden entsprechend andere Erhaltungsmassnahmen gewählt. In der Verschiebungsalternative soll der Fall untersucht werden, dass sich der Strassenzustand infolge der Verschiebung die ursprünglich geplante Massnahme nicht mehr anwendbar ist und auf eine umfangreichere Massnahme zurückgegriffen werden muss.

Als Eingreifgrenze wird $I_x=3.0$ gewählt. In der Basisvariante bietet sich daher ein Tiefeinbau der Deckschicht als geeignete Massnahme an. Bei einer Verschiebung des Eingreifzeitpunkts bis über die Grenzen der Anwendbarkeit dieser Massnahme hinaus wird dann in der Verschiebungsalternative der Tiefeinbau der Deck- und Binderschicht eingeplant.

In diesem Beispiel soll insbesondere die Auswirkung einer Verschiebung mit einhergehender Änderung der gewählten Massnahme auf die Betreiberkosten untersucht werden.

2.1 Variantendefinition

Die Basisvariante und die Vergleichsalternative werden wie folgt definiert (siehe Bild 70 und Bild 75):

- Basisvariante χ :
Tiefeinbau der Deckschicht bei Erreichen der Eingreifgrenze von $I_x=3.0$ im Jahr $t=21$. Massgeblich wird der Index I_{A2} , der als erster den Grenzwert erreicht. Da alle Indizes auf null gesetzt werden, wird nach identischem Zustandsverlauf im Jahr $t=42$ wiederum eine entsprechende Massnahme fällig.
- Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$:
Der Eingreifzeitpunkt wird bis zum Erreichen eines Zustandswertes von $I_x=4.0$ verschoben. Dieser Wert wird im Jahr $t=27$ beim Index I_{A4} erreicht. In diesem Fall ist der ursprünglich geplante Tiefeinbau der Deckschicht nicht mehr anwendbar. Als Alternative wird der Tiefeinbau der Deck- und der Binderschicht gewählt. Wie auch in der Basisvariante wird eine weitere Massnahme, in diesem Fall der ursprünglich geplante Tiefeinbau der Deckschicht beim nächsten Erreichen der Eingreifgrenze $I_x=3.0$ im Jahr $t=49$ eingeplant.

Bild 74 und Bild 75 zeigen den Zustandsverlauf in der Basisvariante χ und der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$ über einen Zeitraum von 60 Jahren. Für die Berechnung der Zusatzkosten der Verschiebung kann der Betrachtungszeitraum aber auf das Intervall $[t_a = 21; t_e = 59]$ eingeschränkt werden.

1.2 Kostenermittlung

Die Kosten der beiden Varianten ergeben sich gemäss den in Kapitel 5 definierten Ansätzen als Summe der einzelnen Kostengruppen der Stakeholder Betreiber, Nutzer und Dritte. Für die durchgeführten Massnahmen fallen die folgenden Kosten an:

Tiefenbau Deckschicht:	Fixe Kosten:	5100,- CHF
	Variable Kosten:	30.30 CHF/m ²
Tiefenbau Deck- und Binderschicht:	Fixe Kosten:	5100,- CHF
	Variable Kosten:	69.50 CHF/m ²

Zunächst werden die Kosten in den einzelnen Jahren ermittelt und diese dann auf den Bezugszeitpunkt t_B diskontiert. Da der Betrachtungszeitraum erst im Jahr $t=21$ beginnt, wird dieser Zeitpunkt als Bezugszeitpunkt gewählt. Aus der Diskontierung ergeben sich die jährlichen Kosten-Barwerte und aus deren Summe der gesamte Kosten-Barwert KBW_t^z bzw. $KBW_t^{\tilde{z}}$ der Basisvariante bzw. der Verschiebungsalternative.

In Bild 72 sind die einzelnen Kostengruppen, bei denen sich Kostenanteile ergeben graphisch für beide Varianten dargestellt.

Aus der Differenz $\Delta KBW_t = KBW_t^{\tilde{z}} - KBW_t^z$ der beiden Varianten ergeben sich die Zusatzkosten der Verschiebungsalternative. Die jährlichen Zusatzkosten sind in Bild 75 ohne bzw. mit Berücksichtigung der Diskontierung dargestellt.

1.3 Auswertung der Ergebnisse

Insgesamt ergibt sich beim Vergleich von Basisvariante und Verschiebungsalternative über den Betrachtungszeitraum eine Kosten-Barwert-Differenz von **$\Delta KBW = 228'043 \text{ CHF}$** . Dies entspricht einer Erhöhung der Kosten der Basisvariante um 19%.

Diese Differenz teilt sich wie folgt auf die einzelnen Stakeholdergruppen auf:

Betreiber: $\Delta KBW_{t_B}^B = 101'563 \text{ CHF}$

Nutzer: $\Delta KBW_{t_B}^N = 116'740 \text{ CHF}$

Dritte: $\Delta KBW_{t_B}^D = 9'740 \text{ CHF}$

Es zeigt sich, dass im Gegensatz zum vorherigen Beispiel jetzt bei allen Stakeholdergruppen eine Erhöhung der Kosten auftritt. Beim Strassenbetreiber fallen infolge der umfangreicheren Massnahme überproportional erhöhte Kosten an, die auch durch den Effekt, dass über einen längeren Zeitraum zunächst keine Ausgaben nötig waren nicht ausgeglichen werden. Die Erhöhung der Kosten der Nutzer und Dritten erklärt sich wie im vorherigen Beispiel durch das schlechtere Zustandsniveau im Zeitraum zwischen der geplanten und der tatsächlichen Ausführung der Erhaltungsmassnahme.

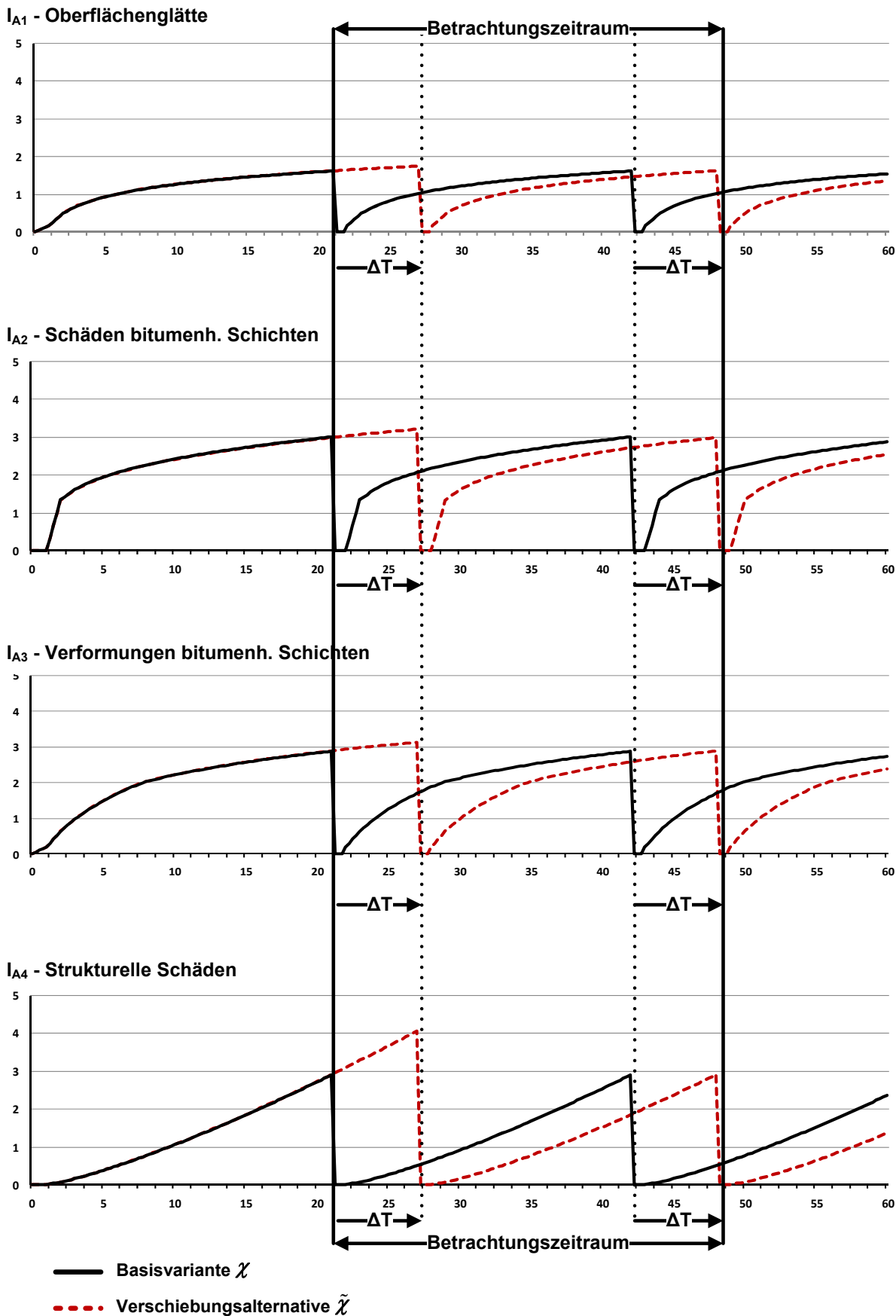


Bild 70: Zustandsverlauf über 60 Jahre in den Indizes I_{A1} bis I_{A4} bei der Basisvariante χ und der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$

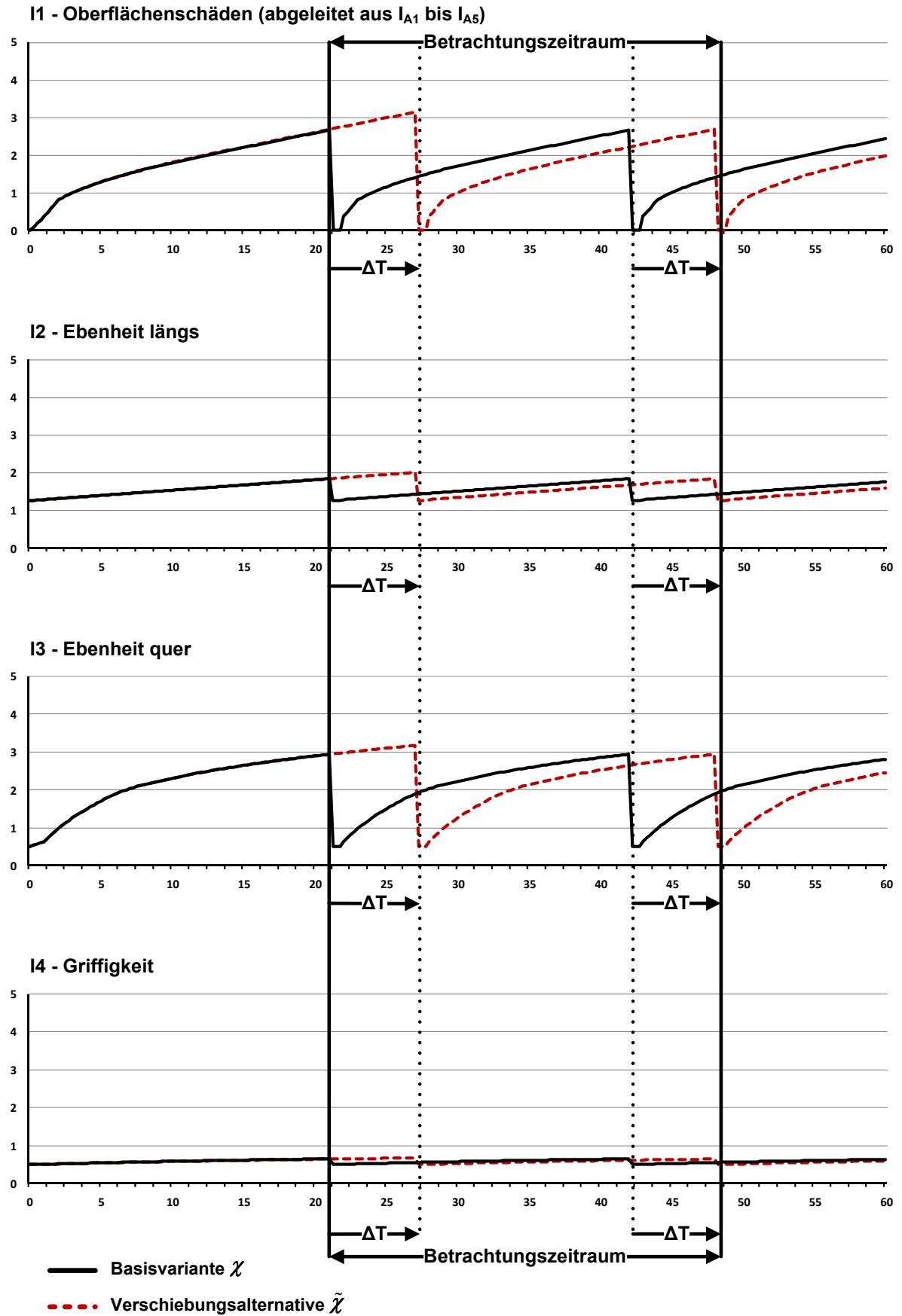


Bild 71: Zustandsverlauf über 60 Jahre in den Indizes I1 bis I4 bei der Basisvariante χ und der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$

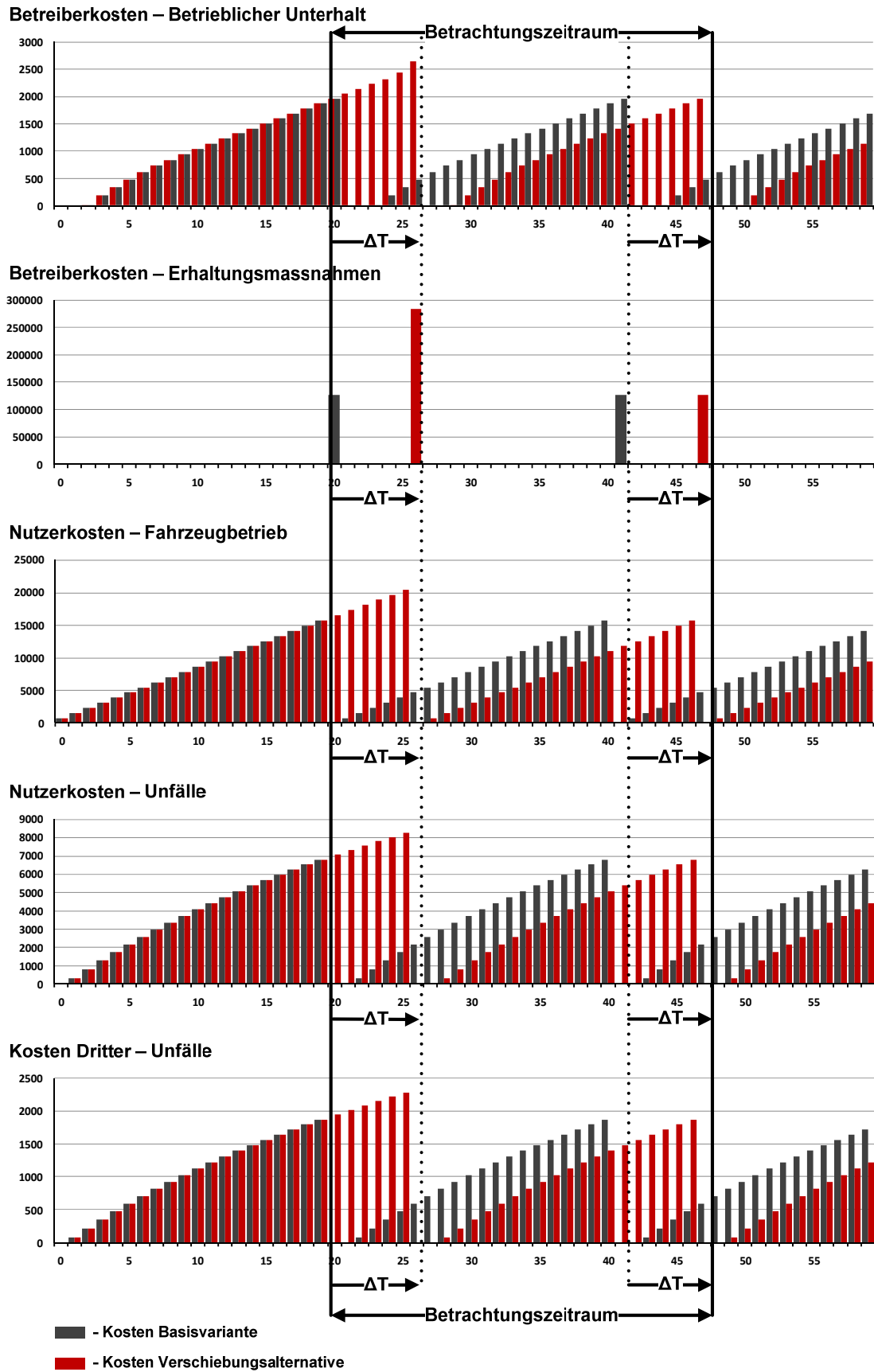


Bild 72: Verlauf der Kostenanteile der Betreiberkosten, Nutzerkosten und Kosten Dritter über 60 Jahre in der Basisvariante χ und der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$

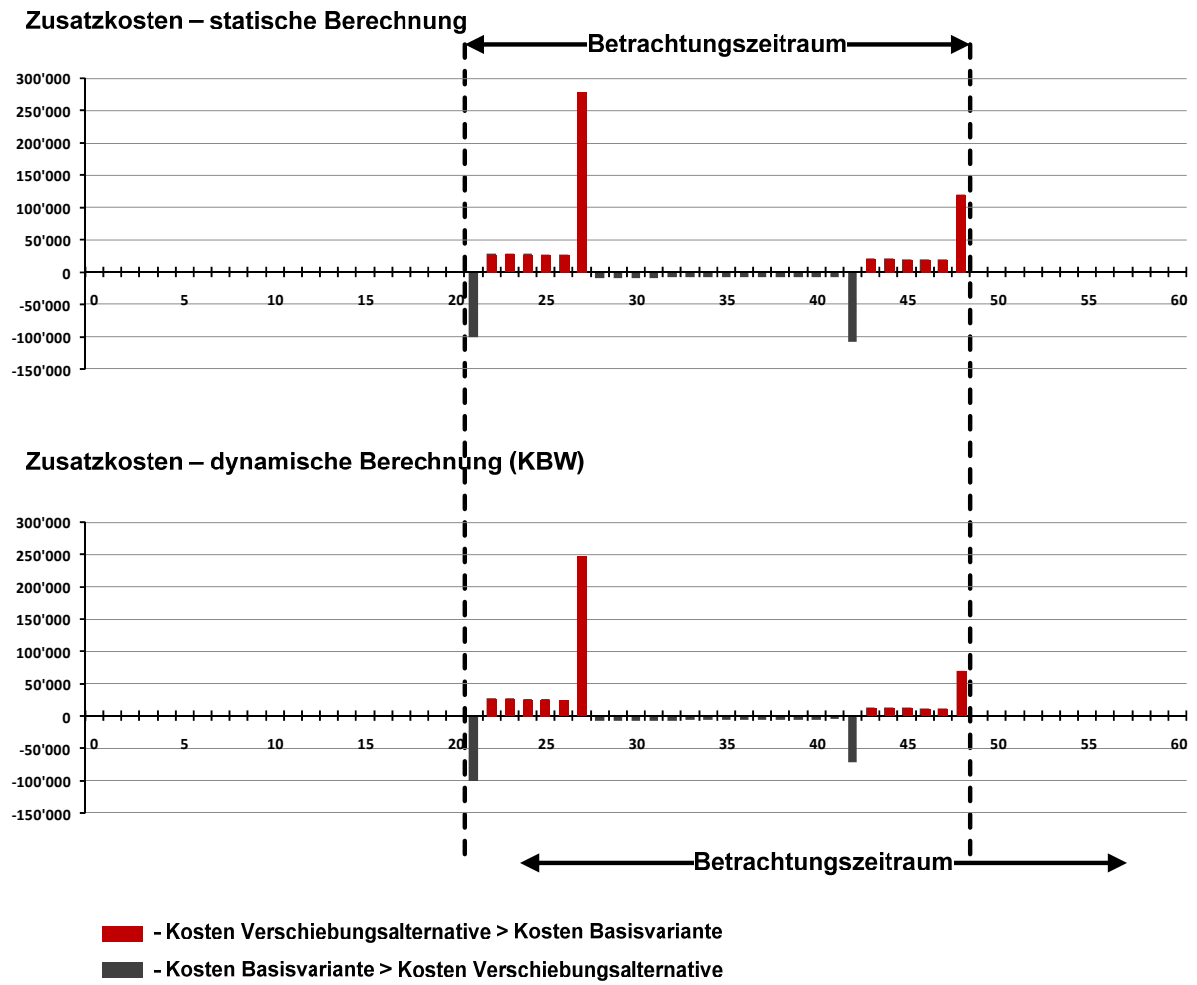


Bild 73: Statische und dynamische Betrachtung der Zusatzkosten der Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$ gegenüber der Basisvariante χ über den Betrachtungszeitraum

3. Beispiel 3 - Strategievergleich

Im Beispiel 2 sollen verschiedene Erhaltungsstrategien gegenübergestellt werden. Da das prinzipielle Vorgehen zum Vergleich verschiedener Strategien gezeigt werden soll, wurden zwei einfache Strategien, die sich lediglich bezüglich der Eingreifgrenze unterscheiden gewählt. Für jede der beiden Strategien wird eine konkrete Erhaltungsvariante entwickelt, die dann mit Hilfe des LC-Kosten-Barwert-Erhaltungs-Entscheidungsmodells bewertet wird.

- Basisvariante χ – Strategie Γ_1 :

Für alle Zustandsindizes wurde eine niedrige Eingreifgrenze von $I_x=2.5$ gewählt. Damit soll gewährleistet werden, dass der Strassenzustand stets in einem guten Bereich bleibt und geringe Einschränkungen für die Nutzer und Dritte entstehen. Allerdings macht diese Strategie eine grössere Anzahl von Erhaltungsmassnahmen nötig, die aber einen relativ geringen Umfang haben.

- Alternativvariante $\tilde{\chi}$ – Strategie Γ_2 :

In der Strategie Γ_2 wird für die Eingreifgrenze ein hoher Wert von $I_x=4.0$ gewählt. Es wird also eine deutliche Verschlechterung des Strassenzustands in Kauf genommen, bevor eingeschritten wird. Dies macht dann allerdings relativ umfangreiche Erhaltungsmassnahmen erforderlich, um den Strassenzustand wieder zu verbessern.

3.1 Variantendefinition

Auf Grundlage der Strategie Γ_1 wird die Basisvariante χ definiert. Analog folgt aus der Strategie Γ_2 die Alternativvariante $\tilde{\chi}$. Als Betrachtungszeitraum wird ein Zeitraum von 60 Jahren gewählt.

Im Folgenden wird auf die Definition der beiden zu vergleichenden Varianten detailliert eingegangen.

Basisvariante χ :

Schritt 1:

Ausgehend vom Neuzustand erreicht im Jahr $t=12$ zuerst der Index I_{A2} (Schäden an bitumenhaltigen Schichten) die Eingreifgrenze von $I_x=2.5$.

Zu diesem Zeitpunkt weisen die einzelnen Zustandsindizes die folgende Ausprägung auf:

I_{A1}	=	1.36	$I1$	=	1.97
I_{A2}	=	2.56	$I2$	=	1.58
I_{A3}	=	2.38	$I3$	=	2.45
I_{A4}	=	1.36	$I4$	=	0.59
I_{A5}	=	3.00	$I5$	=	3.00

Auf Grundlage dieser Zustandswerte und dem Hauptauslösenden Merkmal I_{A2} wird die Massnahme 2.2.2 (Kaltmicro, 15mm mit Vorfräsen) aus dem Katalog der standardisierten

Erhaltungsmassnahmen (Bild 33) gewählt (Bezeichnung: $m_{2.2.2}^{I_{A2}}$). Für diese Massnahme fallen fixe Kosten in Höhe von 3500,- CHF und variable Kosten in Höhe von 10.80 CHF/m² an.

Die gewählte Massnahme hat die folgenden Auswirkungen auf den Strassenzustand:

I_{A1}	=	0.00	I1	=	-1.00
I_{A2}	=	0.00	I2	=	1.50
I_{A3}	=	0.00	I3	=	1.00
I_{A4}	=	-1.10	I4	=	keine Veränderung
I_{A5}	=	0.00	I5	=	keine Veränderung

In den Indizes I_{A1}, I_{A2}, I_{A3}, I_{A5} und I3 wird also ein fixer Wert nach der Massnahme erreicht. Die Indizes I_{A4} und I1 verändern relativ von ihrem Ausgangswert um einen fixen Wert. Die Indizes I4 und I5 bleiben unverändert.

Schritt 2:

Im Jahr t=24 wird die Eingreifgrenze von I_x=2.5 erneut überschritten.

Die Zustandsindizes weisen die folgenden Ausprägungen auf:

I_{A1}	=	1.36	I1	=	2.12
I_{A2}	=	2.56	I2	=	1.80
I_{A3}	=	2.38	I3	=	2.52
I_{A4}	=	1.85	I4	=	0.66
I_{A5}	=	3.00	I5	=	3.00

In diesem Fall nicht nur vom Index I_{A2} (Schäden an bitumenhaltigen Schichten), sondern auch von I3 (Ebenheit quer).

Es wird erneut die Massnahme 2.2.2 (Kaltmicro, 15mm mit Vorfräsen) gewählt (Bezeichnung: $m_{2.2.2}^{I_{A2}/I3}$).

Schritt 3:

Im Jahr t=36 ergibt sich dieselbe Situation bei Schritt 2 im Jahr t=24.

Es wird erneut die Massnahme 2.2.2 (Kaltmicro, 15mm mit Vorfräsen) gewählt (Bezeichnung: $m_{2.2.2}^{I_{A2}/I3}$).

Schritt 4:

Im Jahr t=43 wird die Eigriegrenze vom Index I_{A4} (Strukturelle Schäden) überschritten.

Die Zustandsindizes weisen die folgenden Ausprägungen auf:

I_{A1}	=	1.10	$I1$	=	2.10
I_{A2}	=	2.17	$I2$	=	1.66
I_{A3}	=	1.89	$I3$	=	2.13
I_{A4}	=	2.55	$I4$	=	0.74
I_{A5}	=	3.00	$I5$	=	3.00

Da der Index I_{A4} bei den bisher gewählten Massnahmen nur um einen relativ geringen Wert zurückgesetzt wird und aufgrund des exponentiellen Verlaufs des Indexwertes mit zunehmender Schädigung schnell wieder zur Überschreitung der Eingreifgrenze führen würde, wird jetzt eine andere Massnahme, die grösseren Einfluss auf I_{A4} hat, gewählt.

Es wird die Massnahme 2.2.3 (Heissmicro, 20mm ohne vorfräsen) mit folgenden Auswirkungen auf den Strassenzustand gewählt (Bezeichnung: $m_{2.2.3}^{I_{A4}}$):

I_{A1}	=	0.00	$I1$	=	-1.30
I_{A2}	=	0.00	$I2$	=	-1.00
I_{A3}	=	keine Veränderung	$I3$	=	-1.00
I_{A4}	=	-1.60	$I4$	=	keine Veränderung
I_{A5}	=	0.00	$I5$	=	keine Veränderung

Mit dieser Massnahme wird der kritische Index I_{A4} um $\Delta I_{A4}=-1.6$ zurückgesetzt.

Schritt 5:

Im Jahr $t=50$ überschreitet der Index I_{A3} , der von der vorherigen Massnahme 2.2.3 nicht beeinflusst wurde, die Eingreifgrenze.

Die Zustandsindizes weisen die folgenden Ausprägungen auf:

I_{A1}	=	1.10	$I1$	=	2.01
I_{A2}	=	2.17	$I2$	=	1.44
I_{A3}	=	2.52	$I3$	=	2.22
I_{A4}	=	1.85	$I4$	=	0.76
I_{A5}	=	3.00	$I5$	=	3.00

Es wird erneut die Massnahme 2.2.2 (Kaltmicro, 15mm mit Vorfräsen) gewählt (Bezeichnung: $m_{2.2.2}^{I_{A3}}$). Auch wenn diese nicht explizit für I_{A3} als Hauptauslösendes Merkmal empfohlen wird, ist sie dennoch aufgrund der Übereinstimmung des Anwendungsbereichs mit dem aktuellen Strassenzustand und der Verbesserung I_{A3} von auf den Neuzustand für den vorliegenden Fall geeignet.

Insgesamt ergibt sich also die folgende Abfolge von Massnahmen über den Betrachtungszeitraum:

t=12	: Massnahme 2.2.2	Kaltmicro, 15mm mit Vorfräsen
t=24	: Massnahme 2.2.2	Kaltmicro, 15mm mit Vorfräsen
t=36	: Massnahme 2.2.2	Kaltmicro, 15mm mit Vorfräsen
t=43	: Massnahme 2.2.3	Heissmicro, 20mm ohne Vorfräsen
t=50	: Massnahme 2.2.2	Kaltmicro, 15mm mit Vorfräsen

In Kurzform lässt sich die Erhaltungsvariante χ der Strategie Γ_1 gemäss Formel (14) wie folgt darstellen:

$$U_{\chi}^{\text{Abschnitt } y}(\Gamma^1) = \left\{ \mathbf{M}_i^x \Big|_{t, m_i^x} \right\}_{\chi}^{\text{Abschnitt } y} = \left\{ m_{2.2.2}^{I_{A2}} \Big|_{t=12}; m_{2.2.2}^{I_{A2}/I3} \Big|_{t=24}; m_{2.2.2}^{I_{A2}/I3} \Big|_{t=36}; m_{2.2.3}^{I_{A4}} \Big|_{t=43}; m_{2.2.2}^{I_{A3}} \Big|_{t=50} \right\}_{\chi}^{\text{Abschnitt } y}$$

Alternativvariante $\tilde{\chi}$:

Schritt 1:

Auch bei der Alternativvariante wird, um die Vergleichbarkeit mit der Basisvariante zu sichern, vom Neuzustand im Anfangszeitpunkt ausgegangen. Die Eingreifgrenze von $I_x=4.0$ wird in diesem Fall im Jahr $t=27$ vom Zustandsindex I_{A4} (Strukturelle Schäden) erreicht. Zu diesem Zeitpunkt weisen die einzelnen Zustandsindizes die folgende Ausprägung auf:

I_{A1}	=	1.75	I1	=	3.14
I_{A2}	=	3.22	I2	=	2.00
I_{A3}	=	3.13	I3	=	3.17
I_{A4}	=	4.06	I4	=	0.67
I_{A5}	=	3.00	I5	=	3.00

Mit diesen Zustandswerten und dem Hauptauslösenden Merkmal I_{A4} wird die Massnahme 2.6.1 (Tiefenbau Deck- und Binderschicht 100mm) gewählt. (Bezeichnung: $m_{2.6.1}^{I_{A4}}$). Für diese Massnahme fallen fixe Kosten in Höhe von 5100,- CHF und variable Kosten in Höhe von 69.50 CHF/m² an.

Die gewählte Massnahme hat die folgenden Auswirkungen auf den Strassenzustand:

I_{A1}	=	0.00	I1	=	0.00
I_{A2}	=	0.00	I2	=	<1.00
I_{A3}	=	0.00	I3	=	<1.00
I_{A4}	=	0.00	I4	=	<1.00
I_{A5}	=	0.00	I5	=	<1.00

Es wird also in allen Zustandsindizes der Neuzustand hergestellt. Für die messtechnisch aufgenommenen Zustandsindizes I2 bis I5 wird ein Wert von 0.5 im Neuzustand angesetzt. Hiermit werden die Fertigungstoleranzen berücksichtigt, die schon im Neuzustand zu einem Messwert > 0 führen.

Schritt 2:

Da nach der ersten Massnahme wiederum der Neuzustand hergestellt wurde, ergibt sich der Zustandsverlauf nach der Massnahme analog zu den ersten Jahren des Betrachtungszeitraums. Folglich wird auch im Jahr $t=54$ derselbe Strassenzustand, wie zuvor im Jahr $t=27$ erreicht.

Es wird erneut die Massnahme 2.6.1 (Tiefenbau Deck- und Binderschicht 100mm) gewählt (Bezeichnung: $m_{2.6.1}^{IA4}$).

Insgesamt ergibt sich also die folgende Abfolge von Massnahmen über den Betrachtungszeitraum:

t=27 : Massnahme 2.6.1 Tiefenbau Deck- und Binderschicht 100mm
t=54 : Massnahme 2.6.1 Tiefenbau Deck- und Binderschicht 100mm

In Kurzform lässt sich die Erhaltungsvariante $\tilde{\chi}$ der Strategie Γ_2 gemäss Formel (14) wie folgt darstellen:

$$\mathbf{U}_{\tilde{\chi}}^{\text{Abschnitt } y}(\Gamma^2) = \left\{ \mathbf{M}_t^x \Big|_t \Big|_{m_t^x} \right\}_{\tilde{\chi}}^{\text{Abschnitt } y} = \left\{ m_{2.6.1}^{IA4} \Big|_{t=27} ; m_{2.6.1}^{IA4} \Big|_{t=54} \right\}_{\tilde{\chi}}^{\text{Abschnitt } y}$$

3.2 Kostenermittlung

Die Kosten der beiden Varianten ergeben sich gemäss den in Kapitel 5 definierten Ansätzen als Summe der einzelnen Kostengruppen der Stakeholder Betreiber, Nutzer und Dritte. Bild 76 zeigt die einzelnen Kostenanteile, die in den einzelnen Jahren des Betrachtungszeitraums anfallen. Zunächst werden die Kosten in den einzelnen Jahren ermittelt und diese dann auf den Bezugszeitpunkt $t_B=0$ diskontiert. Aus der Diskontierung ergeben sich die jährlichen Kosten-Barwerte und aus deren Summe der gesamte Kosten-Barwert KBW_t^z bzw. $KBW_t^{\tilde{z}}$ der Basisvariante (Strategie Γ_1) bzw. der Alternativvariante (Strategie Γ_2).

Es ergeben sich folgende Kosten-Barwerte für die beiden Varianten:

Basisvariante - Strategie Γ_1 : $KBW_{t_B}^z = 824'971 \text{ CHF}$

Alternativvariante - Strategie Γ_2 : $KBW_{t_B}^{\tilde{z}} = 859'900 \text{ CHF}$

Die Differenz beider Varianten beträgt:

$$\Delta KBW_t = KBW_t^{\tilde{z}} - KBW_t^z = 34'929 \text{ CHF}$$

3.3 Auswertung der Ergebnisse

Insgesamt ergibt sich beim Vergleich von Basisvariante und Alternativvariante über den Betrachtungszeitraum eine Kosten-Barwert-Differenz von $\Delta KBW = 34'929 \text{ CHF}$. Dies entspricht einer Erhöhung der Kosten der Basisvariante um 4%.

Diese Differenz teilt sich wie folgt auf die einzelnen Stakeholdergruppen auf:

$$\text{Betreiber: } \Delta KBW_{t_B}^B = 140'251 \text{ CHF}$$

$$\text{Nutzer: } \Delta KBW_{t_B}^N = -73'804 \text{ CHF}$$

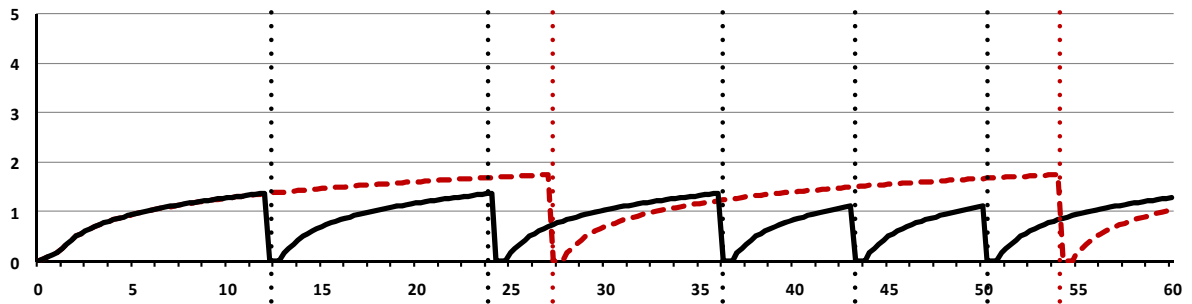
$$\text{Dritte: } \Delta KBW_{t_B}^D = -31'518 \text{ CHF}$$

Es zeigt sich also, dass die Gesamtsumme der Kosten-Barwert-Differenz zwar relativ gering ist, in den einzelnen Stakeholdergruppen aber erhebliche Verschiebungen vorhanden sind. Vor allem für den Betreiber fallen in der Alternativvariante, d.h. bei der Strategie Γ_2 erheblich höhere Kosten an. Dies ist auf die überproportional ansteigenden Kosten der Erhaltungsmassnahmen bei sehr schlechtem Strassenzustand zurückzuführen. Es sind hier zwar nur zwei Massnahmen im Betrachtungszeitraum erforderlich, diese führen aber zu erheblichen Kosten. Demgegenüber werden in der Basisvariante, d.h. bei der Strategie Γ_1 , zwar fünf Erhaltungsmassnahmen notwendig, die aber in der Summe zu geringeren Kosten führen als bei der Strategie Γ_2 .

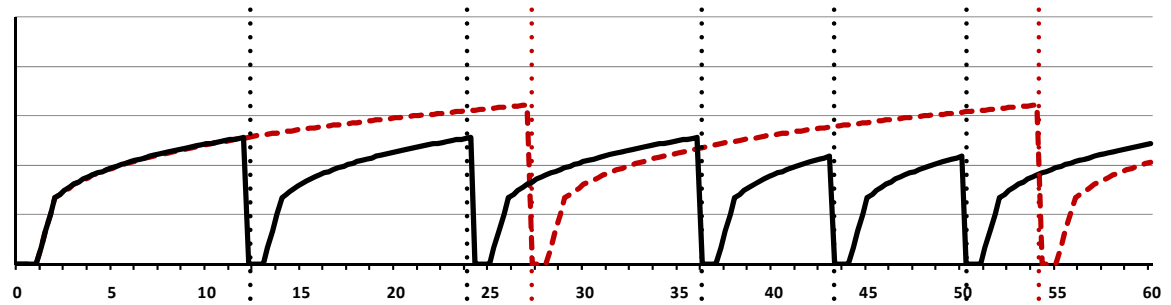
Bei den Nutzerkosten und den Kosten Dritter ergeben sich bei der Strategie Γ_2 geringere Kosten. Diese Verringerung ist vor allem auf die Unfallkosten zurückzuführen (siehe Bild 76). In der Basisvariante (Strategie Γ_1) haben die durchgeführten Massnahmen keinen Einfluss auf die Griffigkeit I4 (Bild 75). Daher ergibt sich in diesem Index eine kontinuierliche Verschlechterung und damit eine kontinuierliche Steigerung der Unfallkosten, die von I4 abhängen (siehe Kapitel 5.2). Die umfassenden Massnahmen der Alternativvariante bringen dagegen den Index I4 jeweils wieder auf Neuzustand (Bild 75) und führen damit zu einer deutlichen Verringerung der Unfallkosten (Bild 76).

In diesem Zusammenhang sind allerdings die Kostenansätze insbesondere für die Unfallkosten zu überdenken. Auch in der Basisvariante bleibt der Index I4 immer im sehr guten Bereich ($I4 < 1$). Dennoch ergeben sich erhebliche Unterschiede in den Unfallkosten, die das Gesamtergebnis nachhaltig beeinflussen. Ein derartiger Einfluss des Index I4 auf die Unfallkosten in einem Zustandsbereich, der fast noch den Neubautoleranzen entspricht, erscheint eher unwahrscheinlich.

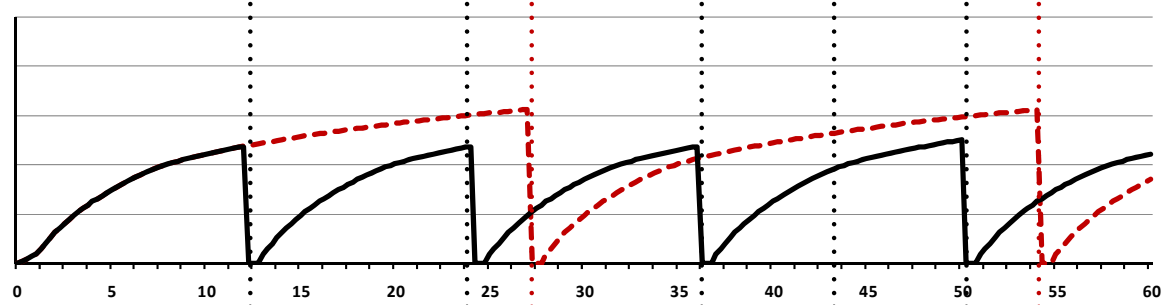
I_{A1} - Oberflächenglätte



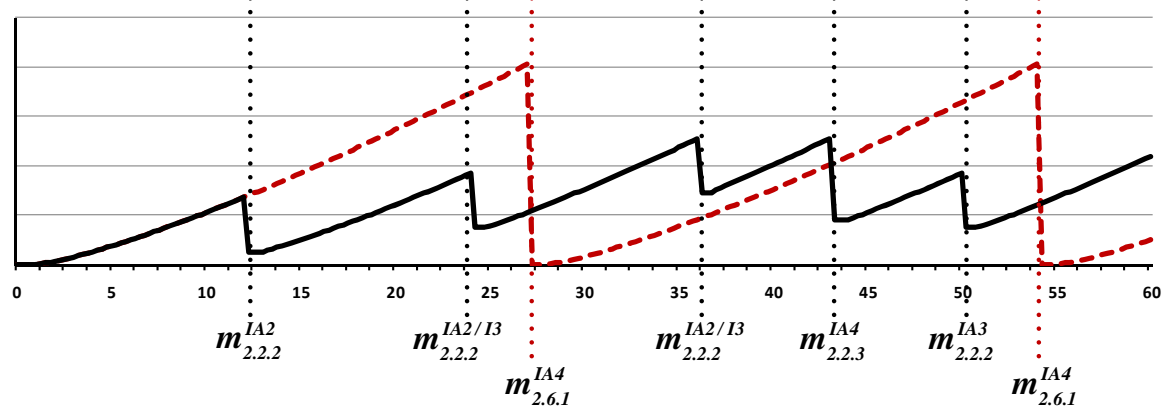
I_{A2} - Schäden bitumenh. Schichten



I_{A3} - Verformungen bitumenh. Schichten



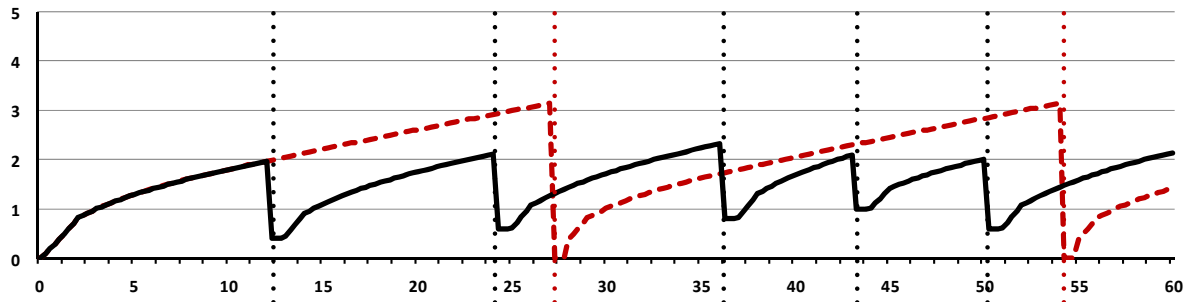
I_{A4} - Strukturelle Schäden



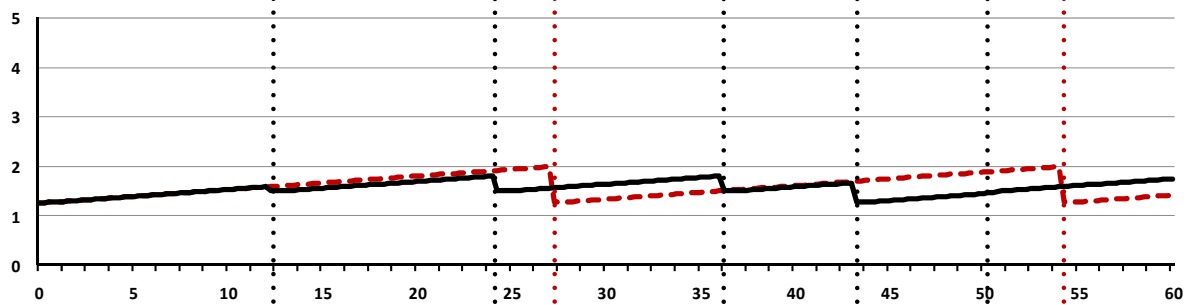
— Basisvariante χ
 - - - Verschiebungsalternative $\tilde{\chi}$

Bild 74: Zustandsverlauf über 60 Jahre in den Indizes I_{A1} bis I_{A4} bei der Basisvariante χ und der Alternativvariante $\tilde{\chi}$

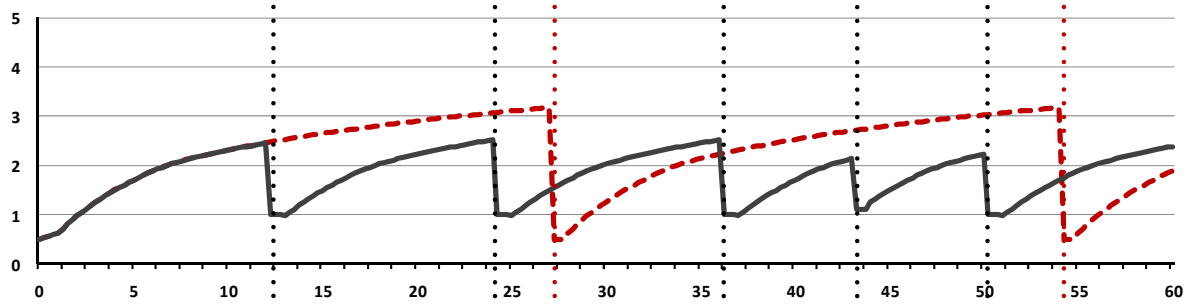
I1 - Oberflächenschäden (abgeleitet aus I_{A1} bis I_{A5})



I2 - Ebenheit längs



I3 - Ebenheit quer



I4 - Griffigkeit

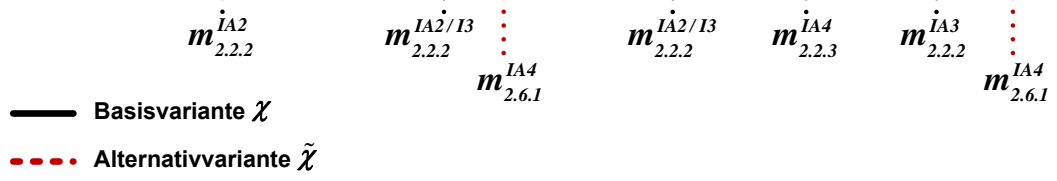
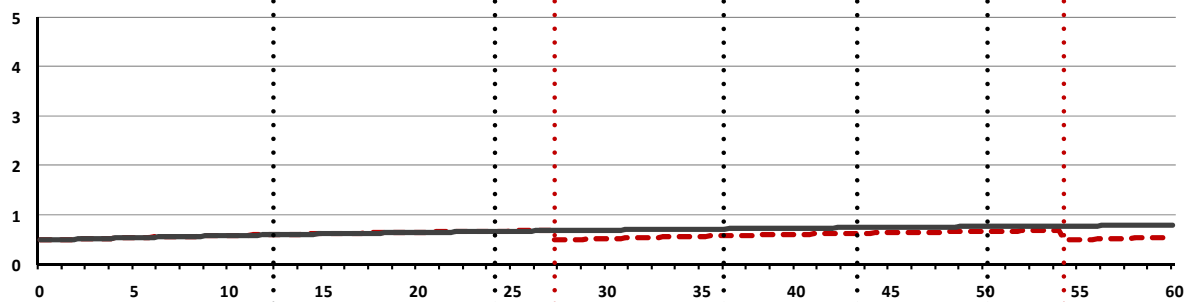
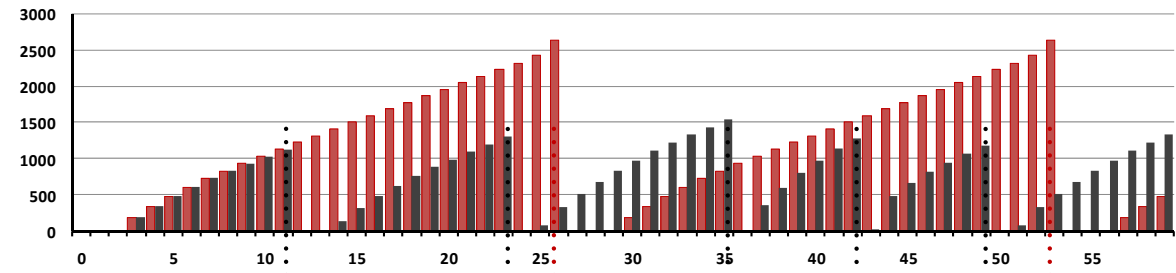
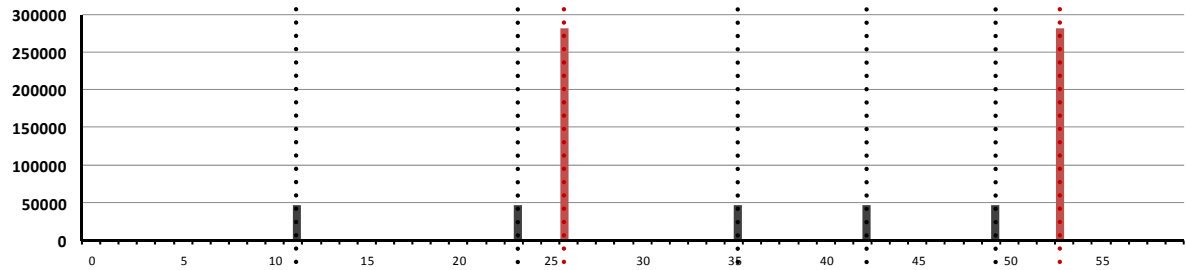


Bild 75: Zustandsverlauf über 60 Jahre in den Indizes I1 bis I4 bei der Basisvariante χ und der Alternativvariante $\tilde{\chi}$

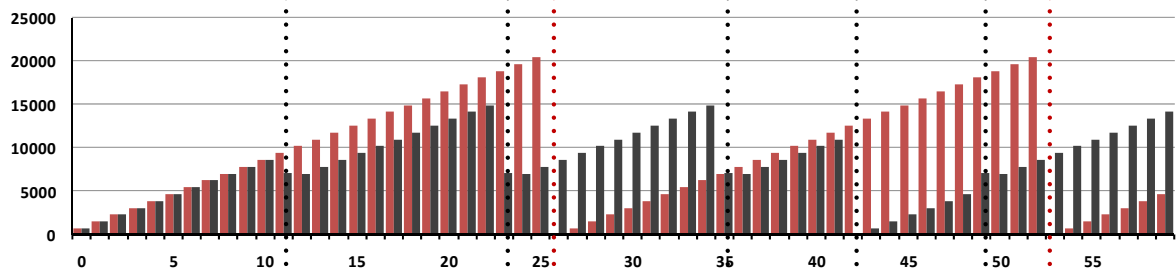
Betreiberkosten – Betrieblicher Unterhalt



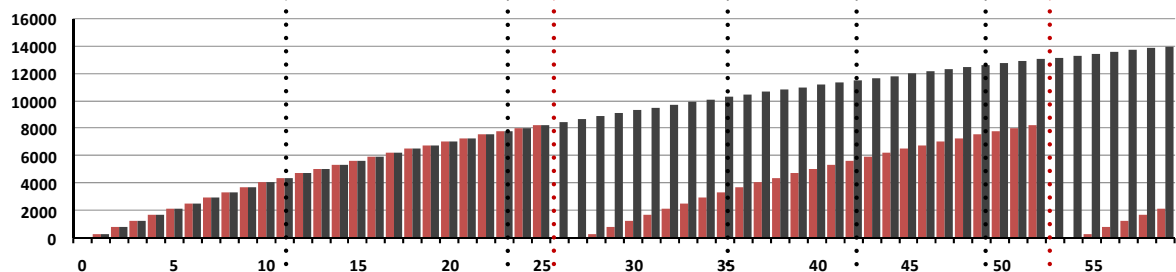
Betreiberkosten – Erhaltungsmaßnahmen



Nutzerkosten – Fahrzeugbetrieb



Nutzerkosten – Unfälle



Kosten Dritter – Unfälle

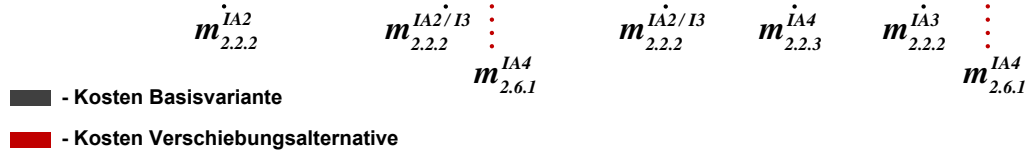
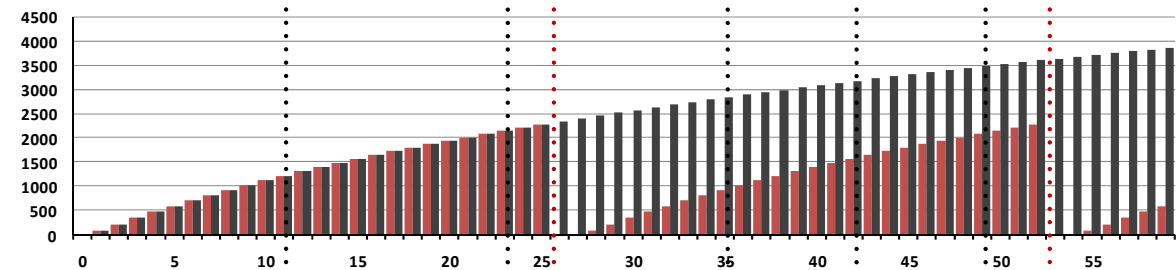


Bild 76: Verlauf der Kostenanteile der Betreiberkosten, Nutzerkosten und Kosten Dritter über 60 Jahre in der Basisvariante χ und der Alternativvariante $\tilde{\chi}$

4. Beispiel 4 – Probabilistische Simulation

In den Beispielen 1 bis 3 wurde jeweils von festen Eingangsparametern für die Kostenberechnung ausgegangen. Wie in Kapitel 6 dargelegt, ist bei realen Problemstellungen meist von gewissen Unsicherheiten in den Eingangsparametern auszugehen. Im Beispiel 4 wird daher die Kostenberechnung des in Beispiel 1 beschriebene Falls probabilistisch betrachtet.

Es wurden folgende Eingangsparameter in die probabilistische Simulation einbezogen:

- Fixe und variabel Massnahmekosten des Strassenbetreibers mit einer maximalen Abweichung von $\pm 10\%$
- Laufende Strassenerhaltungskosten des Strassenbetreibers mit einer maximalen Abweichung von $\pm 5\%$
- Verkehrsbelastung (DTV) mit einer maximalen Abweichung von $\pm 5\%$
- Sämtliche Kostenansätze für Nutzer und Dritte mit einer maximalen Abweichung von $\pm 5\%$

Als Erwartungswert wurden jeweils die im Beispiel 1 angenommenen Parameterausprägungen angesetzt. Bei allen Parametern wurde die Gausssche Normalverteilung für die Dichtefunktion zwischen der maximalen Abweichung nach oben und unten (Maximal und Minimalwert) angenommen. Die Verteilung der möglichen Ausprägungen der Parameter ist also symmetrisch zum Erwartungswert, d.h. eine Abweichung nach oben ist gleich wahrscheinlich wie eine Abweichung nach unten.

Die Simulation wurde in 150'000 Durchläufen durchgeführt, wobei jeweils ein mögliches Szenario der Parameterausprägungen generiert wurde. Aus der Gesamtheit der Simulationsdurchläufe ergeben sich die Dichte- und Verteilungsfunktion der Gesamtkosten sowie der Kostendifferenz zwischen den verschiedenen Varianten.

1.1 Variantendefinition

Vereinfachend wurden der Strassenzustandsverlauf und damit auch die Massnahmenzeitpunkte fest angenommen und hier keine probabilistischen Streuungen berücksichtigt. Die probabilistische Simulation wurde also auf die Kostenberechnung beschränkt. Die probabilistische Simulation der Variantenbildung könnte entsprechend dem in Kapitel 6.3 beschriebenen Vorgehen ergänzt werden.

Die Basisvariante und die Vergleichsalternative können hier aus dem Beispiel 1 übernommen werden (siehe oben).

1.2 Kostenermittlung

Die Kostenansätze können direkt vom Beispiel 1 übernommen werden. Die dort angesetzten fixen Werte entsprechen in der probabilistischen Betrachtung den Erwartungswerten der Parameterausprägung. Die probabilistische Streubreite der einzelnen Parameter wurde wie oben beschrieben angesetzt.

Sowohl für die Basisvariante als auch für die Verschiebungsalternative wurden jeweils 150'000 mögliche Szenarien simuliert. In jedem dieser Szenarien δ wurde damit eine mögli-

che Ausprägung des Kostenbarwerts $KBW_{t_B,\delta}^Z$ bzw. $KBW_{t_B,\delta}^{\tilde{Z}}$ bestimmt. Für beide Varianten ergibt sich daraus eine Dichtefunktion $f(KBW_{t_B,\delta}^Z)$ bzw. $f(KBW_{t_B,\delta}^{\tilde{Z}})$, die die Verteilung der einzelnen Ergebnisse zwischen Minimal- und Maximalwert darstellt (Bild 77). Ausserdem können die Standardabweichung, als Mass für die mittlere Streubreite sowie die 5%- und 95%-Fraktilewerte ermittelt werden.

Je mehr Simulationen durchgeführt werden, desto mehr nähern sich die Einzelergebnisse einer gleichmässigen Funktion an. Die Erwartungswerte der Kostenbarwerte $KBW_{t_B,EW}^Z$ bzw. $KBW_{t_B,EW}^{\tilde{Z}}$ nähern sich den in Beispiel 1 deterministisch ermittelten fixen Kostenbarwerten $KBW_{t_B}^Z$ bzw. $KBW_{t_B}^{\tilde{Z}}$ an.

Aus der Differenz $f(\Delta KBW_{t_B,\delta}) = f(KBW_{t_B,\delta}^{\tilde{Z}}) - f(KBW_{t_B,\delta}^Z)$ der Dichtefunktionen der Kostenbarwerte der beiden Varianten ergibt sich die Dichtefunktion der Zusatzkosten der Verschiebungsalternative (Bild 78).

1.3 Auswertung der Ergebnisse

Insgesamt ergibt sich beim Vergleich von Basisvariante und Verschiebungsalternative über den Betrachtungszeitraum ein Erwartungswert der Kosten-Barwert-Differenz von **$\Delta KBW = 129'800$ CHF**. Dieser Wert entspricht (mit einer gewissen Abweichung aufgrund der Zufallskomponente der Simulation) dem im Beispiel 1 deterministisch ermittelten Wert.

Die Streubreite der Ergebnisse, d.h. die Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert bzw. die Standardabweichung ist bei der Verschiebungsalternative deutlich grösser als bei Basisvariante. Die Kosten für diese Variante sind also mit grösseren Unsicherheiten behaftet als bei der Basisvariante (Bild 77).

Für die Entscheidungsfindung zwischen den beiden Varianten ist vor allem die Betrachtung der Dichtefunktion der Kosten-Barwert-Differenz interessant (Bild 78). Der Erwartungswert dieser Funktion entspricht der Differenz der zuvor ermittelten Erwartungswerte der beiden Varianten. Dieser weist eine deutliche Erhöhung der Kosten bei der Verschiebungsalternative auf. Es zeigt sich allerdings auch, dass die Streubreite der Dichtefunktion der Kosten-Barwert-Differenz relativ gross ist. Die Ergebnisse der Simulation bewegen sich zwischen einer Einsparung von 315'200 CHF und einer Erhöhung der Kosten um 572'000 CHF in Folge der Massnahmenverschiebung. Wobei aber in einem Grossteil der Fälle (95.4%) eine Erhöhung der Kosten berechnet wurde.

Es ist also mit einer Wahrscheinlichkeit von 95.4% damit zu rechnen, dass die Verschiebung der Massnahme zu einer Erhöhung der Kosten führt.

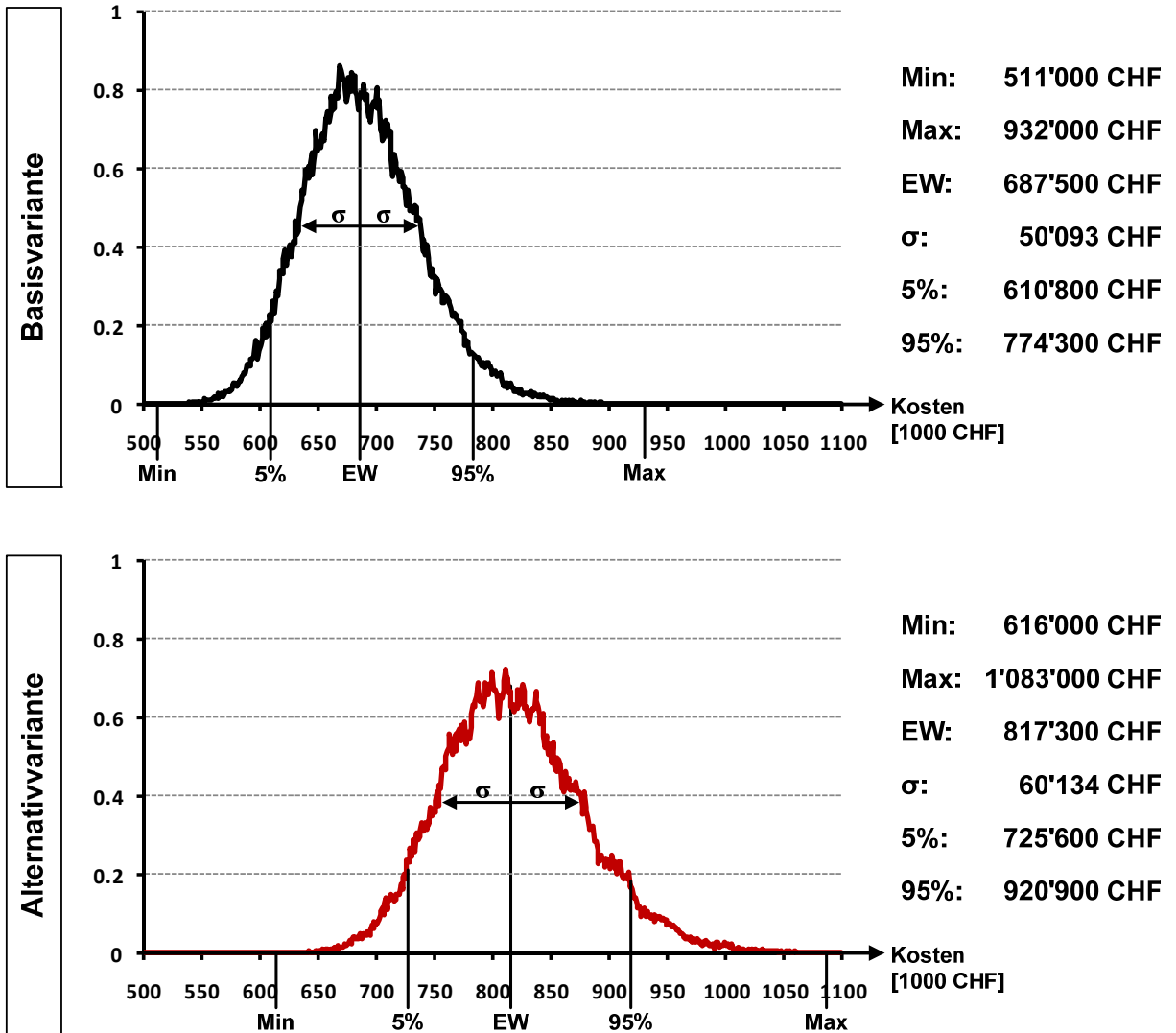


Bild 77: Dichtefunktion der Kosten-Barwerte der Basis- und Alternativvariante nach 150'000 Simulationenläufen

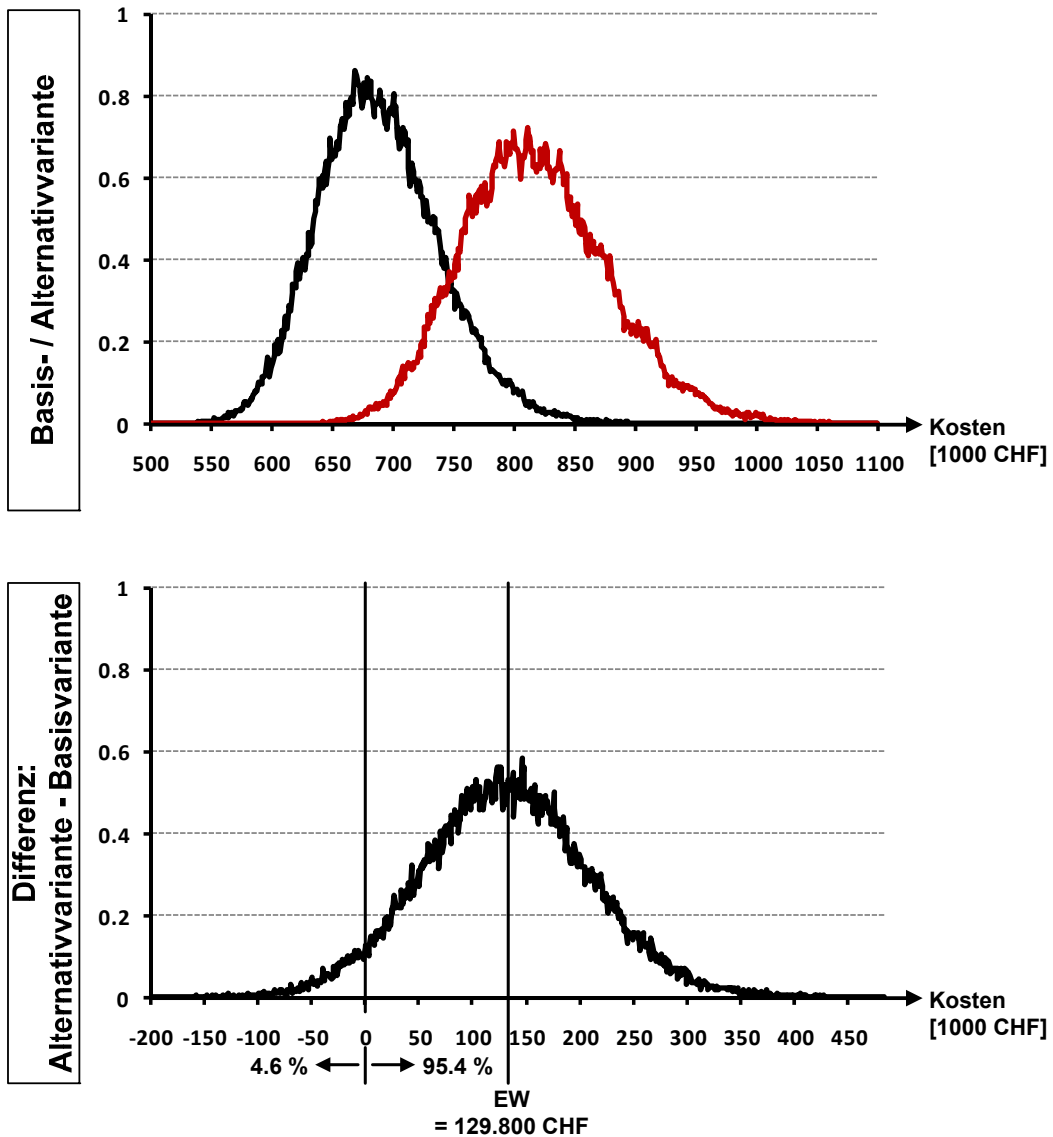


Bild 78: Gegenüberstellung der Dichtefunktionen Kosten-Barwerte der Basis- und Alternativvariante sowie Dichtefunktion der dich daraus ergebenden Kosten-Barwert-Differenz nach 150'000 Simulationsläufen

Literaturverzeichnis

- Ang, A. H.-S. and W. H. Tang (2006). Probability concepts in engineering emphasis on applications to civil and environmental engineering. Hoboken, Wiley.
- Baddeley, M. C. (2004). Investment theories and analysis. Houndmills, Basingstoke, Palgrave Macmillan.
- Bea, R. G., P. E. Fellow, et al. (2000). "Requalification and Maintenance of Marine Pipeline Infrastructures." *Journal of Infrastructure Systems* **6**(3): 89-96.
- Berger, P. L. and T. Luckmann (1977). Die gesellschaftliche Konstruktion der Wirklichkeit eine Theorie der Wissenssoziologie. Frankfurt am Main, S. Fischer Verlag.
- Bertalanffy, L. v. (1969). General System Theory - Foundations, development, applications. New York, George Braziller.
- Bleicher, K. (1996). Das Konzept Integriertes Management. Frankfurt/Main etc., Campus-Verlag.
- Boulding, K. (1956). General Systems Theory. General systems : yearbook of the International Society for the Systems Sciences. New York, International Society for the Systems Sciences: 11-17.
- Boussabaine, A. and R. J. Kirkham (2004). Whole life-cycle costing - risk and risk responses. Oxford, Blackwell Publishing.
- Breiter, B., G. Oefner, et al. (1985). Optimierung von Instandsetzungsstrategien und Einführung technologischer und wirtschaftlicher Trendmodelle in Wirtschaftlichkeitsrechnungen. Bonn, Bundesminister für Verkehr Abteilung Strassenbau.
- Bundesamt für Statistik. (2006a). "Landesindex der Konsumentenpreise - Aktuelle Resultate." from <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/05/02/blank/key/jahresdurchschnitte.html>.
- Bundesamt für Statistik (2006b). Schweizerischer Baupreisindex; Oktober 2006. Neuchatel, Bundesamt für Statistik Schweiz.
- Bundesamt für Statistik. (2007). "Landesindex der Konsumentenpreise - Teuerungsprognosen." from <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/05/02/blank/key/teuerungsprognosen.html>.
- Costello, S. B., M. S. Snaith, et al. (2005). "Stochastic model for strategic assessment of road maintenance." *Transport* **158**(TR4): 203-211.
- Curran, M. W. (1998). "Range Estimating - Measuring Uncertainty and Reasoning with Risk." *Cost Engineering* **31**: 18-26.
- DIN EN 31051 (2003). Grundlagen der Instandhaltung. Berlin, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Ecoplan (2006). Handbuch eNISTRA. Bern und Altdorf, Bundesamt für Strassen, ASTRA.
- Eidgenössisches Finanzdepartement. (2008). "Finanzplatz Schweiz im Standortwettbewerb." Retrieved 01.03.2008, from http://www.efv.admin.ch/d/dokumentation/downloads/themen/finanzplatz/FinPlatz_Standort_0703_d.pdf.
- Emch & Berger Bern AG (2003). Management der Strassenerhaltung (MSE) für Strassennetze in Städten und Gemeinden Erhaltungsplanung bei Infrastrukturanlagen planification d'entretien des installations d'infrastructure. Bern, Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation Bundesamt für Strassen.
- EN 13306 (2001). Maintenance Terminology, European Committee for Standardization.
- Fastrich, A. and G. Girmscheid (2007). Public Private Partnership for Maintenance Activities - System Boundaries for a Life Cycle Oriented Economic Efficiency Analysis. CIB World Building Congress. T. C. Haupt and R. Milford. Cape Town, CIB.
- Finn, F. (1998). "Pavement Management Systems - Past, Present and Future." Retrieved 01.07.2008, from <http://www.tfhr.gov/pubrds/julaug98/pavement.htm>.
- Frangopol, D. M. and L. C. Neves (2003). Probabilistic Performance Prediction of Deteriorating Structures Under Different Maintenance Strategies: Condition, Safety and Cost. Life-cycle performance of deteriorating structures assessment, design and management. International Association for Bridge Maintenance and Safety, Joint Committee on Structural Safety and D. M. Frangopol. Reston, VA, American Society of Civil Engineers: 444.
- Gercbach, I. B. (1977). Models of preventive maintenance. Amsterdam a.o., North-Holland.
- Gertsbakh, I. B. (1977). Models of preventive maintenance. Amsterdam a.o., North-Holland.
- Girmscheid, G. (2006a). "NPV-Wirtschaftlichkeitsanalysemodell - Lebenszyklusbetrachtung von kommunalen Strassenunterhalts-PPPs." *Bauingenieur* **81**(10/2006): 455-463.
- Girmscheid, G. (2006b). "Risikobasiertes probabilistisches LC-NPV-Modell - Bewertung alternativer baulicher Lösungen." *Bauingenieur* **81**(09/2006): 394-405.
- Girmscheid, G. (2006c). Strategisches Bauunternehmensmanagement prozessorientiertes integriertes Management für Unternehmen in der Bauwirtschaft. Heidelberg, Springer.

- Girmscheid, G. (2007a). "Entscheidungsmodell - Lebenszyklusorientierte Strategiebildung und Unterhaltsvarianten für Strassennetze." *Bauingenieur* **82**(7/8): 346-355.
- Girmscheid, G. (2007b). "Entscheidungsmodell - Lebenszyklusorientierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Unterhaltsstrategien für Strassennetze." *Bauingenieur* **82**(7/8): 356-366.
- Girmscheid, G. (2007c). *Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften*. Zürich, Eigenverlag des IBB, ETH Zürich.
- Girmscheid, G. (2007d). *Holistic Probabilistic Risk Management Process Model for Project-Oriented Enterprises*. Zürich, IBB Eigenverlag.
- Girmscheid, G. (2008). "Systemauswahl und Bereitstellungsvariante von Bauproduktionseinrichtungen - Entscheidungsmodell." *Bauingenieur* **83**(03/2008): 136-146.
- Girmscheid, G. and T. A. Busch (2008). *Projektrisikomanagement in der Bauwirtschaft*. Berlin, Bauwerk Verlag.
- Glasersfeld, E. v. (1998). *Radikaler Konstruktivismus Ideen, Ergebnisse, Probleme*. Frankfurt a.M., Suhrkamp.
- Gnehm, V. (2008). *Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen*, Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen.
- Grant, R. M. (2005). *Contemporary strategy analysis*. Malden, Mass., Blackwell Publishing.
- Guba, E. G. and Y. S. Lincoln (1994). *Competing paradigms in qualitative research*. *Handbook of qualitative research*. N. K. Denzin. Thousand Oaks, Sage: 105-118.
- Hirst, I. (2001). *Investment appraisal for shareholder value*. Harlow, Financial Times Prentice Hall.
- HM Treasury (2004). *The Green Book - Appraisal and Evaluation in Central Government*. London, TSO.
- Johnson, G. and K. Scholes (2002). *Exploring corporate strategy text and cases*. London, Prentice Hall.
- Keynes, J. M. (1936). *The general theory of employment interest and money*. London, Macmillan.
- Kuhn, K. D. and S. M. Madanat (2005). "Model uncertainty and the management of a system of infrastructure facilities." *Transportation Research, Part C* **13**: 391-404.
- Labi, S. and C. S. Kumares (2005). "Life-Cycle Evaluation of Flexible Pavement Preventive Maintenance." *Journal of Transportation Engineering* **131**(10): 774-751.
- Lee, E.-B. and C. W. Ibbs (2004). "Computer Simulation Model: Construction Analysis for Pavement Rehabilitation Strategies." *Journal of Construction Engineering and Management* **131**(4): 449-548.
- Lindenmann, H.-P., H. Bär, et al. (2000). *Erhaltungsmanagement der Strassenverkehrsanlagen generelle Fachkonzepte concepts i.e. concepts généraux MSE 99/00*. Bern, Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation Bundesamt für Strassen.
- Liu, M. and D. M. Frangopol (2004). "Multiobjective Maintenance Planning Optimization for Deteriorating Bridges Considering Condition, Safety, and Life-Cycle Cost." *Journal of Structural Engineering* **131**(5): 833-842.
- Liu, M. and D. M. Frangopol (2005). "Multiobjective Maintenance Planning Optimization for Deteriorating Bridges Considering Condition, Safety, and Life-Cycle Cost." *Journal of Structural Engineering* **131**(5): 833-842.
- Liu, M. and D. M. Frangopol (2006). "Optimizing Bridge Network Maintenance Management under Uncertainty with Conflicting Criteria: Life-Cycle Maintenance, Failure, and User Costs." *Journal of Structural Engineering* **132**(11): 1835-1845.
- Lücke, W. (1955). "Investitionsrechnung auf der Grundlage von Ausgaben oder Kosten? ." *ZfH*: 310ff.
- Lücking, J., T. Herrmann, et al. (2008). *Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen*, Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen.
- Maerschalk, G. (2000). *Erstanwendung eines Pavement Management Systems (PMS)*. Friedberg, VSVI-Vortragsveranstaltung "Management der Strassenerhaltung".
- Maerschalk, G. and A. Schmuck (1987). *Auswirkungen aufgeschobener Erhaltungsmassnahmen auf den mittel- und langfristigen Finanzbedarf für die Strassenerhaltung*. Bonn-Bad Godesberg, Bundesminister für Verkehr.
- Mayer, S. (1995). *Maintenance optimization of safety related nuclear power plant systems using probabilistic safety assessment and Markov modelling*. Wien.
- Mertens, P. (1982). *Simulation*. Stuttgart, Poeschel Verlag.
- Narayan, V. (2004). *Effective maintenance management risk and reliability strategies for optimizing performance*. New York, Industrial Press.
- Newnan, D. G., T. Eschenbach, et al. (2004). *Engineering economic analysis*. New York, Oxford University Press.

- Oefner, G. and A. Schmuck (1979). Investitionsrechnung als Entscheidungshilfe bei strassenbautechnischen Fragestellungen. München-Neubiberg.
- Oefner, G. and A. Schmuck (1980). Grundlagen zur Entwicklung von Verhaltens- und Managementmodellen für den Strassenoberbau. München-Neubiberg.
- Papula, L. (2009). Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler mit zahlreichen Rechenbeispielen und einer ausführlichen Integraltafel. Wiesbaden, Vieweg+Teubner.
- PIARC Technical Committee on Road Management (2005). Asset Management for Roads - An Overview, World Road Association.
- Plessner, H. (1965). Die Stufen des Organischen und der Mensch Einleitung in die philosophische Anthropologie. Berlin, Gruyter.
- Popper, K. R. (1984). Auf der Suche nach einer besseren Welt Vorträge und Aufsätze aus dreissig Jahren. München Zürich, Piper.
- Rafi, A.-A., I. Scazziga, et al. (2006). Erhaltungsmanagement Gesamtbewertung der Fahrbahnen, Substanz- und Gebrauchswert. Bern, Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation Bundesamt für Strassen.
- RAFI Managementberatung (Zürich) (2005). Optimierungsprozesse im Management der Strassenerhaltung (MSE). Bern, Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation Bundesamt für Strassen.
- Rapp Trans AG (Schweiz) (2006). Diskontsatz in Kosten-Nutzen-Analysen im Verkehr. Bern, Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation Bundesamt für Strassen.
- Ropohl, G. (1999). Allgemeine Technologie - Eine Systemtheorie der Technik. München, Hanser.
- Ross, S. A., R. W. Westerfield, et al. (2002). Corporate finance. Boston, McGraw-Hill Higher Education.
- Scazziga, I. (2008). Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Schadensprozesse und Zustandsverläufe, Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen.
- Schmidt, J. (1996). Wirtschaftlichkeit in der öffentlichen Verwaltung Grundsatz der Wirtschaftlichkeit, Zielsetzung, Planung, Vollzug, Kontrolle, Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, Kosten- Und Leistungsrechnung. Berlin, Schmidt.
- Schweizerische Nationalbank (2008). Statistisches Monatsheft Februar 2008. Zürich.
- Schweizerischer Baumeisterverband (2006). Produktionskosten-Index. Zürich, Schweizerischer Baumeisterverband, Technisch-Betriebswirtschaftliche Abteilung.
- SIA 469 (1997). Erhaltung von Bauwerken, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- Smith, K. L., L. Titus-Glover, et al. (2005). Evaluation of the Cost Benefits of Continuous Pavement Preservation Design Strategies Versus Reconstruction. Phoenix, Arizona Departement of Transportaton.
- SN 640200a (2003). Geometrisches Normalprofil - Allgemeine Grundsätze, Begriffe und Elemente, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 640302b (2000). Strasse und Gleiskörper, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 640320a (2000). Dimensionierung - Äquivalente Verkehrslast, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 640324a (1997). Dimensionierung Oberbau, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 640900a (2004). Erhaltungsmanagement (EM) - Grundnorm, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 640904 (2003). Erhaltungsmanagement (EM) - Gesamtbewertung von Fahrbahnen, Kunstbauten und technischen Ausrüstungen: Substanz- und Gebrauchswerte, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 640907 (2003). Erhaltungsmanagement (EM) - Grundlagen der Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 640925b (2003). Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) - Zustandserhebung und Indexbewertung, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 640926 (2005). Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) - Visuelle Zustandserhebung: Einzelindizes, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 640931 (2000). Erhaltungsmanagement - Erhaltungsstrategien für Fahrbahnen, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 641820 (2006). Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Grundnorm, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 641822 (2007). Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr; Zeitkosten im Personenverkehr, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 641823 (2007). Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr; Zeitkosten im Güterverkehr, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.

- SN 641826 (2008). Betriebs- und Unterhaltskosten von Strassen, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 641827 (noch unveröffentlicht-a). Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Betriebskosten von Fahrzeugen, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 641827 (noch unveröffentlicht-b). Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Externe Kosten, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- SN 641931 (2000). Erhaltungsmanagement - Erhaltungsstrategien für Fahrbahnen, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.
- Steiner, A., W. Landolt, et al. (2001). Tätigkeitsabläufe und Entscheidungshilfen im Management der Strassenerhaltung. Bern, Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation Bundesamt für Strassen.
- Thommen, J.-P. (1992). Betriebswirtschaftslehre. Zürich, Thommen.
- Thommen, J.-P. (1999). Betriebswirtschaftslehre. Zürich, Versus.
- Ulrich, H. (2001). Gesammelte Schriften - Das St. Gallener Management-Modell. Bern, Haupt Verlag.
- Weber, M. and J. Winckelmann (1990). Wirtschaft und Gesellschaft Grundriss der verstehenden Soziologie. Tübingen, Mohr.
- Weninger-Vycudil, A., P. Simanek, et al. (2002). Modern Pavement Management in Austria, Practical application of VIAPMS-analytical software on motorways and expressways in Austria. 6. Slovenski kongres o cestah in prometju, Ljubljana.
- Wöhe, G. (1984). Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München, Vahlen.
- Yin, R. K. (1994). Case study research design and methods. Thousand Oaks etc., SAGE publications.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 16.01.2009

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2004/715

Projekttitel: Zusatzkosten infolge Vor- oder Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen

Enddatum: 16.01.2009

Projektleiter

Name: Vorname:

Amt, Firma, Institut:

Strasse, Nr.:

PLZ: Email:

Ort: Telefon:

Kanton, Land: Fax:

Texte:

Zusammenfassung der
Projektresultate:

Auf der Grundlage einer theoriegeleiteten in sich abgeschlossenen Systemdefinition wurden für die Berechnung der Lebenszykluskosten sowie der Zusatzkosten infolge einer zeitlichen Verschiebung von Erhaltungsmaßnahmen zwei aufeinander aufbauende Modelle entwickelt.

Das Erhaltungsmanagementmodell liefert die Grundlagen für eine systematisierte Entwicklung verschiedener Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten über den Lebenszyklus. Im Kosten-Barwert-Entscheidungsmodell erfolgt dann die Bewertung der lebenszyklusorientierten Kosten der betroffenen Stakeholdergruppen in den verschiedenen Varianten. Die Kostenberechnung erfolgt auf der Basis einer dynamischen Barwertberechnung.

Mit Hilfe dieser beiden Modelle lassen sich beliebige Varianten des Strassenunterhalts sowie Verschiebungen einzelner oder mehrerer Massnahmen innerhalb einer solchen lebenszyklusorientierten Variante abbilden und kostenmässig bewerten. Die Gegenüberstellung der Gesamtkosten der verschiedenen Varianten bzw. einer Basisvariante und einer Verschiebungsalternative liefert die Zusatzkosten, die durch eine Änderung bzw. die Abweichung von einer geplanten Massnahmenabfolge entstehen.

Aus den durchgeführten Beispielberechnungen lassen sich Rückschlüsse auf die Mechanismen der Entstehung von Zusatzkosten in den einzelnen Kostengruppen bei der Verschiebung einer Erhaltungsmaßnahme ziehen. Die konkrete Höhe der Zusatzkosten hängt stark von den gewählten Verhaltensmodellen des Strassenzustands und den gewählten Kostenansätzen sowie den individuellen Randbedingungen im betrachteten Fall ab.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die in der Projektausschreibung vorgegebenen Ziele:

- Erarbeiten der Grundlagen zur Ermittlung der Veränderungen der Gesamtkosten und Gesamtnutzen von Erhaltungsmaßnahmen der Fahrbahnen in Zusammenhang mit zeitlichen Verschiebungen der Ausführung der Erhaltungsmaßnahmen.

wurden in der Projektbearbeitung erreicht. Die entwickelten Modelle, Erhaltungsmanagementmodell und Kosten-Barwert-Entscheidungsmodell, ermöglichen die Abbildung und Bewertung von Verschiebungen von Erhaltungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Lebenszykluskosten der beteiligten Stakeholder.

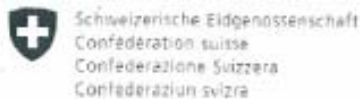
Folgerungen und Empfehlungen:

Die Projektergebnisse ermöglichen eine holistische Betrachtung der Kosten der verschiedenen Stakeholder des Strassenunterhalts insbesondere im Hinblick auf eine Verschiebung von Erhaltungsmaßnahmen. Darüberhinaus wurden die Grundlagen für eine Entwicklung und Optimierung geeigneter Erhaltungsstrategien sowie ein Vorgehen zur Ableitung von Erhaltungsvarianten aus einer Erhaltungsstrategie erarbeitet.

Weiterer Forschungsbedarf besteht noch im Bereich der Strategieentwicklung insbesondere bezüglich der Optimierung der Erhaltungsstrategie für den jeweiligen Anwendungsfall.

Publikationen:

Girmscheid G., Fastrich A : Zusatzkosten infolge Vor- oder Aufschieb von Erhaltungsmaßnahmen, Strasse und Verkehr, 11/2008



Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:	<p>Das Forschungsprojekt „Zusatzkosten infolge Vor oder Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen“ ist Teil des Forschungspakets VSS 2005/710 „Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen“</p> <p>Der Forschungsbericht ist vollständig, klar strukturiert und verständlich. Die Experten der Begleitkommission erachten die geleistete Arbeit als qualitativ hochstehend.</p> <p>Die eingefügten Grafiken unterstützen die Textpassagen gut und bewirken, dass der Bericht gut verständlich ist.</p> <p>Die im Anhang dargestellten Berechnungsbeispiele auf Basis der dynamischen Barwertberechnung zeigen exemplarisch den Nutzen des Kosten-Barwert-Entscheidungsmodells auf.</p>
Umsetzung:	Die Begleitkommission empfiehlt den Bericht in der vorliegenden Version zur Veröffentlichung.
weitergehender Forschungsbedarf:	Weiterer Forschungsbedarf besteht noch im Bereich der Strategieentwicklung insbesondere bezüglich der Optimierung der Erhaltungsstrategie für den jeweiligen Anwendungsfall.
Einfluss auf Normenwerk:	Der Forschungsbericht ist Bestandteil des Forschungsprojekts VSS 2005/710 „Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement Fahrbahnen“ und dient als Grundlage für den Synthesbericht.

Präsident Begleitkommission:

Name:	Goëbels	Vorname:	Dirk
Amt, Firma, Institut:	Baudirektion Kanton Zürich, Tiefbauamt		
Strasse, Nr.:	Walcheplatz 2		
PLZ:	8090	Email:	dirk.goebels@bd.zh.ch
Ort:	Zürich	Telefon:	043 259 31 75
Kanton, Land:	Zürich, Schweiz	Fax:	043 259 51 56

Unterschrift Präsident Begleitkommission: